

## ВОДОПОСТАЧАННЯ ТА ВОДОВІДВЕДЕННЯ

УДК 628.356

<https://doi.org/10.31713/vt120221>

**Ковальчук В. А., д.т.н., професор** (Національний університет водного господарства та природокористування, kvant56@ukr.net)




### РЕКОНСТРУКЦІЯ МІСЬКИХ КАНАЛІЗАЦІЙНИХ ОЧИСНИХ СПОРУД

Очистка стічних вод міста Чортків здійснювалася за розробленою ще в 60-і роки минулого століття технологічною схемою із застосуванням двоярусних відстійників і біофільтрів. Очисні споруди не забезпечували необхідний ступінь очистки стічних вод, особливо з урахуванням сучасних вимог до якості очистки за біогенними елементами. В 2017 році рівненська фірма «Комфорт-Еко» у співпраці з НУВГП приступила до розробки проєкту реконструкції зазначених очисних споруд. В основу проєкту була покладена технологія, що ґрунтується на модифікованому процесі Людчака – Етінгера з попередньою денітрифікацією для забезпечення видалення сполук азоту. Видалення фосфатів передбачалося здійснити із застосуванням реагентів. Передбачалося максимально використати для очистки стічних вод вже існуючі споруди. Реконструкція очисних споруд розпочалася у вересні 2018 року, нині завершуються пусконаладжувальні роботи.

**Ключові слова:** міські стічні води; міські каналізаційні очисні споруди; біологічна очистка стічних вод; нітрифікація-денітрифікація; комбіновані аеротенки.

**Постановка проблеми.** Технологічна схема із двоярусними відстійниками і біофільтрами була у свій час базовою для очистки стічних вод невеликих населених пунктів [1]. Двоярусні відстійники забезпечують первинне відстоювання стічних вод і одночасне зброджування у психрофільних умовах суміші осадів – того, який утворюється власне в процесі відстоювання, а також надлишкової біологічної плівки, яка утворюється у процесі біологічної очистки стічних вод на біофільтрах. Однак двоярусним відстійникам властиві значні недоліки, а саме: необхідність розміщення споруд в опалюваних будівлях у районах із низькими зимовими



температурами; можливість зменшення до 30% ефекту освітлення стічних вод через проникання в жолоби газів бродіння і частинок збродженого осаду; можливість забивання щілин у жолобах «зверху» при високій концентрації завислих речовин у стічних водах; можливість забивання щілин жолобів «знизу» кіркою, що утворюється на поверхні; ущільнення осаду в нижній частині мулової камери до вологості 85%, при якій процеси зброджування значно уповільнюються. Крім цього, тривала експлуатація двоярусних відстійників супроводжується руйнуванням бетону і корозією арматури.

Руйнування бетону і корозія арматури характерні також і залізобетонних конструкцій біофільтрів. Корозія і, як наслідок, незадовільна робота дозувальних пристроїв стічних вод біофільтрів є причиною замулення їх завантаження. Внаслідок цього погіршується ефективність власне біологічної очистки стічних вод.

Станом на 2016 рік очистка стічних вод на очисних спорудах міста Чортків була вкрай незадовільною. Зокрема, ХПК очищених стічних вод становила  $531 \text{ мг O}_2/\text{дм}^3$ , БПК<sub>5</sub> –  $216 \text{ мг O}_2/\text{дм}^3$ , завислі речовини –  $115 \text{ мг/дм}^3$ , азот амонійний –  $14,5 \text{ мг/дм}^3$ , нітрити –  $0,44 \text{ мг/дм}^3$ , нітрати –  $1,89 \text{ мг/дм}^3$ , фосфати –  $4,88 \text{ мг/дм}^3$ , рН – 7,18.

Конструктивні недоліки і зношеність не були, однак, головними причинами необхідності реконструкції очисних споруд міста Чортків. В 2013 році у дію були введені нові ДБН В.2.5-75:2013 [2], які вимагають застосування принципово нових технологічних схем очистки стічних вод, що забезпечуватимуть не лише вилучення із стічних вод органічних забруднень, але також сполук азоту і фосфору. Так, в п. 10.1.12 вказується, що «при еквівалентній чисельності понад 500 жителів слід проектувати також біологічне очищення від сполук азоту. У проєкті також має визначатися необхідність і технологія очистки стічних вод від сполук фосфору». Навіть якщо допустити, що очисні споруди міста Чортків працюватимуть задовільно, то біофільтри, у кращому випадку, забезпечуватимуть лише нітрифікацію амонійного азоту без денітрифікації. Може відбуватися лише незначна дефосфатація за рахунок часткового включення фосфатів у біоплівку. Таким чином, існуюча до реконструкції очисних споруд технологічна схема в принципі не може забезпечити необхідний ступінь очистки стічних вод від органічних речовин і біогенних елементів.

Для біологічної очистки стічних вод із видаленням сполук азоту

ДБН (п. 3.2.3 [2]) рекомендується використовувати споруди типу аеротенків із біологічною нітрифікацією-денітрифікацією. Вибір конкретної технології біологічного видалення сполук азоту являє собою складне технологічне і техніко-економічне завдання. Насамперед прийнята технологічна схема видалення сполук азоту залежить від показників якості очищуваних стічних вод, необхідного ступеня очистки стічних вод та їх витрати тощо.



Визначене на початку розрахунків значення показника денітрифікації для відстояних стічних вод, яке виявилось меншим від 0,15, вказало на можливість застосування первинного освітлення стічних вод [3]. Для цього в технологічній схемі було передбачено використання після відповідного ремонту існуючих двоярусних відстійників.

Серед наведених у ДБН рекомендованих технологічних схем нітрифікації-денітрифікації до застосування при реконструкції очисних споруд було прийнято схему із попередньою денітрифікацією – схему модифікованого процесу Людчака –Етінгера (рис. 1).

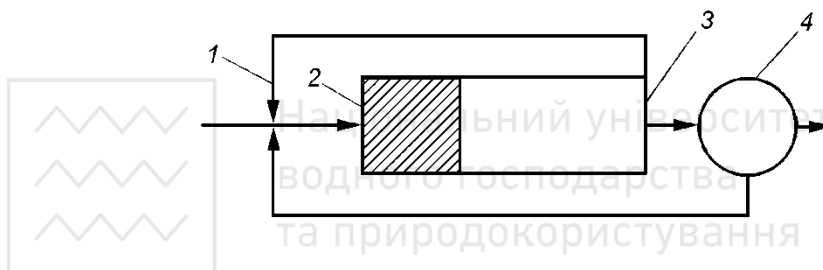


Рис. 1. Схема модифікованого процесу Людчака – Етінгера з попередньою денітрифікацією [1]:

1 – внутрішня рециркуляція; 2 – денітрифікатор; 3 – аеротенк-нітрифікатор; 4 – вторинний відстійник

Технологічна схема модифікованого процесу Людчака – Етінгера з попередньою денітрифікацією складається з послідовно розміщених аноксидної (денітрифікатор) і аеробної (аеротенк-нітрифікатор) зон та вторинного відстійника. Попереднє змішування рециркуляційного активного мулу із стічними водами в аноксидних умовах робить можливим використання органічних речовин стічних вод як субстрату при денітрифікації. Однак у рециркуляційному активному мулі міститься лише незначна частина від усього

нітрифікованого азоту, а значить ефективність денітрифікації буде невисокою. Для збільшення її ефективності влаштовують так звану внутрішню рециркуляцію, яка полягає в поверненні мулової суміші з кінця нітрифікатора на початок денітрифікатора. Однак достатня ефективність вилучення азоту із стічних вод при цьому може досягатися лише при досить високому ступеню внутрішньої рециркуляції, яка може становити навіть 200–400% і є причиною високих експлуатаційних витрат.

На користь застосування модифікованого процесу Людчака – Етінгера говорить ефективно і успішно його застосування протягом більш ніж 40 років на очисних спорудах Західної Європи. Крім цього, схема відносно проста і надійна в експлуатації.

Видалення сполук фосфору при застосуванні модифікованого процесу Людчака – Етінгера здійснюють шляхом їх хімічного осадження сульфатом дво- або тривалентного заліза чи сульфатом алюмінію. Відповідний реагент може вводитися в стічні води перед первинними відстійниками, перед або безпосередньо в аеротенки, перед аеротенками, у потік рециркуляційного активного мулу. Однак, реагентне осадження фосфатів призводить до збільшення приросту активного мулу і його зольності, що необхідно враховувати у розрахунках.

Таким чином, запропонована технологія реконструкції очисних споруд міста Чортків продуктивністю 7000 м<sup>3</sup>/добу передбачає встановлення нових решіток, ремонт існуючих горизонтальних піскоуловлювачів з круговим рухом рідини і двоярусних відстійників. Три існуючі біофільтри діаметром 18 м підлягають знесенню. Натомість мають бути збудовані аеротенки з попередньою нітрифікацією-денітрифікацією, розрахунок яких здійснювали за німецькими нормами ATV-131 [4]. Існуючі вторинні відстійники і контактні резервуари мають бути відремонтовані. Зброджування надлишкового активного мулу буде здійснюватися в двоярусних відстійниках, а його зневоднення – на відремонтованих мулових майданчиках [5].

**Метою роботи** є аналіз результатів практичного застосування нової для вітчизняних умов технології очистки міських стічних вод від органічних забруднень, а також сполук азоту і фосфору, що дозволить уточнити параметри і на основі їх аналізу підвищити ефективність застосування цієї технології для реконструкції діючих і проектування нових очисних споруд.

**Результати досліджень.** Фірма «Комфорт-Еко» приступила до

виконання будівельних робіт з модернізації очисних споруд міста Чортків у вересні 2018 року. Головною проблемою при цьому стали підготовчі роботи, а саме – знесення трьох існуючих біофільтрів діаметром 18 м кожен (рис. 2, 3).

Слід підкреслити, що при реконструкції очисних споруд міста Чортків застосовувалися як передові технології будівельного виробництва (рис. 4), так і сучасне обладнання (рис. 5).



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування



Рис. 2. Вивантаження і демонтаж дренажу біофільтра

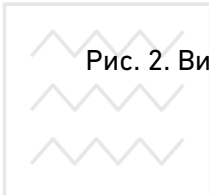


Рис. 3. Демонтаж стін біофільтра



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування



Рис. 4. Підготовка основи під комбіновані аеротенки



Рис. 5. Повітрорудна станція

Головним елементом реконструйованих очисних споруд є

комбіновані аеротенки, які влаштовуються на базі двох секцій чотирьохкоридорних аеротенків шириною коридору 4,5 м, глибиною 4,4 м і довжиною 30 м. Два перших по ходу рідини коридори аеротенків використовуються як денітрифікатори, два останні коридори обладнані системою аерації. У кожному денітрифікаторі встановлюються електромеханічні мішалки для перемішування мулової суміші. На початок денітрифікаторів подається рециркуляційний активний мул із вторинних відстійників, а також перекачується мулова суміш із кінця останнього коридору зони аерації, яка містить нітриту і нітрати. При відсутності аерації у денітрифікаторах має місце аноксидний режим, при якому відбувається процес денітрифікації – відновлення нітриту і нітратів з виділенням молекулярного азоту. В наступних аерованих коридорах аеротенків відбувається окислення органічних забруднень стічних вод і нітрифікація амонійного азоту. Для визначення концентрації розчиненого кисню в коридорах аеротенків встановлені спеціальні датчики. Подача повітря в аеровану зону аеротенків здійснюється за допомогою системи пневматичної аерації, до складу якої входять повітродувки, повітропроводи та трубчасті аератори Jager TD 63/2100 для дрібнобульбашкової аерації.

Запуск аеротенків у роботу (рис. 6) здійснювався за допомогою «затравкового» мулу із найближчих працюючих каналізаційних очисних споруд.



Рис. 6. Аеротенки очисних споруд міста Чортків

В міру збільшення дози мулу внаслідок його приросту ефективність біологічної очистки і роботи комплексу очисних споруд зростала (таблиця). За більшістю нормованих показників були досягнуті концентрації, які не перевищують ГДК.

Таблиця

Результати очистки стічних вод на очисних спорудах міста Чортків

Показники забруднень	Концентрації забруднень стічних вод				ГДК
	неочищених	очищених проб №			
		1	2	3	
pH	7,8–7,95	7,40	6,8	7,5	6,5–8,5
Завислі речовини, мг/дм <sup>3</sup>	182–196	13,0	5,0	5,4	15
ХПК, мг/дм <sup>3</sup>	589–740	78,3	42,1	53,5	80
БПК <sub>5</sub> , мг/дм <sup>3</sup>	372–477	14,4	19,0	14,2	15
Азот амонійний, мг/дм <sup>3</sup>	72–111,9	1,2	0,82	1,29	2,13
Нітрати, мг/дм <sup>3</sup>	3,1–12,8	2,5	35,0	14,1	40
Фосфати, мг/дм <sup>3</sup>	17,8–50,8	8,2	25,8	0,5	4,0

Середня ефективність очистки стічних вод, досягнута під час виконання пусконаладжувальних робіт, склала 95,8% – за завислими речовинами, 91,3% – за ХПК, 96,3% – за БПК<sub>5</sub>, 98,8 – азотом амонійним, 66,0% – за фосфатами.

На даному етапі відбуваються роботи зі зменшення в очищених стічних водах концентрацій фосфатів. Вирішення цього завдання передбачається здійснювати шляхом дозування на початок денітрифікатора розчину сульфату заліза (II). Залізо утворює із фосфатами слабозчинну сполуку, яка надалі асимілюється активним мулом і виводиться разом із його надлишком. Приготування розчину сульфату заліза здійснюється у розчинному та витратному баках, а його дозування – насосом дозатором.

**Висновки.** Застарілість технологічної схеми, конструктивні недоліки і зношеність є головними причинами незадовільної роботи каналізаційних очисних споруд міста Чортків. Окрім цього, очисні споруди не можуть забезпечити дотримання нових вимог до якості



очищених стічних вод за сполуками азоту і фосфору. Прийняте рішення здійснити реконструкцію очисних споруд, застосувавши технологічну схему з використанням комбінованих аеротенків із нітрифікацією-денітрифікацією і реагентною дефосфатацією стічних вод. Після закінчення робіт з реконструкції на очисних спорудах розпочаті пуско-налагоджувальні роботи. Отримані попередні результати, які підтверджують високу ефективність застосовуваної схеми Людчака – Етінгера. Середня ефективність очистки стічних вод, досягнута під час виконання пусконалагоджувальних робіт, склала 95,8% за завислими речовинами, 91,3% – за ХПК, 96,3% – за БПК<sub>5</sub>, 98,8% – азотом амонійним, 66,% – за фосфатами. Здійснюється аналіз технологічних показників роботи очисних споруд, відпрацювання особливостей реагентного видалення фосфатів зі стічних вод.

**1.** Ковальчук В. А. Очистка стічних вод : навч. посіб. Рівне : ВАТ «Рівненська друкарня», 2003. 622 с. **2.** ДБН В.2.5-75:2013. Каналізація. Зовнішні мережі і споруди. Основні положення проектування. Київ : Мінрегіон України. 2013. 128 с. **3.** Ковальчук В. А. Методичні вказівки до проведення практичних занять та виконання самостійної роботи з навчальної дисципліни «Сучасні технології вилучення сполук азоту та фосфору із стічних вод» для здобувачів вищої освіти другого магістерського рівня усіх освітньо-професійних програм спеціальностей НУВГП денної форми навчання. Рівне : НУВГП, 2019. 22 с. **4.** ATV-DVWK Standard A 131E. Dimensioning of Single-Stage Activated Sludge Plants. 2000. 57 p. **5.** S. Martynov, O. Kvarntenko, V. Kovalchuk, A. Orlova. Modern trends at natural and wastewater treatment plants reconstruction 2020. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. P. 012083. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/907/1/012083>. (дата звернення: 15.03.2022).

## REFERENCES:

**1.** Kovalchuk V. A. Ochyistka stichnykh vod : navch. posib. Rivne : VAT «Rivnenska drukarnia», 2003. 622 s. **2.** DBN V.2.5-75:2013. Kanalizatsiia. Zovnishni merezhi i sporudy. Osnovni polozhennia proektuvannia. Kyiv : Minrehion Ukrainy. 2013. 128 s. **3.** Kovalchuk V. A. Metodychni vkazivky do provedennia praktychnykh zaniat ta vykonannia samostiinoi roboty z navchalnoi dystsypliny «Suchasni tekhnolohii vyluchennia spoluk azotu ta fosforu iz stichnykh vod» dlia zdobuvachiv vyshchoi osvity druhoho mahisterskoho rivnia usikh osvitno-profesiinykh proqram spetsialnostei NUVHP dennoi formy navchannia. Rivne : NUVHP, 2019. 22 s. **4.** ATV-DVWK Standard A 131E. Dimensioning of Single-Stage Activated Sludge Plants. 2000. 57 p. **5.** S. Martynov, O. Kvarntenko, V. Kovalchuk, A. Orlova. Modern trends at

natural and wastewater treatment plants reconstruction 2020. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. P. 012083. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/907/1/012083>. (data zvernennia: 15.03.2022).

---

**Kovalchuk V. A., Doctor of Engineering, Professor** (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)



Національний університет  
водного господарства

## ТА MUNICIPAL WASTEWATER TREATMENT PLANT RECONSTRUCTION

**Chortkiv WWTP was carried out according to the technology developed in the 60s of the last century. The WWTP included gratings, sand traps, Imhoff settling tanks, biofilters, secondary settling tanks, contact tanks, sand and silt sites. WWTP did not provide the required degree of wastewater treatment, especially given the current requirements for the nutrients concentrations. In February 2017, the Rivne company "Comfort-Eco" in cooperation with NUWEE began to develop a project to modernize the Chortkiv WWTP with a capacity of 7000 m<sup>3</sup>/day. The project was based on a modified Ludczak – Ettinger process with preliminary denitrification to ensure the removal of nitrogen compounds. Removal of phosphates was supposed to be carried out with the use of chemical reagents. The calculation of biological WWTP was carried out according to German standards ATV-131. It was planned to make maximum use of existing facilities for wastewater treatment. The company "Comfort-Eco" began construction work on Chortkiv WWTP modernization in May 2018. The main problem was the preparatory work – namely the demolition of three existing biofilters. Two bioreactors with secondary settling tanks, an air blower station, and equipment installation were built. Currently, commissioning works are being completed at the Chortkiv WWTP. The quality indicators of treated wastewater for BOD<sub>5</sub> and ammonium nitrogen already meet the requirements, phosphates – close to the design.**

**Keywords:** municipal wastewater; municipal wastewater treatment plants; biological wastewater treatment; nitrification-denitrification; combined aeration tanks.

---

**Корчик Н. М., к.т.н., доцент, Беседюк В. Ю., аспірант, Шугайло В. А., студент групи РІ-31** (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, n.m.korchyk@nuwm.edu.ua)



## **ОЧИЩЕННЯ СТИЧНИХ ВОД ГОТЕЛЬНО-РЕСТОРАННИХ КОМПЛЕКСІВ**

та природокористування

Проаналізовано традиційні технології очищення стічних вод готельно-ресторанних комплексів та виявлено їх нездатність забезпечити достатню глибину очищення. Наведено результати експериментальних досліджень, які свідчать про недостатній ефект очищення традиційною технологією за показниками БСК<sub>5</sub> (96–67%) та концентрацією фосфатів (30–10%). Встановлено, що для підвищення глибини очищення необхідно забезпечувати оптимальні умови функціонування мікрофлори, що безпосередньо пов'язано з регулюванням показника окисно-відновного потенціалу середовища (Eh). Запропоновано технологію очищення, яка ґрунтується на комбінації фізико-хімічних (відстоювання, обробка реагентами) та біологічних (окислення мікрофлорою в анаеробних та аеробних умовах) методів, що передбачає забезпечення оптимальних умов функціонування мікрофлори на усіх етапах біологічного очищення. Отримані показники очищеної води: БСК<sub>5</sub> – 2,5 мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>, зважені речовини – 1,8 мг/дм<sup>3</sup>, азот амонійний – 0,28 мг/дм<sup>3</sup>, азот нітратів – 0,05 мг/дм<sup>3</sup>, фосфати – 0,15 мг/дм<sup>3</sup>, що відповідають кращому ефекту очищення та нормам гранично-допустимих концентрацій.

**Ключові слова:** стічні води; біологічне очищення; мікрофлора; умови; окисно-відновний показник.

**Вступ.** В основі технології очищення стічних вод, що належить до господарсько-побутових підприємств, зокрема готельно-ресторанного комплексу, є біологічне очищення з використанням активного мулу та біоплівки. Продуктивність активного мулу та біоплівки, що забезпечують деструктивні біохімічні процеси перетворення домішок стічних вод залежить від ряду параметрів, які можна згрупувати наступним чином:

- хімічний склад стічних вод;

- концентрація забруднень;
- умови проведення процесу [1].

Стічні води готельно-ресторанного комплексу можна охарактеризувати як складні системи, що включають домішки органічного та неорганічного, штучного та природного походження, зокрема ті, які важко окислюються або не окислюються (синтетичні барвники, ПАР тощо), які є біологічно активними речовинами (фосфати, нітрати) та токсичними для мікроорганізмів (зокрема хлориди).

За умов обмеження водних ресурсів, стічні води можна віднести до концентрованих. Для очищення стічних вод готельно-ресторанного комплексу найбільш застосовуваною є класична технологічна схема біологічного очищення, що включає первинне відстоювання, аеробне окиснення, вторинне відстоювання, ущільнення мулу та забезпечення умов його рециркуляції [2; 3].

Вищевказану систему очисних споруд рекомендовано до використання за невисоких концентрацій забруднень, оскільки вона не може забезпечити глибоке очищення стічних вод. За високих концентрацій рекомендована технологічна схема включає комбінацію методів аеробного та анаеробного окиснення. Цей спосіб не може забезпечити глибоке очищення стічної води, тому що не передбачає необхідне значення ступеня окиснення, який забезпечує зміни біоценозів. Для підвищення глибини очищення рекомендовані способи, що забезпечують оптимальні умови функціонування мікрофлори шляхом комбінації фізико-хімічних і біохімічних методів [1; 4].

Враховуючи, що мікроорганізми активного мулу (біоплівки) засвоюють енергію хімічної реакції, яка належить до окисно-відновлювальної, можна стверджувати, що забезпечення оптимальних умов її функціонування пов'язане з регулюванням наступних показників: рН, окисно-відновний потенціал (ОВП), температура [5].

Таким чином, дослідження способів регулювання редокс-стану в системах біологічного очищення стічних вод має важливе значення для напрямку складних біохімічних процесів та забезпечення оптимальних умов функціонування мікрофлори активного мулу (біоплівки).

**Об'єкт і методи дослідження.** Об'єктом дослідження є стічні води пансіонатів «Крим» та «Яремче», що включають готельно-ресторанний комплекс.

У дослідженнях застосовано стандартні методики визначення водневого показника (рН), окисно-відновного потенціалу (Еh), біологічного споживання кисню (БСК) та неорганічних фосфатів.

Показник рН визначали електрометричним методом, який ґрунтується на вимірюванні електрорушійної сили електрохімічного ланцюжка, що складається з скляного електрода та електрода порівняння, а також із проби води. Електрометричне визначення рН здійснювалось з використанням лабораторного рН-метру зі скляним електродом вимірювання та хлорсрібним електродом порівняння [6].

Показник Еh визначали потенціометричним методом, із застосуванням індикаторного платинового електрода в парі з хлорсрібним електродом порівняння [7].

Показник БСК визначали методом знаходження різниці між вмістом кисню до і після інкубації. Концентрація кисню визначається методом об'ємного йодометричного титрування. Дослідження проводять для розбавлених проб [8].

Концентрацію неорганічних фосфатів визначали фотометричним методом (відновлення аскорбіною кислотою), із застосуванням такої апаратури: колориметр фотоелектричний концентраційний КФК-2, червоний світлофільтр (довжина хвилі 690 нм), кювети товщиною шару 5 см [9].

**Результати досліджень.** В таблиці наведено приклад функціонуючої системи очисних споруд, що включає підсистеми первинного відстоювання та наступного біологічного очищення в аеробних умовах.

Встановлено, що показник Еh, який характеризує енергетику окисно-відновних реакцій, збільшується від +0,04 В (преаератор) до +0,152 В (аеротенки 1-го ступеня); показник, що характеризує окисно-відновлювальні властивості водного середовища  $rH_2$  збільшується у бік окислювального середовища та змінюється від 14,78 В (преаератор) до 21,78 (аеротенки 2-го ступеня). Водночас значення БСК<sub>5</sub> в преаераторі 1260 мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>. За умов, коли значення БСК<sub>5</sub> в преаераторі 1680 мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>, Еh змінюється від +0,09 В (преаератор) до +0,11 В (аеротенк 2-го ступеня),  $rH_2$  від 15,7 В до 19,8 В, кінцева концентрація БСК<sub>5</sub> 560 мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>.

Таким чином, можна зробити висновок, що ефект очищення в даному випадку недостатній та змінюється від 96% за значення БСК<sub>5</sub> в преаeratorі 1260 мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup> до 67% за значення БСК<sub>5</sub> в преаeratorі 1680 мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>. За концентрацією фосфатів ефект очищення зменшується на 20%. Зниженню ефекту очищення відповідають більш низькі значення показників (Eh, rH<sub>2</sub>), що характеризують енергетику окисно-відновлювальних реакцій та характер водного середовища.



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

Таблиця


Характеристика роботи очисних споруд

Доба відбору проби	№ з/п	Місце відбору проб	pH	Eh, В	БСК <sub>5</sub> , мгО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	Фосфати, мг/дм <sup>3</sup>
25.07.13 р.	1	Преаeratorи	6,7	+0,04	1260	30
	2	Первинний відстійник 1-ї лінії	6,8	+0,04	840	30
	3	Аеротенк I	8,2	+0,152	56	28,8
	4	Аеротенк II	8,3	+0,15	56	25,2
	5	Вторинний відстійник 2-ї лінії	7,5	+0,13	56	21
26.07.13 р.	1	Преаerator	6,3	+0,09	1680	35
	2	Первинний відстійник 1-ї лінії	6,5	+0,09	1064	35
	3	Аеротенк I	7,7	+0,09	578,9	33
	4	Аеротенк II	8,0	+0,11	554,9	32
	5	Вторинний відстійник 2-ї лінії	7,6	+0,09	560	31,5

Для збільшення ефекту очищення стічних вод пропонується технологія, яка ґрунтується на комбінації фізико-хімічних (відстоювання, обробка реагентами) та біологічних (окислення мікрофлорою в анаеробних та аеробних умовах) методів. Таке поєднання методів очищення стічних вод нівелює недоліки кожного

з окремих методів, що дозволяє ефективно проводити очищення, а також інтенсифікувати процеси біологічного перетворення домішок шляхом регулювання фізико-хімічних властивостей водного середовища, зокрема окисно-відновлювальних за показником Eh.

За запропонованою технологією було проведено дослідження з очищення стічних вод. Стічна вода у кількості 100 м<sup>3</sup>/добу має забруднення:

- 
- органічні речовини БСК<sub>5</sub> – 330 мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>;
  - азот амонійний – 40 мг/дм<sup>3</sup>;
  - фосфати – 20 мг/дм<sup>3</sup>.

Воду попередньо очищують від піску і плаваючих грубодисперсних домішок і подають на біологічне очищення в анаеробних умовах. В процесі життєдіяльності анаеробних гетеротрофних мікроорганізмів відбувається гідроліз органічних речовин з утворенням низькомолекулярних сполук, часткове відновлення окиснених форм азоту та часткове використання фосфатів, що призводить до зменшення значень показників рН та Eh [10]. За досягнення значень рН стічних вод 5–4,5, у стічну воду додають пероксид водню до Eh ≤ 0,2 В або залізовмісний коагулянт до Eh ≤ 0,1 В, для зменшення вмісту метану і сірководню, а також для того, щоб створювати несприятливі умови для життєдіяльності сульфат редукторів, мутагенної токсичності субстрату. Таким чином, створюють оптимальні умови функціонування мікрофлори в аеробних умовах, підвищують ефективність способу.

Далі вода подається на біологічне очищення в аеробних умовах (вміст кисню 4 мг/дм<sup>3</sup>) вільно плаваючою мікрофлорою, що забезпечує за більш високих концентрацій забруднень добру фізіологічну адаптацію мікроорганізмів. Після біологічного очищення в аеробних умовах вільно плаваючою мікрофлорою вода надходить на біологічне очищення в аеробних умовах (вміст кисню 2 мг/дм<sup>3</sup>) мікрофлорою закріпленою на інертному завантажувальному матеріалі. Імобілізація сприяє збільшенню активності мікроорганізмів, за більш низьких концентрацій забруднень. Таким чином покращують умови життєдіяльності мікроорганізмів в аеробних умовах.

Якісний показник очищеної води стабільний і, як правило, не перевищує за БСК<sub>5</sub> і зваженими речовинами 3–5 мг/дм<sup>3</sup>, за амонійним азотом – 0,4 мг/дм<sup>3</sup>, за азотом нітратів – 7 мг/дм<sup>3</sup>, за фосфатами – 0,5 мг/дм<sup>3</sup>.

Потім здійснюють відстоювання та розділення потоку очищеної води, частину з якого повертають на очищення мікрофлорою в анаеробних умовах, а іншу частину подають на доочищення мікрофлорою, закріпленою на інертному зважувальному матеріалі в аеробних умовах. В результаті створення оптимальних умов функціонування мікрофлори в аеробних умовах виключається необхідність великого повернення азоту в основний потік з циркуляційним мулом або з водою. Тому лише 10% (прототип не менше 50%) потоку очищеної води повертають на очищення мікрофлорою в анаеробних умовах, а 90% подають на доочищення мікрофлорою закріпленою на інертному зважувальному матеріалі. За рахунок її життєдіяльності, у збіднених субстратними складовими стічних водах здійснюють доочищення в межах гранично допустимих концентрацій. Показники очищеної води: БСК<sub>5</sub> – 2,5 мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>, зважені речовини – 1,8 мг/дм<sup>3</sup>, азот амонійний – 0,28 мг/дм<sup>3</sup>, азот нітратів – 0,05 мг/дм<sup>3</sup>, фосфати – 0,15 мг/дм<sup>3</sup>.


**Висновок.** Таким чином, шляхом регулювання окисно-відновного потенціалу стічних вод, забезпечуються оптимальні умови функціонування мікрофлори в аеробних умовах блоку біологічного очищення. Це дозволяє підвищити ефективність технології загалом, що кількісно виражається кращим ефектом очищення та досягненням значень основних показників вихідної води в межах допустимих концентрацій.

1. Яковлев С. В., Карюхина Т. А. Биохимические процессы в очистке сточных вод. М. : Стройиздат, 1980. 198 с. 2. Установка для глубокой биологической очистки сточных вод. № 2220918 RU, Cl, кл. С 02F 3/30, 2004. 3. Способ глубокой биологической очистки сточных вод и станция глубокой очистки сточных вод: пат. RU № 2225368 Cl, кл. С 02F 3/30, 2004. 4. Загорная Н. Б., Никоненко В. У., Чеховская Т. П., Гвоздяк П. И. Биоразрушение ксенобиотиков в сточных водах производства фенолформальдегидных смол. *Химия и технология воды*. 1987. № 4. Т. 9. С. 357–359. 5. Дмитренко Г. Н., Гвоздяк П. И. Альтернативные акцепторы электронов при окислении органических веществ микроорганизмами в очистке воды. *Химия и технология воды*. 1991. № 9. Т. 13. С. 857–861. 6. МВВ № 081/12-0317-06. Поверхневі, підземні та зворотні води. Методика виконання вимірювань водного показника (рН) електрометричним методом. 7. Вода питна. Нормативні документи: в 2-х т. Львів : НТЦ «Леонормстандарт», 2001. Т. 2. 234 с. 8. КНД 211.1.4.021-95. Методика визначення хімічного споживання кисню (ХСК) в поверхневих і стічних



водах. **9.** КНД 211.1.4.043-95. Методика фотометричного визначення фосфатів у стічних водах. **10.** Радченко О. С., Собчук Л. А. Микробная очистка СВ производства синтетических жирных кислот (СЖК) в анаэробных условиях. *Химия и технология воды*. 1994. № 3. Т. 16. С. 322–328.

## REFERENCES:


- 
- Национальний університет  
водоохорони та  
навколишнього середовища
- 1.** Yakovlev S. V., Karyuhina T. A. *Biohimicheskie protsessyi v ochistke stochnyih vod*. M. : Stroyizdat, 1980. 198 s.
  - 2.** Ustanovka dlya glubokoy biologicheskoy ochistki stochnyih vod. № 2220918 RU, CI, kl. C 02F 3/30, 2004.
  - 3.** Sposob glubokoy biologicheskoy ochistki stochnyih vod i stantsiya glubokoy ochistki stochnyih vod: pat. RU №2225368 SI, kl. S 02F 3/30, 2004.
  - 4.** Zagornaya N. B., Nikonenko V. U., Chehovskaya T. P., Gvozdyak P. I. Biorazrushenie ksenobiotikov v stochnyih vodah proizvodstva fenolformaldegidnyih smol. *Himiya i tehnologiya vodyi*. 1987. № 4. Т. 9. S. 357–359.
  - 5.** Dmitrenko G. N., Gvozdyak P. I. Alternativnyie aktseptoryi elektronov pri okislenii organicheskikh veschestv mikroorganizmami v ochistke vodyi. *Himiya i tehnologiya vodyi*. 1991. № 9. Т. 13. S. 857–861.
  - 6.** MVV № 081/12-0317-06. Poverkhnevi, pidzemni ta zvorotni vody. Metodyka vykonannya vymiriuvan vodnevoho pokaznyka (rN) elektrometrychnym metodom.
  - 7.** Voda pytna. Normatyvni dokumenty : v 2-kh t. Lviv : NTTs "Leonormstandart", 2001. Т. 2 234 s.
  - 8.** КНД 211.1.4.021-95. Metodyka vyznachennia khimichnoho spozhyvannia kysniu (KhSK) v poverkhnevyykh i stichnykh vodakh.
  - 9.** КНД 211.1.4.043-95. Metodyka fotometrychnoho vyznachennia fosfativ u stichnykh vodakh.
  - 10.** Radchenko O. S., Sobchuk L. A. Mikrobnaya ochistka SV proizvodstva sinteticheskikh jirnyih kislot (SJK) v anaerobnyih usloviyah. *Himiya i tehnologiya vodyi*. 1994. № 3. Т. 16. S. 322–328.

---

**Korchyk N. M., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor,**  
**Besediuk V. Y., Post-graduate Student, Shuhailo V. A., Senior Student**  
(National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

## WASTEWATER TREATMENT OF THE HOTEL-RESTAURANT COMPLEXES

**Wastewater of the hotel-restaurant complex can be described as a complex system that includes organic and inorganic impurities with artificial and natural origin. For the treatment of such effluents, the traditional technology is a combination of mechanical and biological treatment blocks, which is effective only for low contaminants**



concentrations and can't provide deep wastewater treatment. A related issue is the regulation of the redox state in the biological treatment block, which is important for the direction of biochemical processes and ensuring optimal conditions for the functioning of activated sludge (biofilm) microflora. Research results on wastewater treatment by traditional technology of real sanatorium hotel-restaurant complexes «Crimea» and «Yaremche» are presented. The treatment effect in this case is insufficient and varies from 96% for the value of  $BOD_5$  in the pre-aerator  $1260 \text{ mgO}_2 / \text{dm}^3$  to 67% for the value of  $BOD_5$  in the pre-aerator  $1680 \text{ mgO}_2 / \text{dm}^3$ . According to the concentration of phosphates, the treatment effect reduced by 20%. The decrease in the treatment effect corresponds to lower values of parameters ( $E_h$ ,  $rH_2$ ), which characterize the energy of redox reactions. To increase the effect of wastewater treatment, the technology based on a combination of physic-chemical and biological methods is proposed. The technology involves the following stages: mechanical treatment of coarsely dispersed impurities; biological treatment under anaerobic conditions with the addition of hydrogen peroxide or iron-containing coagulant (provides optimal conditions for further treatment by aerobics); biological treatment under aerobic conditions (provides good physiological adaptation and activity of microorganisms depending on the reduction of the contaminants concentration); sedimentation and separation of the stream for the final additional biological treatment. Utilisation of this treatment technology allows to obtain water with parameters within the permissible concentrations:  $BOD_5$  –  $2,5 \text{ mgO}_2 / \text{dm}^3$ , suspended solids –  $1,8 \text{ mg} / \text{dm}^3$ , ammonium nitrogen –  $0,28 \text{ mg} / \text{dm}^3$ , nitrate nitrogen –  $0,05 \text{ mg} / \text{dm}^3$ , phosphates –  $0,15 \text{ mg} / \text{dm}^3$ . The results of research indicate that the application of the proposed technology and regulation of the wastewater redox potential provides increased efficiency of hotel-restaurant complexes wastewater treatment.

**Keywords:** wastewater; biological treatment; microflora; conditions; redox index.

---

**Олійник Т. П., к.т.н., доцент, Маковецька О. О., асистент, Кириленко Г. А., асистент** (Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса), **Клімов С. В., к.т.н. доцент** (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, s.v.klimov@nuwm.edu.ua)



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

## **ЗАСТОСУВАННЯ ЗВОРотноОСМОТИЧНИХ МЕМБРАН ДЛЯ ДООЧИЩЕННЯ ВОДОПРОВІДНОЇ ВОДИ**

Наведено аналіз стану природних водойм України як джерел питного водопостачання. Показано, що якість їх води не відповідає вимогам нормативних документів у більшості областей. Високий рівень антропогенного забруднення природних джерел не забезпечує очищення води до сучасних стандартів при використанні традиційних схем та прийнятих технологій водопідготовки. Проаналізовано сучасні проблеми забезпечення південно-західного регіону Одещини якісною питною водою. Відзначено, що реагентне знезараження води хлорагентами є основним джерелом утворення токсичних хлорорганічних сполук (тригалометани, чотирихлористий вуглець тощо) у питній воді. При цьому кількісний вміст легколетких галогенпохідних сполук, що утворилися, має тенденцію до зростання.

Сучасні високоефективні технології доочищення води з використанням мембранних фільтрів є надійним бар'єром від цих домішок. У роботі розглянуто актуальне науково-практичне завдання щодо обґрунтування впровадження зворотньоосмотичних локальних водоочисних пристроїв для доочищення питної води. Проведено порівняльний аналіз складу водопровідної води та доочищеної води після двох типів побутових установок із зворотньоосмотичними мембранами. Встановлено, що обидва фільтри ефективно очищають водопровідну воду від хлору, органічних речовин та мінеральних домішок.

Зроблено висновок, що якість води, одержаної із застосуванням мембранних технологій, відповідає вимогам для питної води за компонентами, що утворилися у воді після традиційної схеми водопідготовки. Отримані результати досліджень свідчать, що впровадження сучасних

**ресурсозберігаючих технологій для доочищення питної води дозволить вирішити задачу кондиціювання водопровідної води.**

**Ключові слова:** антропогенне забруднення; очищення; доочищення; зворотноосмотична установка; мембрана; селективність; якість води.

**Постановка проблеми.** З огляду на антропогенне забруднення природних водойм України якість їх вод не відповідає нормативам для джерел водопостачання. Основні причини забруднення поверхневих вод – це надходження безпосередньо у водні об'єкти або через міську каналізацію забруднених комунальних, промислових стічних вод та стоків із сільськогосподарських угідь. За таких умов традиційні схеми очисних споруд та прийняті технології водопідготовки не здатні очистити воду до сучасних стандартів [1].

Вся без винятку південна частина Одеської області страждає від нестачі чистої питної води [2]. Сьогодні очевидно, що однією з головних економічних проблем південно-західного регіону Одещини є забезпечення населення якісною питною водою. Регіональна програма «Питна вода Одеської області на 2010–2013 та на період до 2020 року» була спрямована на вирішення існуючих проблем щодо забезпечення населених пунктів області якісним водопостачанням. Цілі Програми – покращення забезпечення населення регіону питною водою нормативної якості, реформування та розвиток водопровідно-каналізаційного господарства, підвищення ефективності його роботи та надійності функціонування. Один із напрямків Програми – проведення досліджень з розробки новітніх технологій обробки водопровідної води та застосування локальних установок з доочищення питної води [3].

**Актуальність теми.** У роботі розглянуто науково-практичне завдання щодо обґрунтування використання сучасних локальних водоочисних пристроїв для кондиціювання питної вод.

Наразі 30–40% досліджених проб одеської питної води за бактеріологічними показниками не відповідають нормативам. Збудники інфекційних захворювань виділено у 0,9% проб. Вірусологічними дослідженнями встановлено наявність у питній воді вірусів гепатиту А, рота- та ентеровірусів. Проблемою є вторинне зараження води, що вже пройшла очищення. Це відбувається через зношену водопровідну мережу міста. Іржаві труби, окисні процеси,

синьо-зелені водорості, постійні пориви трубопроводів – все це призводить до потрапляння забруднюючих речовин у питну воду.

Для знезараження води з р. Дністер, яка є основним джерелом водопостачання для м. Одеса, використовується газоподібний хлор та гіпохлорит натрію ( $\text{NaClO}$ ). Внаслідок хлорування води утворюються хлорорганічні сполуки, тобто канцерогени, леткі вуглеводневі сполуки групи тригалогенметанів (хлороформ, хлордибромметан та ін.). Залишковий хлор поглинається трубами з полівінілхлориду, твердого і м'якого поліетилену, і потім здатний тривалий час (від 2 до 50 діб) десорбуватися в питну воду, підвищуючи в ній вміст розчиненого хлору. Сьогодні надмірне хлорування – це головна проблема одеської води. Саме із постійним споживанням хлорованої води лікарі пов'язують зростання кількості онкологічних захворювань в Одесі. Ризик ураження раком серед споживачів хлорованої води на 93% вище тих, що споживають нехлоровану воду [4].

У науковій літературі наведена інформація про перетворення гумінових (ГК) та фульвокислот (ФК) при обробці природних вод хлоровмісними агентами. Ідентифіковано 2,3,5 хлорпохідні, у тому числі тригалогенметани (ТГМ), що утворюються при обробці гумусовмісних природних вод активним хлором. Багато з цих інгредієнтів мають канцерогенну активність, а також імунотоксичність. Зокрема, доведено здатність хлороформу (ТГМ) до акумуляції живими організмами. Вплив хлороформу на нервову систему загальновідомий, тому розробка ефективних заходів щодо зниження рівня забруднення питної води летючими галогенорганічними сполуками висувається до ряду найважливіших і невідкладних завдань [5].

Погіршує становище з якістю одеської питної води наявність у ній хлоростійких штамів хвороботворних бактерій навіть після очищення води. У водопровідній воді є умовно патогенна синьогнійна паличка (*Pseudomonas aeruginosa*), виявлення якої є критерієм санітарно-епідеміологічного неблагополуччя [6].

Таким чином, враховуючи кількість нових забруднень, викликаних діяльністю людини, не можна гарантувати, що населення буде забезпечено якісною та безпечною для здоров'я питною водою навіть після проведення заходів з водопідготовки.

Існують різноманітні прийоми обробки води, у тому числі централізованого водопостачання, які дозволяють покращити її

якість та довести до норм, що висувуються до питної води. При виборі того чи іншого методу, споруди або установки з очищення води, необхідно в кожному конкретному випадку враховувати склад вхідної води, задані параметри очищення, кількість води, що очищається, вартість, експлуатаційні витрати та інші обставини [7].

В останні роки в області обробки природних вод широко застосовуються мембранні процеси, оскільки вони мають високі показники видалення забруднюючих речовин і ряд інших переваг. Нанofільтраційні технології, що використовують баромембранні процеси, дозволяють отримати питну воду заданої якості з мінімальними експлуатаційними витратами. Постійне вдосконалення техніки виготовлення мембран та обладнання сприяють поширенню цього методу [8].

Зворотньоосмотичні (Reverse osmosis, RO) мембрани є високоселективними для найрізноманітніших видів домішок. Мембрани затримують бактерії та віруси, більшу частину розчинених солей та органічних речовин, пропускаючи лише молекули води, невеликі органічні сполуки та легкі мінеральні солі. У середньому RO мембрани затримують 97–99% розчинених речовин. Системи зворотного осмосу мають цілу низку переваг. Вони здатні працювати 24 години на добу, зручні в експлуатації, вимагають значно менше витратних матеріалів (інгібітори, миючі розчини), мають неагресивні скидні води. До недоліків відносять необхідність якісної попередньої підготовки води перед мембранами [9].

Мембранні установки набули широкого поширення в побуті при доочищенні водопровідної води. Це стало можливим завдяки науковим та технологічним досягненням: мембранні апарати стали дешевшими, зросла їх питома продуктивність, знизився робочий тиск, високий ступінь очищення питної води від домішок.

Однак оскільки RO мембрани характеризуються високим рівнем селективності за всіма іонами, доочищена вода може не відповідати рекомендаціям ДСанПін 2.2.4.-171-10 за показниками фізіологічної придатності питної води. Низький рівень мінералізації несприятливо впливає на здоров'я людини. Відсутність у воді мінеральних солей призводить до зниження осмотичного тиску у клітинах. Кальцій та інші іони є найважливішими елементами питної води [10].

**Мета дослідження.** З оцінки якості доочищеної питної води (пермеату, permeate) визначити ефективність мембранних методів для доочищення питної води.

**Об'єкт дослідження:** зворотноосмотичні апарати на основі мембран марки Осмос Е і Leader R0-6.

**Предмет дослідження:** хімічний склад і показники якості питної та доочищеної води.

**Методи дослідження.** В дослідженнях використані фізико-хімічні методи, передбачені відповідними нормативними документами. Головні іони (хлориди, кальцій, магній, гідрокарбонати), загальну жорсткість і перманганатну окиснюваність визначали титриметричним методом; сульфати – ваговим методом; мінералізацію розраховували як суму головних іонів; натрій – розрахунковим методом. Обробка результатів проводилася за стандартними методиками [11; 12].

**Результати досліджень і обговорення.** В роботі досліджено якість водопровідної води та зразків водопровідної води, що доочищена на побутових фільтрах зворотноосмотичними системами очищення води Осмос Е (проба № 1) і Leader R0-6 (проба № 2).

Аналіз вхідної питної води за головними іонами, наведений на рис. 1, показав, що фізико-хімічні показники не перевищує допустимих норм для питної води централізованого водопостачання за ДСанПіН 2.2.4-171-10. Однак, за органолептичними показниками відзначено перевищення нормативу по запаху в 1,5 рази. У воді відчувається запах хлору – 3 бали. Вміст залишкового вільного хлору у воді – 0,82 мг/дм<sup>3</sup> при максимальній нормі 0,5 мг/дм<sup>3</sup> [12]. Загальна жорсткість водопровідної води становить 5,25 мг-екв/дм<sup>3</sup>, що відповідає воді середньої жорсткості. Перманганатна окиснюваність 4,8 мгО/дм<sup>3</sup>, наближається до межі норми 5 мгО/дм<sup>3</sup>.

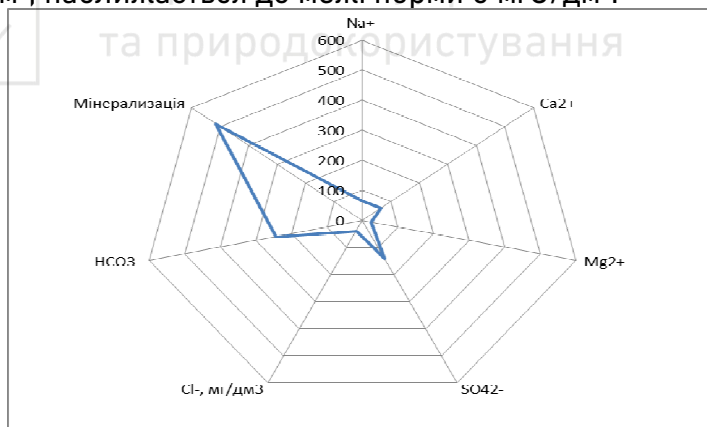


Рис. 1. Склад вхідної питної води

Доочищення води на мембранних установках включає обов'язкову попередню підготовку води, фільтрування через

зворотноосмотичну мембрану, кондиціювання води.

Проба № 1. Система очищення води Осмос Е має 5 стадій очищення води, що відповідає світовим стандартам для зворотноосмотичних систем. Головний елемент системи очищення води Осмос Е – це мембранний елемент FILMTEC (США), який гарантує фільтрацію 99,8% усіх домішок, включаючи бактерії та віруси. Стадії очищення: передфільтр 1 – пористий поліпропіленовий картридж, видаляє механічні домішки пісок, іржу, мул, зважені частинки та ін.; передфільтри 2, 3 – картриджі з активованого вугілля у гранулах та брикетах (Calgon Carbon Corporation, США) захищають мембрану від окислювача; затримують, хлор та хлорорганічні сполуки, механічні частинки розміром більше 1 мкм, органічні домішки; мембрана зворотного осмосу FILMTEC 50GPD (виробництво Dow Chemical, США); посткарбон (AIC 10) – картридж із високоякісного активованого вугілля та шкарлупи кокосового горіха покращує органолептичні властивості води. Продуктивність до 190 л/добу. Оптимальний робочий тиск – 2,8–6 атм. (2,75–5,8 бар).

Проба № 2. Система очищення води Leader RO-6: 6-ступінчаста система глибокого очищення складається з фільтра механічного очищення з розміром пор 5 мікрон; фільтра з активованим гранульованим та пресованим вугіллям; картриджа механічної очистки з розміром пор 1 мікрон; зворотноосмотичної мембрани 75GPD; вугільного постфільтра; фільтра-мінералізатора. Швидкість очищення води – до 284 л/добу. Оптимальний робочий тиск – 2,55–6,1 атм. (2,5–6 бар).

У табл. 1 та на рис. 2 наведено результати дослідження хімічного складу води доочищеної на зворотноосмотичних апаратах Осмос Е та Leader RO-6.

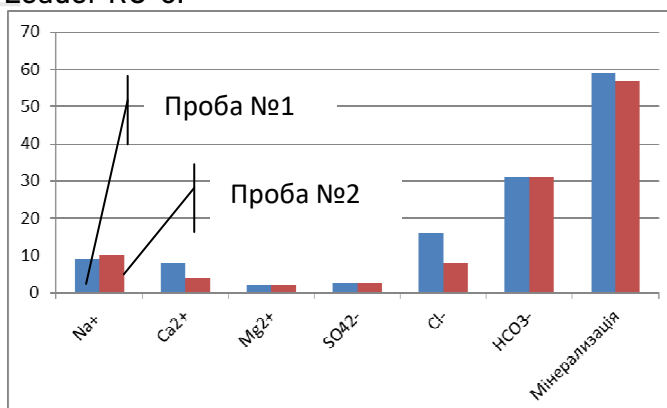


Рис. 2. Склад пермеатів за основними іонами для зразків проб № 1, 2 (мг/дм<sup>3</sup>)



Порівняння хімічного складу зразків пермеатів показує, що в результаті очищення води рН змінилося незначно на 4% від 7,5 до 7,1–7,2. За рештою показників спостерігається високий ефект доочищення. Вихідна величина загальної жорсткості (5,65 ммоль/дм<sup>3</sup>) після очищення склала 0,35–0,6 ммоль/дм<sup>3</sup>, що знаходиться на межі фізіологічно допустимого значення (0,5 ммоль/дм<sup>3</sup>). Очищена вода характеризується також значним зниженням окиснюваності з 4,8 до 0,2–0,5 мгО/дм<sup>3</sup>, кольоровості, запаху. Завислі речовини у пермеаті не виявлені. Залишковий хлор після очищення був відсутній в обох зразках.

Таблиця

Склад пермеатів

Показник	Проба № 1	Проба № 2	ДСанПін 2.2.4.-171-10
рН	7,1	7,2	6,5–8,5
Забарвленість (град)	<10	<10	20(35*)
Запах при t 20 °С (балл)	1	1	2
Перманганатна окиснюваність, мгО/дм <sup>3</sup>	0,2	0,5	5
Жорсткість, ммоль/дм <sup>3</sup>			
- загальна	0,6	0,35	7 (10*)
- карбонатна	0,5	0,5	-
- некарбонатна	0,1	0	-
Залишковий хлор, мг/дм <sup>3</sup>	0	0	0,3–0,5

\* - Максимальний рівень застосовується в окремих випадках, що пов'язані з особливими природними умовами та технологією підготовки питної води.

Показники селективності мембран за основними іонами наведені на рис. 3.

Аналіз результатів показує, що селективність мембран показника мінералізація становить 86–89%; для головних іонів – 85–96%; для органічних речовин з перманганатної окиснюваності – 90–95%. Найменша селективність для хлорид-іонів (40%) для зразка 2 після фільтра.

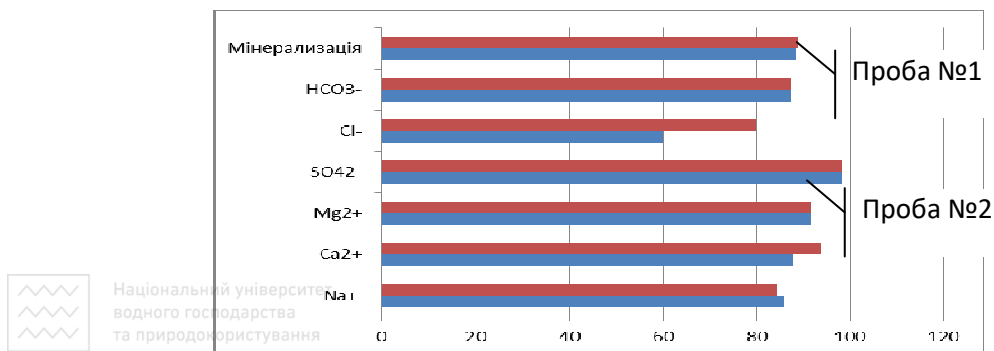


Рис. 3. Селективність (%) мембран за основними іонами

**Висновки.** При існуючому рівні забруднення природних вод України споруди водопідготовки, на яких використовуються традиційні методи та процеси очищення, не завжди можуть забезпечити необхідний ступінь очищення води.

Розглянуто перспективний метод доочищення питної води та використанням локальних зворотньоосмотичних установок. Аналіз складу доочищеної водопровідної води після зворотньоосмотичних мембран за досліджуваними хімічними показниками дозволяє зробити попередній висновок про те, що якість очищеної води відповідає нормам ДСанПін 2.2.4.-171-10. Оцінка ефективності доочищення показує, що обидва фільтри ефективно очищують водопровідну воду від хлору та органічних речовин.

Метод нанофільтрації можна рекомендувати для доочищення питної води. Метод універсальний і ефективніший проти традиційних методів доочистки.

1. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2020 році. URL: <https://mepg.gov.ua/news/38840.html> (дата звернення: 14.03.2022). 2. Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Одеській області у 2020 році. URL: <https://mepg.gov.ua/news/38741.html> (дата звернення: 09.03.2022). 3. Про стан виконання регіональної програми «Питна вода Одеської області на 2010-2013 роки і період до 2020 року». URL: <https://oblrada.od.gov.ua/blog/pro-stan-vykonannya-regionalnoyi-programy-pytna-voda-odeskoyi-oblasti-na-2010-2013-roky-i-period-do-2020-roku/> (дата звернення: 10.03.2022). 4. Макотрина Л. В., Зверькова А. С. Влияние обеззараживания питьевой воды хлором на здоровье человека. *Известия*

вузов. *Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. 2011. № 1 (1). С. 87–94. **5.** Мокиенко А. В., Петренко Н. Ф., Гоженко А. И. Обеззараживание воды. Гигиенические и медико-экологические аспекты. *Хлор и его соединения*. Одесса : ТЭС, 2011. Т. 1. 484 с. Илл.: ISBN 978-966-2389-30-2. **6.** Можно ли пить одесскую питьевую воду? URL: <https://pivdenukraine.com.ua/2019/06/01/mozhno-li-pit-odesskuyu-pitevuyu-vodu/> (дата звернення: 10.03.2022). **7.** Очищення води з природних джерел водопостачання реагентно-баромембранним методом / Шкавро З., Кочкодан В., Бардарска Г., Добрев Х. *Хімічні науки і технології : наукові записки*. Київ : НаУКМА, 2009. Т. 92. С. 28–31. **8.** Гулієнко С. В. Моделювання процесів мембранного розділення : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. 166 с. **9.** Гончарук В. В., Кавицкая А. А., Скильская М. Д. Наночільтрація в питъевом водоснабженіи. *Химия и технология воды*. 2011. № 1. Т. 33. С. 63–94. **10.** Збалансованність мінерального складу питних вод як чинник впливу на здоров'я населення міських агломерацій північно – західного Причорномор'я / Сафранов Т. А., Грабко Н. В., Поліщук А. А., Трохименко Г. Г. *Вісн. Одес. держ. екол. Унів.* 2016. № 20. С. 5–17. **11.** ДСТУ 7525:2014. Вода питна. Вимоги та методи контролювання якості. Київ : Мінекономрозвитку України, 2014. 20 с. **12.** ДСанПіН 2.2.4.-171-10. Гігієнічні вимоги до води питної для споживання людиною. Київ : МОЗ України, 2010. Із змінами, згідно з Наказом МОН України № 341 від 18.02.2022. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0452-10#Text> (дата звернення: 15.03.2022).

## REFERENCES:

**1.** Natsionalna dopovid pro stan navkolyshnoho pryrodnoho seredovyshcha v Ukrainy u 2020 rotsi. URL: <https://mepr.gov.ua/news/38840.html> (data zvernennia: 14.03.2022). **2.** Rehionalna dopovid pro stan navkolyshnoho pryrodnoho seredovyshcha v Odeskii oblasti u 2020 rotsi. URL: <https://mepr.gov.ua/news/38741.html> (data zvernennia: 09.03.2022). **3.** Pro stan vykonannia rehionalnoi prohramy «Pytna voda Odeskoi oblasti na 2010-2013 roky i period do 2020 roku». URL: <https://oblrada.od.gov.ua/blog/pro-stan-vykonannya-regionalnoyi-programy-pytna-voda-odeskoyi-oblasti-na-2010-2013-roky-i-period-do-2020-roku/> (data zvernennia: 10.03.2022). **4.** Makotrina L. V., Zverkova A. S. Vliyanie obezzarajvaniya pitevoy vodyi hlorom na zdorove cheloveka. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitelstvo. Nedvijimost*. 2011. № 1 (1). С. 87–94. **5.** Mokienko A. V., Petrenko N. F., Gojenko A. I. Obezzarajvanie vodyi. Gigenicheskie i mediko-ekologicheskie aspektyi. T. 1. *Hlor i ego soedineniya*. Odessa : TES, 2011. 484 s. Ill.: ISBN 978-966-2389-30-2. **6.** Mojno li pit odeskuyu pitevuyu vodu? URL: <https://pivdenukraine.com.ua/2019/06/01/mozhno-li-pit-odesskuyu-pitevuyu-vodu/>

pitevuyu-vodu/ (data zvernennia: 10.03.2022). **7.** Ochyshchennia vody z pryrodnykh dzherel vodopostachannia reahentno-baromembrannym metodom / Shkavro Z., Kochkodan V., Bardarska H., Dobrev Kh. *Khimichni nauky i tekhnologii* : naukovi zapysky. Kyiv : NaUKMA, 2009. T. 92. S. 28–31. **8.** Huliienko S. V. Modeliuvannia protsesiv membrannoho rozdilennia : navch. posib. Kyiv : KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2017. 166 s. **9.** Goncharuk V. V., Kavitskaya A. A., Skilskaya M. D. Nanofiltratsiya v pitevom vodosnabhenii. *Himiya i tehnologiya vodyi*. 2011. № 1. T. 33. S. 63–94. **10.** Zbalansovannist mineralnogo skladu pytnykh vod yak chynnyk vplyvu na zdorovia naselennia miskykh ahlomeratsii pivnichno – zakhidnoho Prychornomoria / Safranov T. A., Hrabko N. V., Polishchuk A. A., Trokhymenko H. H. *Visn. Odes. Derzh. Ekol. Univ.* 2016. № 20. S. 5–17. **11.** DSTU 7525:2014. Voda pytna. Vymohy ta metody kontroliuvannia yakosti. Kyiv : Minekonomrozvytku Ukrainy, 2014. 20 s. **12.** DSanPiN 2.2.4.-171-10. Hihienichni vymohy do vody pytnoi dlia spozhyvannia liudynoiu. Kyiv : MOZ Ukrainy, 2010. Iz zminamy, zghidno Nakazom MON Ukrainy № 341 vid 18.02.2022. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0452-10#Text> (data zvernennia: 10.03.2022).

---

**Oliinyk T. P., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor, Makovetska O. O., Assistant, Kyrylenko H. A., Assistant** (Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa), **Klimov S. V., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor** (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, s.v.klimov@nuwm.edu.ua)

## APPLICATION OF REVERSE OSMOSIS MEMBRANES FOR TAP WATER PURIFICATION

The analysis of the state of natural reservoirs of Ukraine as sources of drinking water supply is given. It is shown that the quality of their waters does not meet the requirements of regulatory documents in most areas. A high level of anthropogenic pollution of natural sources does not provide water purification up to modern standards when using traditional schemes and accepted water treatment technologies. The modern problems of providing the southwestern region of the Odessa region with high-quality drinking water are analyzed. It is noted that reagent disinfection of water with chlorine agents is the main source of formation of toxic organochlorine

compounds (trihalomethanes, carbon tetrachloride, etc.) in drinking water. At the same time, the quantitative content of the formed volatile halogen derivatives tends to increase.

Modern highly efficient technologies for water purification using membrane filters are a reliable barrier to these impurities. The paper considers an urgent scientific and practical task to justify the introduction of reverse osmosis local water treatment devices for the post-treatment of drinking water. A comparative analysis of the composition of tap water and additionally purified water after two types of domestic installations with reverse osmosis membranes was carried out. It has been established that both filters effectively purify tap water from chlorine, organic substances and mineral impurities.

It is concluded that the quality of water obtained using membrane technologies meets the requirements for drinking water in terms of the components that were formed in the water after the traditional water treatment scheme. The obtained research results indicate that the introduction of modern resource-saving technologies for post-treatment of drinking water will solve the problem of conditioning tap water.

**Keywords:** anthropogenic pollution; purification; post-treatment; reverse osmosis unit; membrane; selectivity; water quality.



---

Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

**Филипчук Л. В., к.т.н., доцент** (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)


## АВТОМАТИЗАЦІЯ СИСТЕМ ВОДОПІДГОТОВКИ В ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЦІ



Обґрунтовано необхідність автоматизації систем підготовки води для котельних установок, що дозволяє отримати високу якість очищення води, зменшити кількість реагентів та вторинне забруднення води аніонами. Запропонована автоматизація процесу регенерації іонообмінних та пінополістирольних фільтрів при очищенні води від заліза та солей жорсткості. Для попередження вторинного забруднення води рекомендуються електрохімічні методи очищення води, зокрема електрокоагуляція та електрохімічне регулювання рН в діафрагмовому електролізері. Регулювання параметрами очищення відбувається автоматично за рахунок зміни величини постійного електричного струму в залежності від параметрів води. Для забезпечення точності у регулюванні рН та уникнення передозування реагентів рекомендується система автоматичного регулювання рН з нечітким регулятором. Результати моделювання показали, що при використанні САР з нечітким регулятором час регулювання зменшився вдвічі у порівнянні з САР із використанням ПІД-регулятора.

**Ключові слова:** системи підготовки води; котельні установки; пом'якшення та знезалізнення; електрохімічне регулювання рН; нечіткі регулятори.

**Вступ.** Якісна підготовка води для котельних установок має суттєве значення для надійної і ефективної роботи систем теплозабезпечення соціальної інфраструктури. Насамперед це стосується споруд для пом'якшення і знезалізнення води. Вода, яка подається для підживлення водяних котлів, повинна мати загальну жорсткість не більше 0,1–0,7 мг-екв/л, а парових – не більше 0,01–0,04 мг-екв/л, заліза – не більше 0,1–0,3 мг/л. Обмежується також наявність зависі, мінералізації води та вміст аніонів (сульфатів, хлоридів, нітратів, кремнію тощо) [1; 2]. Перевищення встановлених концентрацій може викликати утворення осаду у трубопроводах,



відкладення солей жорсткості на внутрішніх поверхнях обладнання, призводить до корозії обладнання, підвищення теплових втрат на підігрів води. Зазначені процеси відбуваються внаслідок передозування хімічних реагентів, недотримання оптимальних параметрів очищення води, зокрема активної реакції рН, недосконаліми системами регенерації фільтрів. Тому застосування систем автоматизації у процесах підготовки води має суттєве значення для забезпечення якості підготовки води та підвищення її ефективності.

**Мета роботи** полягає в аналізі існуючого стану підготовки води для котельних установок та визначення напрямків її покращення.

**Існуючий стан проблеми та напрямки її вирішення.** Найбільш розповсюдженим методом зниження загальної жорсткості води є іонообмінний метод [2]. Для цього застосовують одно- або двоступеневе Na-катіонування води. Одноступеневе Na-катіонування води дозволяє отримати воду із залишковою жорсткістю до 0,1 мг-екв/л. Однак для отримання глибоко пом'якшеної води (із залишковою жорсткістю 0,01–0,02 мг-екв/л) потрібно значно збільшувати питому витрату кухонної солі на регенерацію іонообмінних фільтрів, при цьому необхідно вести старанний контроль за «проскакуванням» іонів жорсткості. У схемі двоступеневого Na-катіонування води надійно забезпечується залишкова жорсткість менше 0,01 мг-екв/л.

При необхідності регулювання лужності води та зниження її солевмісту використовують послідовне або паралельне H- та Na-катіонування. Найбільш широке розповсюдження знайшла схема H-катіонування з «голодною» регенерацією фільтрів та наступним Na-катіонуванням. Така схема дозволяє отримати жорсткість фільтрату до 0,1 мг-екв/л та забезпечити глибоке зниження лужності (до 0,3–0,4 мг-екв/л).

Енергозбереження під час підготовки води для котельних установок досягається за рахунок зниження витрат реагентів шляхом впровадження систем автоматизованої регенерації іонообмінних фільтрів, яка пропонується західними фірмами. Автоматизація процесу регенерації відбувається за допомогою програматорів, які можуть управляти цим процесом в залежності від об'єму профільтрованої води або тривалості фільтроциклу. Перевагою такої системи є автономність регенерації, яка відбувається без втручання обслуговуючого персоналу у процес

переключання режиму фільтрування на режим регенерації (та навпаки), а тільки готує регенераційний розчин реагентів необхідної концентрації.

Недоліком такого автоматизованого процесу регенерації є те, що відмивка іонообмінного матеріалу фільтрів після регенерації відбувається вихідною (непом'якшеною) водою, а не пом'якшеною водою, як це вимагають національні нормативні документи. Це знижує загальну іонообмінну здатність іонітів, вважаючи на те, що об'єм відмивочної води може досягати до 10–20% від загального об'єму профільтрованої води.

Тому більш доцільним є застосування автоматизованих систем регенерації, які дозволяють проводити відмивку іонообмінних фільтрів пом'якшеною водою. Такі системи розроблені і є конкурентоздатними для національних підприємств з точки зору енерго- і ресурсозбереження. Розроблено алгоритм такої регенерації фільтрів та підібране необхідне обладнання.

Значною проблемою при іонообмінному пом'якшенні води є наявність у вихідній воді надлишкових кількостей заліза, особливо при концентрації вище 2–5 мг/л. Залізо може «отруювати» іонообмінні матеріали, призводити до значного невідновлювального зниження обмінної ємності іонітів. Для знезалізнення води ефективним є застосування спрощеної або глибокої аерації з наступним фільтруванням через шар спіненої полістирольної засипки. Застосування пінополістирольних фільтрів дозволяє зменшити матеріалоємність та енергоємність роботи таких фільтрів у порівнянні з фільтрами з важким завантаженням за рахунок відмови від ємностей для зберігання чистої промивної води та промивних насосів [3].

Суттєвою перевагою пінополістирольних фільтрів є також можливість застосування гідроавтоматики для промивки фільтрів. Водночас при коливаннях показників якості вихідної води, концентрацій забруднень, необхідність очищення від інших завислих частинок параметрів фільтрування і промивки засипки може суттєво змінюватись. У цих випадках робота гідроавтоматики значно порушується, що призводить до зниження ефективності очищення. Для попередження таких негативних фільтрів пропонується система примусової промивки, яка включає використання промивного сифону малої висоти, пристрою для регулювання інтенсивності промивки, електромагнітного клапану та програматора, що керує



процесом промивки (рис. 1). Зокрема такі фільтри впроваджені на деяких підприємствах України та за кордоном [4].

У випадку значної жорсткості вихідної води більше 10–20 мг-екв/л (що визначається техніко-економічними розрахунками) доцільним є застосування реагентних методів пом'якшення, зокрема вапнування, вапняно-содового тощо. Ці методи мають перевагу при одночасній наявності органічних домішок та заліза у вихідній воді. У більшості випадків після введення реагентів проводиться попереднє вилучення зависі у прояснювачах із завислим шаром осаду і наступне фільтрування через пінополістирольні фільтри. Застосування автоматики у таких фільтрах дозволяє оптимізувати роботу технологічної схеми пом'якшення і значно зменшити витрати на експлуатацію обладнання.



Рис. 1. Сифон малої висоти із електромагнітним клапаном для промивки пінополістирольного фільтра

Під час іонообмінного пом'якшення води кількість реагентів, що застосовується для регенерації, у 2,0–2,5 рази більше ніж кількість солей, що вилучається з води. Регенераційні розчини скидаються у каналізацію або безпосередньо у водоймища. Це має значний негативний вплив на довкілля. Крім того, при реагентному пом'якшенні у воду вводяться катіони та аніони реагентів, які залишаються в очищеній воді, що вкрай негативно впливає на її якість і вимушує у ряді випадків проводити додаткове знесолення.

Для зменшення кількості застосовуваних реагентів пропонується використання електрохімічних методів обробки води, при яких очищення стічних вод проводиться за рахунок зміни параметрів очищення під дією постійного електричного струму. У зв'язку зі значним подорожчанням за останні роки хімічних реагентів електрохімічні процеси є перспективним з точки зору запобігання вторинного іонного забруднення оброблюваної води.



Зокрема, доцільним є застосування електрохімічного уведення коагулюючих катіонів алюмінію або заліза. Цей процес, відомий як «електрокоагуляція», здійснюється в проточному електрореакторі шляхом іонізації (електрохімічного розчинення) металевих анодів під дією постійного електричного струму. Для електрохімічного пом'якшення води рекомендується застосування електрохімічної зміни величини рН у діафрагмовому електролізері, що повністю виключає використання хімічних реагентів [5]. Регулювання параметрами очищення відбувається автоматично тільки за рахунок зміни величини постійного електричного струму залежно від параметрів води, зокрема її мінералізації.

При реагентному попередньому очищенні або пом'якшенні води значну складність представляє регулювання величини активної реакції (рН), що обумовлюється значними коливаннями цих параметрів у вихідній воді та зміною складу забруднюючих компонентів. Внаслідок цього на очисних спорудах відбувається передозування реагентів, що призводить до зниження ступеня вилучення забруднюючих компонентів і вторинного забруднення очищеної стічної води мінеральними солями. Тому для забезпечення точності у регулюванні рН рекомендується система автоматичного дозування реагентів, в основу якої покладено застосування мікропроцесорних засобів автоматизації [6].

Оскільки для осадження домішок у більшості випадків потрібно підвищувати рН від 6,8–7,4 до величин 9,8–10,5, які знаходяться у перехідній області, то рекомендовано регулювання цього параметру у проточному змішувачі-реакторі, що розміщений перед фільтром, прояснювачем або флотатором, за пропорційно-інтегрально-диференціальним (ПІД) законом регулювання.

Основними критеріями вибору структури системи автоматичного регулювання (САР) процесу регулювання рН служать діапазони змін цієї величини у вхідній воді, динаміка цих змін, статична характеристика процесів нейтралізації та осадження домішок, діапазон коливань концентрацій реагенту, динамічна

характеристика об'єкту регулювання (змішувача-реактора з комунікаціями) і необхідна якість стабілізації рН стоків. Працездатна САР процесу очищення може бути побудована тільки з урахуванням всіх перерахованих чинників.

Для регулювання процесу зміни рН в проточних реакторах широко застосовують ПІ-регулятори. Проте їх можливості обмежені діапазоном зміни навантаження, а також динамікою збурень. При зміні параметрів води і використанні змішувача-реактора з несприятливою динамічною характеристикою рекомендують застосовувати ПІД-регулятор. Однак в умовах періодичної обробки води та багатокомпонентності її складу навіть одноконтурна САР з ПІД-регулятором не може забезпечити задану якість стабілізації рН [7].

Для забезпечення швидкого та ефективного проходження процесу автоматичного регулювання рН запропоновано використовувати САР з нечітким регулятором. Для порівняння даного регулятора (рис. 2) із найбільш розповсюдженим ПІД-регулятором проводилось моделювання САР. Проточний змішувач-реактор як об'єкт керування, після відповідних розрахунків, може бути представлений у вигляді аперіодичної ланки другого порядку із запізненням:

$$W_a(s) = \frac{0,989}{(2,75s + 1)(2,56s + 1)} e^{-3s}$$

Моделювані САР містять однакові блоки з передаточними функціями, окрім блоків регуляторів.

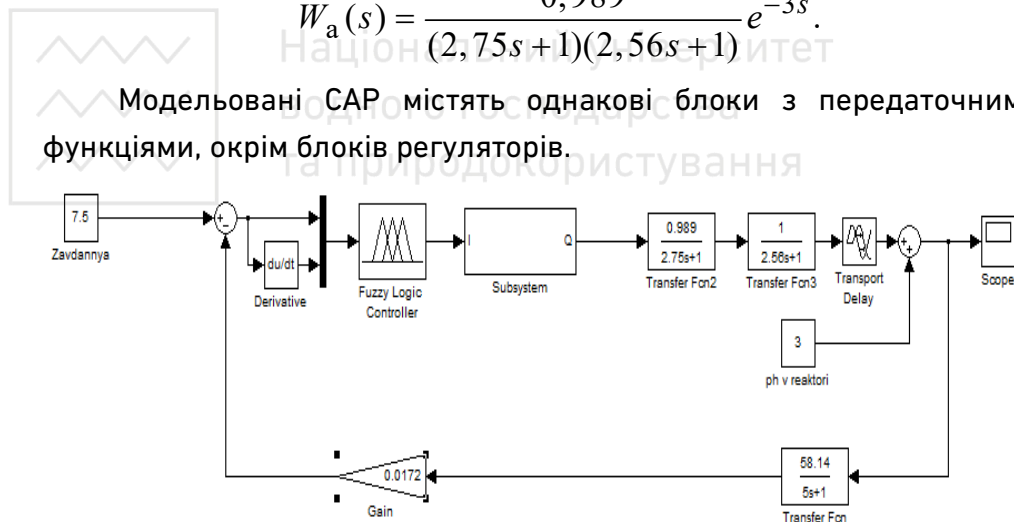


Рис. 2. Модель системи з нечітким регулятором в програмі Matlab

Результати моделювання показали (рис. 3), що при використанні САР з нечітким регулятором час регулювання зменшився вдвічі у порівнянні з САР із використанням ПІД-регулятора, що дозволяє зменшити витрату реагентів та прискорити процес виходу рН на необхідне значення.

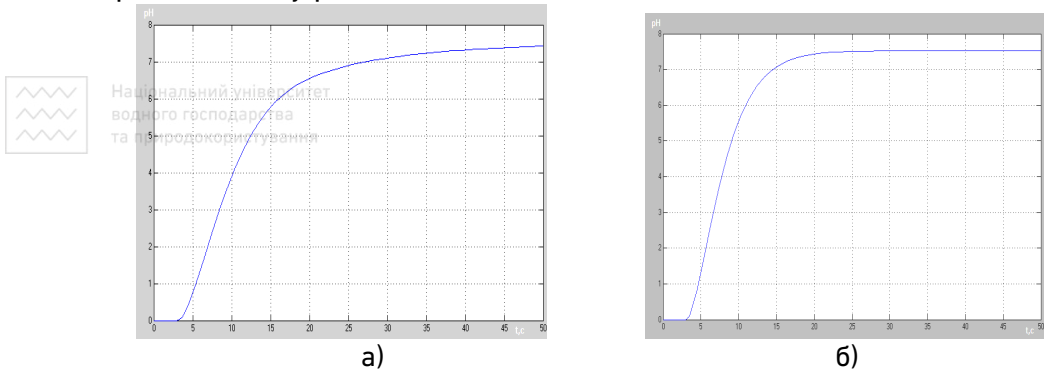


Рис. 3. Графіки перехідних процесів при моделюванні САР з ПІД-регулятором (а) та нечітким регулятором (б)

У зв'язку з цим в основі запропонованого алгоритму управління передбачається використання двох пов'язаних контурів регулювання з неперервними регуляторами на основі нечіткої логіки. В такій системі в режимі реального часу ведеться автоматичний контроль за вихідними значеннями параметру рН. Виміряні значення фазифікуються. На основі експертної інформації формується база знань, описуються лінгвістичні змінні. Блок логічних рішень здійснює процедуру нечіткого логічного висновку, в ході якого здійснюється композиція нечітких вихідних множин. Останнім етапом нечіткого управління є дефазифікація – перетворення нечітких даних у конкретні фізичні керуючі впливи, які служать уставками регуляторів. Алгоритм управління передбачає циклічне введення реагентів насосами-дозаторами з виділенням часу для стабілізації параметру рН [8].

**Таким чином,** застосування систем автоматизації для регулювання параметрами роботи очисних споруд та при введенні реагентів у технологічних схемах підготовки води для систем теплозабезпечення дозволяє отримати високу якість очищення води, зменшити кількість реагентів та вторинне забруднення води аніонами.


1. ДБН В.2.5-74:2013. Водопостачання. Зовнішні мережі та споруди.
2. Водоподготовка и водный режим энергообъектов низкого и среднего давления : справочник / Кострикин Ю. М. и др. М. : Энергоатомиздат, 1990. 254 с.
3. Орлов В. О. Водоочисні фільтри із зернистою засипкою. Рівне : РДТУ. 2005. 163 с.
4. Application of expanded polystyrene filter for tertiary treatment of domestic waste effluent in the UK / V. Fylypchuk, S. Induchny, P. Pearce, L. Fylypchuk, S. Martynov. *Journal of Water and Land Development*. 2017. Vol. 35. Issue 1. P. 41–47.
5. Fylypchuk V., Fylypchuk L. Electrochemical water softening in a diaphragm electrolyzer. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Kharkiv : PC «Technology center», Ukrainian State University of Railway Transport, 2017. Vol. 2/6(86). P. 48–55.
6. Автоматизоване керування природоохоронними системами очищення металовмісних стічних вод : монографія / Филипчук В. Л., Древецький В. В., Филипчук Л. В., Клепач М. І. Рівне : Овід, 2017. 288 с.
7. Клепач М. І., Филипчук Л. В. Автоматизація процесу регулювання рН та Eh при очистці стічних вод від важких металів. *Сучасне забезпечення систем управління технічними комплексами* : матеріали наук.-техн. конфер. Київ : НУХТ. 26 листопада 2009. С. 109.
8. Филипчук В. Л., Клепач М. І., Филипчук Л. В. Спосіб автоматизації процесу регулювання величин рН та Eh багатокomпонентних стічних вод: пат. України на КМ № 65459, Бюл. № 23, 2011.

## REFERENCES:

1. DBN V.2.5-74:2013. Vodopostachannia. Zovnishni merezhi ta sporudy.
2. Vodopodgotovka i vodniy rejim energoobektov nizkogo i srednego davleniya : spravochnik / Kostrikin YU. M. i dr. M. : Energoatomizdat, 1990. 254 s.
3. Orlov V. O. Vodoochysni filtry iz zernystoiu zasypkoiu. Rivne : RDTU. 2005. 163 s.
4. Application of expanded polystyrene filter for tertiary treatment of domestic waste effluent in the UK / V. Fylypchuk, S. Induchny, P. Pearce, L. Fylypchuk, S. Martynov. *Journal of Water and Land Development*. 2017. Vol. 35. Issue 1. P. 41–47.
5. Fylypchuk V., Fylypchuk L. Electrochemical water softening in a diaphragm electrolyzer. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Kharkiv : PC «Technology center», Ukrainian State University of Railway Transport, 2017. Vol. 2/6(86). P. 48–55.
6. Avtomatyzovane keruvannia pryrodookhoronnykh systemamy ochyshchennia metalovmisnykh stichnykh vod : monohrafiia / Fylypchuk V. L., Drevetskyi V. V., Fylypchuk L. V., Klepach M. I. Rivne : Ovid, 2017. 288 s.
7. Klepach M. I., Fylypchuk L. V. Avtomatyzatsiia protsesu rehuliuвання rN ta Eh pry ochysttsi stichnykh vod vid vazhkykh metaliv. *Suchasne zabezpechennia system upravlinnia tekhnichnykh kompleksamy* : materialy nauk.-tekhn. konfer. Kyiv : NUKhT. 26 lystopada 2009. S. 109.
8. Fylypchuk V. L., Klepach M. I., Fylypchuk L. V. Sposib avtomatyzatsii protsesu rehuliuвання velychyn rN ta Eh bahatokomponentnykh stichnykh vod: pat. Ukrainy na KM № 65459, Biul. № 23, 2011.

**Fylypchuk L. V., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor**  
(National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

## **AUTOMATION OF WATER TREATMENT SYSTEMS IN HEAT ENERGY**




The necessity of automation of water treatment systems for boiler installations is substantiated, which is essential for reliable and efficient operation of heat supply systems of social infrastructure. Automation of the process of regeneration of ion exchange and expanded polystyrene filters in the purification of water from iron and hardness salts using siphons, programmers and electric valves is proposed. To prevent secondary contamination of water with salts, electrochemical methods of water purification are recommended, in particular electrocoagulation and electrochemical pH adjustment in a diaphragm cell, which completely eliminates the use of chemical reagents. The purification parameters are regulated automatically only by changing the value of direct electric current depending on the parameters of water, in particular its mineralization. The purification parameters are regulated automatically by changing the value of direct electric current depending on water parameters. To ensure accuracy in pH adjustment and to avoid overdose of reagents during the deposition of iron and hardness ions, an automatic pH adjustment system with a fuzzy regulator is recommended. The simulation results showed that when using SAR with fuzzy regulator, the control time was reduced by half compared to SAR with PID-regulator, which reduces the consumption of reagents and ensures the stability of the pH value. The control algorithm involves cyclic introduction of reagents by dosing pumps with the allocation of time to stabilize the pH parameter. The use of automation systems to control the parameters of treatment plants and the introduction of reagents in technological schemes of water treatment for heating systems allows to obtain high quality water treatment, reduce the number of reagents and prevent secondary contamination of water with soluble salts.

**Keywords:** water treatment systems, boiler plants, softening and deferrization, electrochemical regulation of pH, fuzzy regulators.

---

**Филипчук Л. В., к.т.н., доцент, Нагорнюк К. О., студентка**  
(Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

## **СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ТА ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ pH ТА Eh ПІД ЧАС ОЧИЩЕННЯ ВОДИ**



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

**Досліджено існуючий стан процесів вимірювання параметрів pH та Eh при реагентному очищенні стічних вод. Досліджено залежність цих параметрів один від одного та їх вплив на даний процес. Обґрунтовано необхідність застосування систем автоматичного контролю даних параметрів для забезпечення штатного проходження технологічного процесу та запобігання негативного впливу на працівників через недопустимі відхилення даних параметрів. Запропоновано систему контролю на основі сучасних апаратних засобів. Уточнено дії щодо їх коректної роботи, правильної експлуатації та захисту в умовах високої забрудненості стічних вод.**

**Ключові слова:** системи контролю; очищення стічних вод; автоматизація.

**Вступ.** Величини pH та Eh є важливими комплексними показниками властивостей природних та вод. Ці величини дозволяють оцінити окисно-відновний режим води у водоймах, забруднення її продуктами розкладу органічних речовин, стоками промислових підприємств, стан рідкої та твердої фаз на очисних спорудах.

Ці параметри впливають на самі різноманітні сторони фізико-хімічних і біохімічних процесів, що протікають при очистці води від різних забруднень. Так, процеси окислення, відновлення, дисоціації, комплексоутворення потребують зміни pH та Eh, оскільки цим самим можна змінювати потенціал, напрямок та швидкість хімічних реакцій, окисно-відновну здатність речовин, міцність комплексних сполук [1–4].

Такі методи очистки води, як осадження, флоатація, фільтрування, адгезія, сорбція, коагуляція, флокуляція, також в значною мірою залежать від величини цих параметрів. Це

пояснюється тим, що зміна величин рН та Eh дозволяє впливати на величину добутку розчинності малорозчинних величин, електрокінетичного потенціалу поверхні фільтруючого завантаження, колоїдних частинок, пластівців коагулянту, на сорбційну здатність та вибірковість сорбентів, впливати на флотаційну активність мінеральних частинок. Зсув величин рН та Eh змінює швидкість коагуляції та гідролізу гідроксидів важких металів, впливає на величину і форму активних складових флокулянтів.

Таким чином, параметри рН та Eh істотно впливають на різноманітні сторони фізико-хімічних процесів, що відбуваються в гетерогенних і гомогенних водних системах, регулювання яких дозволяє цілеспрямовано здійснювати процеси очистки стічних вод від різноманітних забруднень.

**Існуючий стан.** Найбільше розповсюдження в практиці водоочищення для регулювання рН та Eh отримав реагентний метод. Загальноприйнятими реагентами для підлужування є будівельне вапно, гідроксиди і карбонати натрію та деяких інших реагентів; для підкислення – сірчана та соляна кислоти. Для процесів підвищення окисно-відновного потенціалу (Eh) найчастіше використовують хлорвмісні реагенти (газоподібний хлор, гіпохлорит натрію, хлорне вапно, діоксид хлору), озон, марганцевокислий калій, пероксид водню; для зниження Eh – сірковмісні реагенти (бісульфіт, сульфїт та сульфід натрію), солі заліза (II) [4].

У більшості випадків під час очищення води зміну рН проводять у межах від 2,5–3,0 од. до 10,5–11,0 од., зміну Eh від  $-(0,4-0,7)$ В до  $+(1,2-1,3)$ В. Криві зміни рН та Eh мають виражений нелінійний характер (рис. 1), що обумовлюється логарифмічною залежністю такої зміни від дози реагенту [5].

Як видно із рис. 1, на кривих можна виділити три ділянки. На першій та третій граничних ділянках зміна рН та Eh протікає незначно, що обумовлюється необхідністю нейтралізації надлишку у воді речовин, які обумовлюють протолітичні та окисно-відновлювальні властивості водного середовища, або накопиченням відповідних реагентів. На другій, біля точки еквівалентності (у перехідній області рН від 3–4 до 10–11 та Eh від  $-(0,3-0,4)$ В до  $+(0,6-0,8)$ В, яка в основному використовується під час очищення води) протікає більш-менш різка зміна цих параметрів при додаванні навіть малої кількості хімічних речовин.

Окрім того, існує взаємовплив між рН і Eh [5]. Так, рівноважний



потенціал для водневої системи визначається рівнянням водневого електрода:

$$E = \frac{RT}{2F} \lg \frac{[H^+]^2}{P_{H_2}} = \frac{RT}{F} \lg [H^+] - \frac{RT}{2F} \lg P_{H_2} \quad (1)$$

або при нормальних умовах:

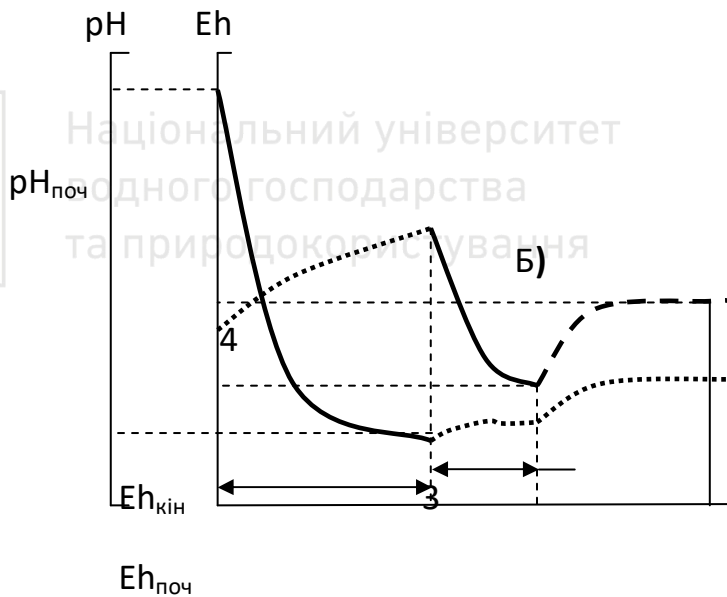
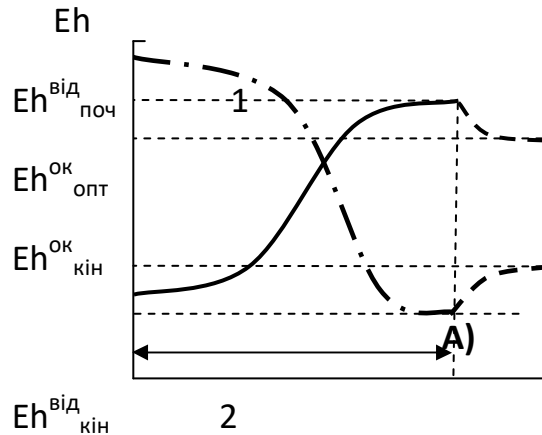


Рис. 1. Зміна величин Eh (1–3) і pH (4) стічної води без регулювання (А) і з регулюванням (Б) pH середовища при окисленні (2, 3) та відновленні (1) забруднень

$$E_h = 0.059 \lg [H^+] = -0,059 \text{ рН}. \quad (2)$$

Відповідно рівноважний потенціал для кисневої системи визначається рівнянням кисневого електрода:

$$E = E_0 + \frac{RT}{4F} \lg \frac{[H^+]^4 P_{O_2}}{[H_2O]^2} = E_0 + \frac{RT}{F} \lg P_{O_2} + \frac{RT}{F} \lg [H^+] \quad (3)$$

або при нормальних умовах:

$$E_h = 1,23 + 0,059 \lg [H^+] = 1,23 - 0,059 \text{ рН}. \quad (4)$$

Як видно з наведених рівнянь, зміна величини рН на одну одиницю призводить до протилежної зміни величини  $E_h$  на 58 мВ, що додатково ускладнює регулювання цих параметрів.


Така складна залежність обумовлює необхідність застосування відповідних автоматичних пристроїв для дозування і контролю параметрів рН та  $E_h$ , а також надійності використання датчиків, які вимірюють значення цих параметрів, в умовах високої забрудненості стічних вод. Суттєвим чинником щодо застосування систем автоматизованого дозування реагентів є також вимоги до безпеки праці обслуговуючого персоналу, оскільки при використанні хімічних реагентів неточне регулювання рН та  $E_h$  може призвести до виділення побічних шкідливих продуктів реакції реагентів із забруднюючими домішками.

**Мета роботи** полягає в аналізі існуючих систем контролю параметрів рН та  $E_h$  та виборі найбільш надійних методів забезпечення роботи датчиків в умовах високої забрудненості природних та стічних вод.

#### **Результати досліджень**

З відомих способів вимірювання рН та  $E_h$  на даний час у промислових умовах використовують потенціометричний метод. Принцип його полягає в тому, що вимірюється електричний потенціал, що виникає на парі електродів, занурених в розчин. Величина потенціалу залежить від активної концентрації іонів.

При вимірюванні рН електродна пара складається з вимірювального скляного і каломельного чи хлорсрібного електродів порівняння. Важлива особливість скляного електрода, що вигідно відрізняє його від інших, полягає в тому, що окисно-відновні процеси, які часто протікають одночасно з контрольованими, не призводять до виникнення на ньому потенціалу. Така вибірковість дозволяє використовувати скляний електрод для вимірювання величини рН у вельми різноманітних процесах. Потенціал



індикаторного (скляного) електрода можна виміряти лише відносно іншого (порівняльного чи допоміжного) електрода з постійною е.р.с. Тобто складова е.р.с. на зовнішній поверхні скляної мембрани при постійній температурі пропорційна значенню рН розчину. Характерно, що для кожного типу електрода існує так звана ізопотенціальна точка, в якій е.р.с. постійна про всіх температурах. Величина  $E_h$  вимірюється подібним чином за допомогою платинового електрода. У приладах використовують автоматичну чи ручну температурну компенсацію.

При використанні датчика з контрольним приладом (або вторинним вимірювальним та показуючим пристроєм як частиною системи контролю) необхідно провести калібрування показів вимірювання, при якому узгоджуються покази сигналу з датчика з реальним значенням показника стічної води. Для цього застосовуються декілька буферних розчинів з деяким конкретним відомим показником значення рН або  $E_h$ . Якщо при вимірюванні одного з цих параметрів значення не співпадає із відомим показником буферного розчину, проводять підстроювання кривої зміни параметра до повного збігу виміряного та відомого значень рН чи  $E_h$ . Для калібрування датчика рН використовуються буферні розчини зі стандартними значеннями рН та  $E_h$ .

До споживача датчики поставляються як окремо, так і в комплекті з вторинними вимірювальними перетворювачами. Найбільш розповсюдженими є датчики рН та  $E_h$  відомих фірм Etatron, Jumo, Chemitec тощо [5–8].

Сучасні датчики характеризують покращені показники якості та надійності, а саме: стійка до забруднення та дії хімічних реагентів пориста мембрана; подвійна мембрана базового електрода підвищує термін служби у ситуаціях, коли має місце підвищений вміст сульфідів ( $H_2S$ ) та металів, таких як олово, ртуть та срібло; новий тип твердого електроліту забезпечує базовий потенціальний контакт в умовах різних тиску і температури під час вимірювань; для точної компенсації впливу температури на процес вимірювань рН та  $E_h$  використовується температурний датчик нової капілярної конструкції Pt100, який розміщується після чутливої мембрани; механічний захист рівня IP68 захищає високоімпульсний сигнал електродів від вологи, яка може генеруватися в умовах занурення електрода (конденсації).

Дані типи електродів є комбінованими і включають вимірювання та калібрування. Вони не потребують значного технічного обслуговування і класифікуються за конструктивними особливостями, що дозволяє використовувати електроди для багатьох типів вимірювань (рис. 2).

Для захисту датчиків від механічних пошкоджень та зменшення турбулентності потоку, створеного змішуванням стоків із реагентами, використовується захисна занурена арматура. Вона також призначена для встановлення датчиків в важкодоступні глибокі точки змішувачів-реакторів на спеціальних штангах довжиною 2–4 м.

Незалежно від типу датчика, при його постійній експлуатації всередині змішувача-реактора, де протікає процес змішування води з реагентами, його поверхня забруднюється, частково покривається шаром зважених частинок, і через це частково або повністю втрачає здатність об'єктивно вимірювати необхідну величину параметру. Наприклад, в оборотних системах водопостачання підприємств швидкість відкладень карбонату кальцію складає  $2,7\text{г/м}^2 \cdot \text{год}$  для річної води, і  $3,37\text{г/м}^2 \cdot \text{год}$  – для підземних вод. При цьому карбонатні відклади з'являються відразу після перших витків нагрівання і охолодження оборотної води.

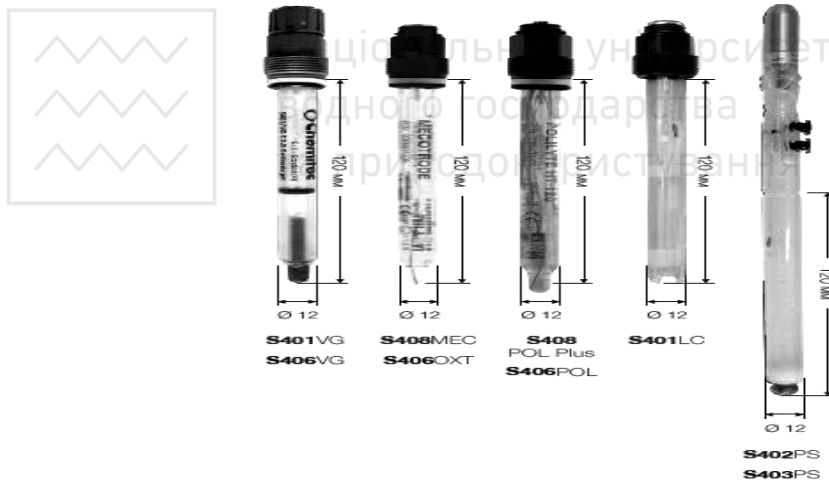



Рис. 2. Загальний вигляд електродів для вимірювання рН та Eh

Навіть при застосуванні систем автоматизованого дозування реагентів зниження чутливості датчиків внаслідок їх забруднення осадом зводить нанівець ефективність регулювання рН та Eh.



Для усунення цього недоліку чутливий елемент датчика необхідно очищати. У світовій практиці застосовують три основні способи очищення електродів. Перший спосіб полягає в періодичній подачі струменя води в нижню частину електрода для змиву відкладеного осаду. Однак цей спосіб практично не відновлює функціональний стан електрода при відкладенні липкого або кристалічного осаду. Другий спосіб полягає в механічному очищенні нижньої частини електрода за допомогою щітки, що обертається. Недоліком цього способу є те, що постійне тертя щітки змінює чутливість електрода, особливо платиного. Позитивною стороною перших двох способів є те, що вони не потребують демонтажу електродної системи. Як показує досвід, найбільш дієвим є третій спосіб, який полягає у зупинці змішувача-реактора, демонтажі і витягуванні штанг з електродами, зняття електродів і відмочування їх у розчині соляної кислоти з наступною промивкою. Однак такий спосіб є достатньо трудомістким, небезпечним і неприйнятним при відсутності резервних змішувачів-реакторів або цілодобової роботи очисних споруд.

Найбільш дієвим способом відновлення чутливості є прокачка спеціальним насосом малої кількості води, яка обробляється у змішувачі-реакторі, через електроди, розміщені ззовні змішувача-реактора у спеціальній прозорій камері, наприклад, безпосередньо на корпусі змішувача (рис. 3). Це дозволяє спостерігати за станом електрода і швидко замінювати його на іншій без зупинки роботи реактора-змішувача і використання громіздких штанг з подальшим відновленням чутливості знятого датчика в лабораторних умовах.

Зовнішня система контролю рН та Eh була впроваджена на підприємствах при очищенні стічних вод гальванічних виробництв від іонів важких металів. Тривала експлуатація такої системи показала її високу надійність та ефективність.

**Висновки.** Системи контролю та регулювання рН та Eh широко використовуються в технології очищення води від різноманітних забруднень. Ефективність функціонування (і, як один із результатів, забезпечення безпеки праці) даних систем значно залежить від ступеня забруднення електродів, які вимірюють параметри, що контролюються під час очищення води.




Рис. 3. Реактор-змішувач із системою контролю рН та Eh (виносні датчики та вторинні вимірювальні прилади, власне фото)

Найбільш дієвим з точки зору відновлення чутливості забруднених електродів рН та Eh є їх зовнішнє розміщення безпосередньо на корпусі змішувача-реактора у спеціальній прозорій камері з прокачкою спеціальним насосом малої витрати стічної води, що обробляється реагентами. Така система дозволяє відмовитись від громіздких конструкцій і періодичної зупинки змішувачів-реакторів та забезпечити надійність та ефективність експлуатації датчиків та системи контролю в цілому.

1. Красавцев Г. Н., Ильичев Ю. М., Кашуба А. И. Рациональное использование и защита водных ресурсов в черной металлургии. М. : Металлургия, 1989. 288 с.
2. Смирнов Д. Н., Генкин В. Е. Очистка сточных вод в процессах обработки металлов. М. : Металлургия, 1989. 224 с.
3. Мацнев А. И. Водоотведение на промышленных предприятиях. Львов : «Вища школа», 1986. 200 с.
4. Филипчук В. Л. Очищення багатокomпонентних металомішуючих стічних вод промислових підприємств. Рівне : УДУВГП, 2004. 232 с.
5. Природоохоронні системи очищення металомісних стічних вод та автоматизоване регулювання їх параметрів : монографія / Филипчук В. Л., Древецький В. В., Филипчук Л. В., Клепач М. І. Рівне : НУВГП, 2016. 288 с.
6. URL: [http://www.jumo.ru/catalog/detail.php?IBLOCK\\_ID=4&SECTION\\_ID=22&ID=73](http://www.jumo.ru/catalog/detail.php?IBLOCK_ID=4&SECTION_ID=22&ID=73)
7. URL: (дата звернення: 02.02.2022).

<http://www.etatron.com.ua/pumps/sensor/> (дата звернення: 02.02.2022).  
**8.** URL: <http://envitec.com.ua/ua/analizatori-ridkikh-seredovishch/290-tsfrovye-elektrody-datchiki-izmereniya-rn-i-ovp-2> (дата звернення: 02.02.2022).

## REFERENCES:

- 
1. Krasavtsev G. N., Ilichev Yu. M., Kashuba A. I. Ratsionalnoe ispolzovanie i zaschita vodnih resursov v chernoy metalurji. M. : Metalurgiya, 1989. 288 s.
  2. Smirnov D. N., Genkin V. E. Ochistka stochnyih vod v protsessah obrabotki metallov. M. : Metallurgiya, 1989. 224 s.
  3. Matsnev A. I. Vodootvedenie na promyshlenniyh predpriyatiyah. Lvov : «Vyshcha shkola», 1986. 200 s.
  4. Fylypchuk V. L. Ochyshchennia bahatokomponentnykh metalovmishchiuchykh stichnykh vod promyslovykh pidpriemstv. Rivne : UDUVHP, 2004. 232 s.
  5. Pryrodokhoronni systemy ochyshchennia metalovmisnykh stichnykh vod ta avtomatyzovane rehuliuвання yikh parametriv : monohrafiia / Fylypchuk V. L., Drevetskyi V. V., Fylypchuk L. V., Klepach M. I. Rivne : NUVHP, 2016. 288 s.
  6. URL: [http://www.jumo.ru/catalog/detail.php?IBLOCK\\_ID=4&SECTION\\_ID=22&ID=73](http://www.jumo.ru/catalog/detail.php?IBLOCK_ID=4&SECTION_ID=22&ID=73) (дата звернення: 02.02.2022).
  7. URL: <http://www.etatron.com.ua/pumps/sensor/> (дата звернення: 02.02.2022).
  8. URL: <http://envitec.com.ua/ua/analizatori-ridkikh-seredovishch/290-tsfrovye-elektrody-datchiki-izmereniya-rn-i-ovp-2> (дата звернення: 02.02.2022).

**Fylypchuk L. V., Candidate of Engineering (Ph.D.), Nahorniuk K. O., Senior Student** (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

## CONTROL AND MEASUREMENT SYSTEMS OF pH AND Eh PARAMETERS DURING WASTEWATER PURIFICATION

The current state of the processes of measuring pH and Eh parameters during reagent wastewater purification has been analyzed. These parameters affect a variety of aspects of physicochemical and biochemical processes that occur during water purification from various contaminants. Thus, the processes of oxidation, reduction, dissociation, complexation require changes in pH and Eh, because this can change the potential, direction and rate of chemical reactions, redox capacity of substances, strength of complex

**compounds. Water treatment methods such as precipitation, flotation, filtration, adhesion, sorption, coagulation, flocculation, also largely depend on the value of these parameters. The dependence of these parameters on each other and their influence on this process are researched. The necessity of application of automatic control of the given parameters for maintenance of regular passing of technological process and prevention of negative influence on workers because of inadmissible deviations of the given parameters is proved. An important factor in the use of automated reagent dosing systems is also the requirements for occupational safety, because when using chemical reagents inaccurate pH and Eh regulation, can lead to the release of harmful by-products of the reaction of reagents with contaminants. The control system on the basis of modern hardware is offered. The actions concerning their correct work, correct operation and protection in the conditions of high pollution of sewage are specified. pH and Eh control and regulation systems are widely used in water purification technology from various contaminants. The efficiency of operation (and, as one of the results, occupational safety) of these systems significantly depends on the degree of contamination of the electrodes, which measure the parameters monitored during water treatment.**

***Keywords:* control systems; wastewater purification; automation.**



Национальний університет  
водного господарства  
та природокористування



Ласлов С. В. (Національний транспортний університет, м. Київ)

**АНАЛІЗ ЗАХОДІВ ШУМОВОЇ БЕЗПЕКИ НА  
АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРОГАХ СВІТУ**Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

**У роботі проведено аналіз існуючих проєктних заходів щодо захисту навколишнього середовища від шумового навантаження на автомобільних дорогах країн світу. Наведено основні класифікатори шумового захисту природного середовища. Розглянуто особливості деяких рішень з проєктування міст і доріг у розрізі шумового захисту.**

**Наведено варіанти зниження шумового забруднення методами будівництва тунелів і зелених насаджень. Виявлено і досліджено позитивні і негативні фактори при використанні зазначених методів в умовах міської забудови та поза містом.**

**Встановлено, що найбільш ефективними заходами зі зменшення впливу шумового навантаження на навколишнє середовище є встановлення шумозахисних екранів уздовж автомобільних доріг. Докладно проаналізовано їх використання як метод захисту навколишнього середовища.**

**Наведено основні типи шумозахисних екранів, їх особливості та якісні характеристики.**

**Ключові слова:** шумове забруднення; шумове навантаження; тунелі; зелені насадження; шумозахисний екран; дифракція; типи шумозахисних екранів; зниження шуму; панелі шумозахисних екранів.

**Вступ.** Проблема шумового забруднення на автомобільних дорогах світу стає дедалі актуальною в останні роки.

Згідно із працею [1] методи зменшення впливу шуму від транспорту, на відміну від методів зниження шуму біля джерела за рахунок покращення конструкції транспортного засобу, бувають трьох типів:

1. Зменшення шуму за рахунок містобудування та проєктування доріг (включаючи використання звукових екранів або бар'єрів).

2. Зниження шуму за допомогою архітектурних засобів, таких як звукоізоляція та облаштування кімнат.

3. Зниження шуму за допомогою заходів контролю дорожнього руху та поліції.

Слід зазначити, що істотного зниження рівня шуму можна досягти шляхом зміни дизайну доріг та їх оточення, тобто шляхом відповідного містобудування.

**Аналіз методів шумозахисту.** З точки зору зниження шуму, що поширюється на житло, тунелі (рис. 1) є найбільш радикальним рішенням, яке створює, проте, багато труднощів. У традиційних містах і селищах можуть виникнути значні топографічні та технічні проблеми через стан надр, простору, зайнятого каналізацією, підземними інфраструктурними об'єктами тощо – це фактори, які ускладнюють, а іноді навіть унеможливають підземні роботи.

Крім того, коли підземну дорогу можна побудувати, вона, як правило, є абсолютно новою, а не заміною існуючої наземної, яку закривають, щойно підземну дорогу буде відкрито. Крім того, будівництво підземної дороги є безумовно найдорожчим рішенням.

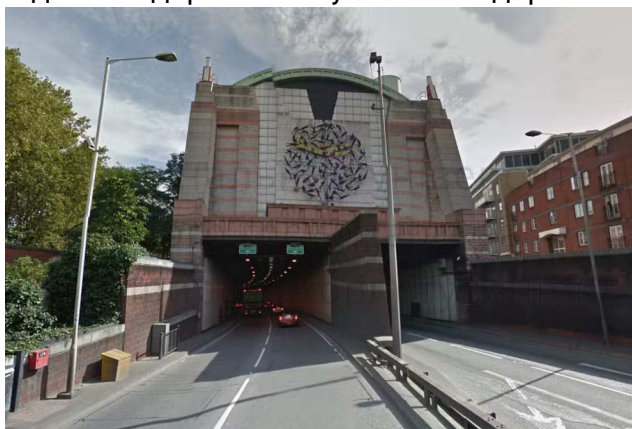


Рис. 1. Тунель в межах міської забудови

За оцінками британських вчених, будівництво дороги в тунелі, що побудований закритим способом, коштує в 13 разів дорожче ніж будівництво на рівні землі [1]. Шум і забруднення від вентиляційних систем також є серед різноманітних проблем, які виникають із тунелями (як і з підземними паркінгами). Виходи цих систем повинні бути забезпечені відповідними дефлекторами і якимось чином видаляти (фільтрувати) вихлопні гази, шкідливі випари та забруднювачі.

Тунелі також повинні бути акустично оброблені, щоб рівень звуку всередині не перевищував рівнів, які можуть переносити автомобілісти. Крім того, значним може бути вплив на поверхню будівель вібрації від руху транспорту. Вирішення цієї проблеми не повинно створювати нових та викликати невдоволення.

Щодо зелених насаджень (рис. 2), то дослідження [2] показали, що листяні породи дерев можуть поглинати до 25% звукової енергії, а 75% – віддзеркалювати та розсіювати. Найкращими з цієї точки зору є: ялина, ялиця, туя (з хвойних порід); липа, граб (з листяних).



Рис. 2. Зелені насадження вздовж доріг

Шумозахисна функція, певним чином, залежить від прийомів озеленення. Однорядна посадка дерев з живою огорожею з чагарника шириною 10 метрів знижує рівень шуму на 3–4 дБ; дворядна посадка шириною 20–30 метрів – на 6–8 дБ; 3–4-рядна посадка шириною 30–50 метрів – на 8–10 дБ; бульвар шириною 70 метрів з рядовою та груповою посадкою дерев та чагарників – на 10–14 дБ; багаторядна посадка або зелений масив шириною 100 метрів – на 12–15 дБ.

Теоретично зменшення швидкості руху автомобільного транспорту є ще одним способом зменшення рівня шуму. На високошвидкісних дорогах скорочення середньої швидкості автомобіля в 2 рази може призвести до зниження еквівалентного рівня шуму на 5–6 дБ, але на практиці цього важко домогтися [3].

Завдяки проведеним дослідженням у роботах [3; 4] встановлено, що деяких успіхів у зниженні шуму можна досягти за допомогою відповідної конфігурації малюнка протектора і конструкції шини. Проте конструювання шин з істотно зниженим

рівнем шуму вступає в суперечність із гострою необхідністю забезпечення безпеки руху, попередження нагріву протектора і забезпечення економічності автомобіля.

Отже, великі можливості зі зниження шуму відкриває створення перспективних альтернативних конструкцій дорожнього покриття.

Важливим, з погляду обмеження шуму, є будова самого дорожнього покриття: чи утворено воно бітумінізованим матеріалом з випадковим малюнком будови, або покриття бетонне, з домінуючою поперечною структурою. У Великобританії були проведені вимірювання [2], які дозволили встановити елементарне співвідношення між опором автомобіля занесенню, що реалізується на дорожньому покритті, і сумарним рівнем шуму, який генерується автомобілями, що йдуть на великих швидкостях по даному дорожньому покриттю. Було встановлено, що це співвідношення статистично не залежить від будови матеріалу дорожнього покриття. На жаль, хоч цей результат і корисний при встановленні норм для розробки дорожнього покриття, в яких враховуються міркування безпеки і охорони навколишнього середовища, він оголює протиріччя, існуюче між визначенням дорожніх покриттів, що володіють низьким рівнем шуму і задовільними нормами безпеки при високих швидкостях руху.

**Аналіз шумозахисних екранів.** Шумозахисні екрани знижують транспортний шум за рахунок поглинання, зміни довжини хвилі, віддзеркалення, або дифракції.

Дифракція, або огинання звуковими хвилями перешкоди, може відбуватися і по верху екрану, і навколо нього. Через природу звукових хвиль дифракція не змінює всі частоти рівномірно. Високі частоти (більш короткі хвилі) менше дифрагують, тоді як більш низькі частоти (більш довгі хвилі) дифрагують глибше в «тіньову» зону позаду екрану. Тому екран більш ефективний для зменшення хвиль звуку з високою частотою в порівнянні з хвилями звуку із більш низькими частотами.

Деякі системи екранів розроблені з отворами для скидання води [6]. При цьому слід враховувати, що маленький (до 20 см в поперечнику) отвір в шумозахисному екрані дає приріст шуму в межах 1 дБ(А); отвори повинні мати належний захист у вигляді ґрат або стрижнів, щоб обмежити вхід дрібних тварин.

Згідно з [6] до основних типів шумозахисних екранів можна віднести: екрани на природній основі та екрани на штучних спорудах.

Встановлені на ґрунті екрани представляють собою конструкції, які змонтовані на ґрунтовій основі. Нижче розглянуто три типи таких конструкцій: шумозахисні насипи; шумозахисні стіни; комбіновані конструкції (рис. 3), що складаються з насипів і стін.



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування



Рис. 3. Комбінована конструкція – по центру – стіна, з боків – насипи

Шумозахисні екрани, виготовлені з природних ґрунтів, каміння, скельних матеріалів, в натуральному вигляді називаються шумозахисними насипами. Вони влаштовуються з місцевих або привезених матеріалів.

Шумозахисні насипи, як правило, займають більшу площу в порівнянні з екранами стінного типу, оскільки укоси насипів повинні забезпечувати достатню стійкість конструкції. Для більшості насипів ухил укосів приймають 2:1 [6], в деяких випадках використовують ухил 1,5:1. Для насипів, відсипаних зі скельних матеріалів (без додаткового закріплення), допускається ухил 1:1.

Верх насипу може мати мінімальну ширину, виходячи з умов стійкості укосів, або бути плоским. Якщо насип має плоский верх, то площа для всієї конструкції зростає, при цьому легше проводити роботи за змістом, надалі можна наростити насип без збільшення площі основи і використати її для посадки дерев, установки екрану стінного типу, а також як межі смуги відведення.

Інші фактори, що враховуються при виборі насипу як шумозахисної конструкції [6]:

- вимоги до площі смуги відведення: чи вміщається насип в існуючу смугу відведення або необхідне її розширення?

- розміщення насипу відносно межі смуги відведення: чи буде весь насип розташований у смузі відведення, за її межами або межа буде проходити по насипу?

- візуальне сприйняття насипу зі сторони дороги і прилеглої території: чи виглядатиме насип небезпечним для користувачів дороги або жителів невеликих будинків, розташованих за нею?

- чи потрібно зносити будівлі або вирубувати дерева для облаштування насипу?

- вимоги експлуатації і доступності: чи буде насип залишений в природному вигляді або облаштовуватися і якщо так, то ким?

- облаштування дренажу: які додаткові конструкції необхідні для запобігання стоку зливових вод з насипу на проїжджу частину і підпору ґрунтових вод?

Більшість конструкцій шумозахисних стін є привезеними [6], тобто всі конструкції виготовляються на заводі, потім доставляються на місце монтажу і збираються (за винятком монолітних конструкцій). Нижче розглянуто наступні типи шумозахисних стін: панелі, розміщені між стійками; стіни з каменю і блоків (рис. 4); самонесучі шумозахисні стіни (із заздалегідь напруженого залізобетону, габіонів); панелі, вкопані в ґрунт; монолітні бетонні стіни.

Панелі розміщені між стійками: основними елементами таких конструкцій є опори, фундаменти, панелі і зв'язки панелей з опорами.

Конструкція стін із блоків (рис. 4) цікава тим, що блоки є шумопоглинаючими завдяки своїм отворах, а панелі з плексигласу відбивають шумові хвилі високих частот.



Рис. 4. Стіна з блоків та панелей армованого плексигласу зверху



Рис. 5. Шумозахисний екран з пластику з комбінованими панелями – непрозорими і прозорими

Тип закріплення стійок як правило визначається проєктною організацією з урахуванням несучих конструкцій. Частіше за все застосовуються:

- залізобетонні фундаменти з випусками арматури або болтами із фундаменту – такі конструкції можуть мати вигляд бетонного циліндра (кесона), стрічкових фундаментів або стійок;

- залізобетонні фундаменти з частково заглибленими стійками в армований або неармований моноліт, заглиблення здійснюється при виготовленні фундаменту на місці з фіксацією стійок на період набору бетоном необхідної міцності;

- неармовані бетонні фундаменти із заглибленням стійок на всю глибину (не доходячи приблизно 30 см до нижньої площини фундаменту);

- дерев'яні стійки, вмонтовані в циліндрові отвори із засипкою вільного простору крупним щебенем.

Панелі екранів або їх компоненти, як правило, виготовляються на заводі і транспортуються на місце виконання робіт. Розмір і конфігурацію панелей визначають проєктом. За винятком

конструкцій з дерев'яними опорами і деяких виробів, тип панелей мало залежить від типу опор. Наприклад: сталеві опори можуть використовуватися для бетонних, дерев'яних і металевих панелей. Панелі можуть бути розділені на дві основні категорії – на всю висоту прольоту і збірні, які укладаються одна на одну.

При виборі типу панелей необхідно враховувати наступні фактори [6]:



**відстань між опорами:** більша відстань між опорами економічно вигідніше, але при цьому може виникнути необхідність установки збірних панелей. Довгі вузькі панелі як правило менше піддаються деформаціям. Такі деформації значущі для міжпанельних швів і стиків, зв'язків між панелями і візуального сприйняття;

- **вимоги до перевезення:** у зв'язку з обмеженнями вантажів по висоті, що перевозяться автомобільними дорогами, великорозмірні панелі, які монтуються вертикально, слід транспортувати в горизонтальному положенні, а на місці – піднімати їх, що призводить до виникнення значних бокових навантажень;

- **обмеження по вазі і розмірах:** деякі збірні конструкції можуть мати обмеження по вазі і розмірах;

- **акустичні особливості:** при облаштуванні шумозахисних екранів із застосуванням збірних панелей особливу увагу слід приділити ізоляції горизонтальних швів між панелями;

- **естетичні міркування:** збірні панелі за своєю конструкцією утворюють горизонтальні шви, при замазуванні яких необхідно враховувати не тільки технічні аспекти, але й естетику. Горизонтальні шви панелей можуть покращувати естетичне сприйняття шумозахисного екрану;

- **особливості монтажу:** для монтажу бетонних панелей необхідне вантажопідйомне устаткування, особливо для панелей з важкого бетону. В деяких випадках (наприклад, якщо в екран повинен бути «врізаний» пішохідний перехід або міст) виникають складнощі при монтажі конструкцій. З іншого боку, використання великорозмірних панелей вимагає меншого числа підйомів і монтажних операцій і знижує кількість швів і стиків;

- **зручність в експлуатації:** необхідно враховувати можливість заміни елемента екрану у разі його пошкодження. Навіть при незначному пошкодженні великорозмірної панелі потрібна її заміна, тоді як для більш вузьких панелей витрати на заміну будуть значно меншими. Знову вмонтовуваний елемент по матеріалу, кольору, текстурі для великорозмірних панелей повинен бути аналогічний замінюваному, тоді як для вузьких панелей припустима деяка



різноманітність. Слід враховувати, що при операціях демонтажу-монтажу можливе додаткове пошкодження елементів;

- *зв'язок панелі і опори*: для зв'язку панелі з опорою існує декілька різних способів. При виборі методу зв'язку найбільш вагомі конструктивні і акустичні міркування, особливо при використанні різномірних матеріалів, таких як сталь, алюміній, пластмаса, скло та ін. Стик панелі з опорою не повинен погіршувати акустичні характеристики екрану, тому панелі повинні щільно прилягати до опори по всій площинній поверхні.

Будь-який ізоляційний матеріал повинен забезпечити щільний стик на розрахунковий термін служби конструкції. Стик повинен забезпечувати мінімізацію пошкоджень, що можуть виникнути при вібрації, незначних поштовхах і зсувах панелі або опори.

Постійне навантаження від панелі, як правило, трансформується на стику в точкове навантаження на фундамент або на верх кожної опори, якщо панель навішується на неї. Передача навантаження на приварювані, навішувані на вільні петлі або фіксовані болтами панелі різна.

Вітрове навантаження, навіть якщо розташування панелі відносно пануючих вітрів, сприяє рівномірному розподілу навантаження на обидві опори, розрахунок повинен проводитися до повного навантаження на одну опору.

Похилі опори і панелі (рис. 6) застосовуються у випадках, коли вертикальні стіни не можуть забезпечити необхідний шумозахист. Цей тип екранів як правило виготовляється із заздалегідь напружених залізобетонних елементів або пластику. Проте відомі і похилі екрани з дерева.



Рис. 6. Похилі шумозахисні екрани

Оскільки кут відхилення таких екранів звичайно біля 10 град., сторона, яка звернена до житлового сектора, не заважає людям. З естетичної точки зору перехід від вертикальних стін до похилих надає естетичне враження.

Стіни з каменю і блоків облаштовуються на стрічковому фундаменті. В деяких випадках екрани такого типу кладуться на балки, які спираються на фундаменти стійок опор.

Самонесучі шумозахисні стіни не мають проміжних опор і діляться на три основні типи: з готових бетонних елементів; з елементів ґратчастого типу з посадкою рослин; кладки з габіонів.

Екрани з готових бетонних блоків зазвичай збираються у вигляді ламаної зигзагоподібної стіни або у вигляді трапецій.

Екрани з елементів ґратчастого типу з посадкою рослин (рис. 7) виготовляють із матеріалів зі стабільною структурою типу бетону або пластику, з лунками, які заповнюють ґрунтом з рослинами. Для таких екранів найчастіше використовуються стрічкові бетонні фундаменти.

Залежно від конструкції та виду рослин екрани можуть спиратися безпосередньо на ґрунт. При облаштуванні цих екранів слід звертати особливу увагу на можливість відповідного догляду за рослинністю і заміни або ремонту окремих елементів.



Рис. 7. Шумозахисний екран поглинаючого типу «зелена стіна»

Кладка з габіонів облаштовується з крупного роздробленого щебеню, укладеного на жорстку сітку. З естетичних міркувань сітка може виготовлятися з пластику різних кольорів. Сітки укладаються одна на одну у вигляді стіни, що має в розрізі пірамідальний профіль.

Габіонні екрани звичайно облаштовуються на добре дренованих ущільнених ґрунтах [6]. Структура такого екрану достатньо гнучка, щоб витримувати незначні деформації основи. У деяких випадках такі екрани можуть служити сіткою для декоративних рослин.

Панелі, укопані в ґрунт і виготовлені із залізобетону або деревини (рис. 8), вкопуються в ґрунт без облаштування фундаменту. В таких системах наземна частина панелей відповідає розрахунковій висоті екрану, стиківка панелей – «паз у виступ». Це дозволяє одержувати різний в плані профіль екрану, проте через нерівномірність просадки ґрунту, верх екрану може виглядати нерівним. Просадка ґрунту може призвести до розкриття стиків, а також до відхилення окремих панелей від вертикалі.

У деяких випадках необхідно і доцільно засипати частину шумозахисного екрану ґрунтом з боку житлових забудов, або проїзної частини. Такі конструкції добре працюють при розташуванні екранів поблизу сповзаючих схилів або у виїмках. У цьому випадку проводиться монтаж панелей екрану на звичайний фундамент зі зворотною засипкою однієї сторони на висоту до 50 см від рівня землі. При цьому слід провести ретельний аналіз системи, щоб переконатися, що панелі, опори і стики можуть витримати додаткове постійне навантаження від досипаного ґрунту.



Рис. 8. Шумозахисні екрани з деревини на монолітному фундаменті

Дренаж стін слід облаштовувати так, щоб уникнути підпору води, перезволоження ґрунту зворотної засипки і замулювання дренажних отворів. Інші типи шумозахисних екранів (з бетонних блоків, самонесучих та ін.) також можуть розглядатися для зворотної засипки, але тільки після аналізу вищевказаних факторів.

Комбінація підірних стін і шумозахисних екранів, як правило, вимагає більшої глибини зворотної засипки. Це питання виділено в окремий різновид і розглянуто нижче.

Монолітні залізобетонні шумозахисні конструкції облаштовуються безпосередньо на місці. Їх будівництво включає виїмку ґрунту для фундаменту, монтаж опалубки, установку арматури, укладку бетону, ущільнення і обробку. За винятком деяких елементів фундаменту такі системи значно відрізняються від шумозахисних збірних конструкцій стінного типу з погляду будівництва, архітектури, естетики і методів контролю якості.

Більшість ефективних шумозахисних екранів отримують шляхом застосування у нижній частині насипу із ґрунту з розміщенням на її верху додаткової стінки. Для таких комбінованих шумозахисних екранів необхідно враховувати наступні фактори:

- навантаження на насип і реакція ґрунту насипу залежать від прольоту стіни. Ґрунт насипу відрізняється від звичайних ґрунтів. Такі фактори, як внутрішнє тертя і навантаження на ґрунт насипу, повинні розглядатися особливо ретельно, наприклад, повинна враховуватися площа між фундаментом стіни і укосами насипу, щоб уникнути виникнення зрізаючих навантажень;

- площа плоскої вершини насипу повинна забезпечувати стабільність основи стіни. Для цього мінімальна ширина майданчика по верху насипу повинна бути не менше 2 м. Це дозволить уникнути ерозії укосів.

**Висновки.** Беручи до уваги зменшення шуму за рахунок містобудування та проектування доріг, можемо виділити найбільш дієвий спосіб – це застосування шумозахисних екранів, які різняться своїм типом, формою та засобом використання. Отже, залежно від задачі, що стоїть перед проєктантами доріг, міст, можна використовувати різні типи екранів. Також можливо ці типи комбінувати для вирішення тих, чи інших завдань дорожньої інфраструктури та інфраструктури міст.

1. Vibha D. How to Reduce Traffic Noise? | Noise Pollution URL: <https://www.environmentalpollution.in/noise-pollution/reduce/how-to-reduce-traffic-noise-noise-pollution/5996> (дата звернення: 15.02.2022).

2. Fleming, Gregg G., A. Rapoza, C. Lee. Development of National Reference Energy Mean Emission Levels for the FHWA Traffic Noise Model. Report No. FHWA-PD-96-008 and DOT-VNTSC-96-2. Cambridge MA : John A. Volpe

National Transportation Systems Center, Acoustics Facility, November 1995. **3.** Fleming, Gregg G., E. Rickley. Performance Evaluation of Experimental Highway Noise Barriers. Report No. DOT-VNTSC-FHWA-94-16 and FHWA-RD-94-093. Cambridge MA : John A. Volpe National Transportation Systems Center, 1994. **4.** Gordon C. G., Galloway W. J., Kugler B. A. and Nelson D. L. NCHRP Report 117: Highway Noise: A Design Guide for Highway Engineers. HRB, National Research Council, Washington, D.C., 1971. **5.** ГБН В.2.3-37641918-556:2015. Автомобільні дороги. Споруди шумозахисні. Вимоги до проектування.

## REFERENCES:

1. Vibha D. How to Reduce Traffic Noise? | Noise Pollution URL: <https://www.environmentalpollution.in/noise-pollution/reduce/how-to-reduce-traffic-noise-noise-pollution/5996> (data zvernennia: 15.02.2022).
2. Fleming, Gregg G., A. Rapoza, C. Lee. Development of National Reference Energy Mean Emission Levels for the FHWA Traffic Noise Model. Report No. FHWA-PD-96-008 and DOT-VNTSC-96-2. Cambridge MA : John A. Volpe National Transportation Systems Center, Acoustics Facility, November 1995.
3. Fleming, Gregg G., E. Rickley. Performance Evaluation of Experimental Highway Noise Barriers. Report No. DOT-VNTSC-FHWA-94-16 and FHWA-RD-94-093. Cambridge MA : John A. Volpe National Transportation Systems Center, 1994. **4.** Gordon C. G., Galloway W. J., Kugler B. A. and Nelson D. L. NCHRP Report 117: Highway Noise: A Design Guide for Highway Engineers. HRB, National Research Council, Washington, D.C., 1971. **6.** HBN V.2.3-37641918-556:2015. Avtomobilni dorohy. Sporudy shumozakhysni. Vymohy do proektuvannia.

---

**Laslov S. V.** (National Transport University, Kyiv)

## ANALYSIS OF NOISE SAFETY MEASURES ON THE WORLD ROADS

**The work carried out an analysis of existing project measures to protect the environment from noise load on roads of the countries of the world. The main classifiers of noise protection of the natural environment are given. Features of some solutions for designing cities and roads in the context of noise protection are considered.**

**Options for reducing noise pollution by methods of construction of tunnels and green spaces are given. Various factors were identified when applying the methods considered – both positive and negative.**

**Positive and negative factors are considered when using these methods in urban and non-urban conditions.**

**The environmental protection method such as the use of noise shields is discussed in more detail.**

**It was found that the most effective measures of the impact of noise load on the environment is the installation of noise protection screens along roads.**

**The main types of noise shields used in the world, their peculiarities and qualitative characteristics are given.**

**It is established that reducing the speed of road transport is a measure of reducing the noise level of road transport. On high-speed roads, reducing the average speed of the car by 2 times can reduce the equivalent noise level by 5–6 dB.**

**It has been found that some success in noise reduction can be achieved with the appropriate tread pattern configuration and tire design. However, the design of tires with significantly reduced noise level contradicts the urgent need to ensure traffic safety, prevent heating of the tread and ensure the economy of the car.**

**Most effective noise shields are made by applying soil at the bottom of the embankment with an additional wall on top. For such combined noise protection screens, the following factors must be taken into account: the load on the embankment and the reaction of the embankment soil depend on the span of the wall.**

**Keywords:** noise pollution; noise load; tunnels; greenery; noise protection screen; diffraction; types of noise protection screens; noise reduction; panels of noise protection screens.

Тверда О. Я., д.т.н., доцент, Ткачук К. К., д.т.н., професор,  
Кофанов О. Є., к.т.н., старший викладач, Кофанова О. В., д.п.н.,  
к.х.н., професор, Вовк О. О., д.т.н., професор, Бондаренко А. О.,  
студентка (Національний технічний університет України «Київський  
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ,  
tverdaya@ukr.net)



Національний університет  
та природокористування

## ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ВИДОБУТКУ БУДІВЕЛЬНОЇ СИРОВИНИ ТА ВИРОБНИЦТВА БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ ПОРУШЕНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ УКРАЇНИ

Втрати економіки України від пошкодження фізичної інфраструктури з початку повномасштабного вторгнення РФ уже становлять понад \$100 млрд. Така ситуація вимагає нарощення видобутку будівельної сировини та виробництва будівельних матеріалів для відновлення інфраструктури України у воєнний і післявоєнний періоди. У статті розроблено комплексний підхід щодо інтенсифікації видобутку будівельної сировини та виробництва будівельних матеріалів, який включає три основні напрямки. Напрямок 1 – збільшення виробничих потужностей гірничо-збагачувальних комбінатів без компромісів щодо впливу на навколишнє середовище (зокрема, удосконалення технології видобутку або перехід на ресурсозберігаючі (безвідходні) технології видобутку, модернізація обладнання тощо); напрям 2 – розробка техногенних родовищ; напрям 3 – утилізація будівельних відходів, що утворилися внаслідок війни.

**Ключові слова:** видобуток будівельної сировини; виробництво будівельних матеріалів; відновлення інфраструктури; післявоєнний період; інтенсифікація видобутку.

**Вступ.** Станом на 25 травня 2022 року загальна сума прямих збитків економіки України від пошкодження та руйнування житлових і нежитлових будівель та інфраструктури вже перевищує \$105,5 млрд (або понад 3,1 трлн грн). Загальна сума збитків житлового фонду складає \$39,3 млрд. Загалом через війну пошкоджено, зруйновано чи втрачено понад 44 млн квадратних метрів житла українців. Загальна

сума прямих задокументованих збитків українських підприємств і бізнесу сягає вже \$11,3 млрд.

З початку війни РФ проти України пошкоджено чи зруйновано щонайменше 227 підприємств, заводів і фабрик. Внаслідок війни постраждало щонайменше 2910 торгових точок, а сумарні збитки складають \$1,4 млрд. З початку війни Росії проти України пошкоджено, зруйновано або захоплено щонайменше 23,8 тисяч кілометрів доріг, 6,3 тисяч залізничних колій та 41 залізничний міст, 643 заклади охорони здоров'я, 1123 заклади освіти, 621 дитсадок, 192 культурні та 115 релігійних споруд, 178 складів, 99 адмінбудівель, 28 нафтобаз, 19 торгових центрів [1].

Питання відновлення інфраструктури України на сьогодні є одним із ключових і розглядається на відомих міжнародних майданчиках, зокрема знаходиться у фокусі Саміту міжнародного транспортного форуму 2022 і Конференції європейських директорів доріг (CEDR). Європейська комісія затвердила стратегічний план «Відновлення України», в якому окреслено ключові реформи та інвестиції, необхідні для побудови процвітаючого і сталого майбутнього України.

За пропозицією Президента України запущено глобальну ініціативу – United24, завдяки якій люди з усього світу можуть долучитися до допомоги Україні. Наразі до складу United24 (скорочено – U24) входить однойменна фандрейзингова платформа @u24.gov.ua. Її ціль – збільшити пожертви на користь України, зокрема, акумулювавши благодійні внески міжнародних партнерів, донорів і публічних осіб. Пожертви спрямовуються за трьома напрямками, один із яких Rebuild Ukraine – Відбудова України. Кошти, залучені за цим напрямом, будуть спрямовані на відновлення інфраструктури, зокрема доріг, мостів, портів, аеропортів тощо [2].

Отже, це спричиняє необхідність інтенсифікації видобутку будівельної сировини та виробництва будівельних матеріалів для відновлення інфраструктури України у воєнний і післявоєнний періоди.

**Мета роботи** – розробити комплексний підхід щодо інтенсифікації видобутку будівельної сировини та виробництва будівельних матеріалів для відновлення інфраструктури України у воєнний і післявоєнний періоди.

**Виклад основного матеріалу.** Для відновлення інфраструктури України пропонується комплексний підхід щодо інтенсифікації



видобутку будівельної сировини та виробництва будівельних матеріалів, який включає три основні напрями (рис. 1):

– збільшення виробничих потужностей гірничо-збагачувальних комбінатів без компромісів щодо впливу на навколишнє природне середовище (удосконалення технології видобутку або перехід на ресурсозберігаючі (безвідходні) технології видобутку, модернізація машин та обладнання) – напрям 1;

– розробка техногенних родовищ – напрям 2;

– утилізація будівельних відходів, що утворилися внаслідок війни – напрям 3.

За першим напрямом кафедра геоінженерії КПІ ім. Ігоря Сікорського активно працює впродовж останніх років. До прикладу, розроблено циклічно-поточну технологію виробництва щебеню на гранітних кар'єрах, яка полягає у застосуванні сучасної гіраційної дробарки, розташованої на двох спарених уступах в зоні кар'єру, та поєднанні її з крутопохилим конвеєром. Це дозволяє скоротити кількість проміжного транспортно-навантажувального обладнання та підвищити продуктивність кар'єру, в тому числі екстрену сезонну [3].



Рис. 1. Комплексний підхід щодо інтенсифікації видобутку будівельної сировини та виробництва будівельних матеріалів

Вченими кафедри удосконалено конструкцію заряду, яка передбачає застосування радіального проміжку між зарядом і стінкою свердловини, заповненого суспензією кальцій гідроксиду або кальцій

карбонату. При застосуванні як заповнювача проміжку суспензії кальцій гідроксиду  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  з'являється можливість повної нейтралізації усіх шкідливих газів, що утворюються під час вибуху ( $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{CO}_2$  та інших). При застосуванні ж кальцій карбонату  $\text{CaCO}_3$  можна нейтралізувати усі шкідливі гази, крім карбон(II) оксиду.

За умови використання вибухових речовин, що містять Сульфур, оскільки за умови проведення вибухових робіт у сульфуровмісних породах нейтралізація сполук Сульфуру, зокрема  $\text{SO}_2$  і  $\text{H}_2\text{S}$ , буде досягатись за допомогою подібних механізмів [4]. Проте у такому випадку більш ефективним буде використання саме кальцій гідроксиду як заповнювача радіального проміжку між зарядом і стінкою свердловини.

Отже, розроблена конструкція заряду дозволяє суттєво знизити пік тиску в ближній до заряду зоні, тобто зменшити зону переподрібнення, і таким чином не тільки знизити втрати корисної копалини, а й нейтралізувати шкідливі гази, що утворюються при вибуху. Конструкція заряду може бути використана в нерудних кар'єрах з видобутку будівельної сировини для підвищення їхньої виробничої потужності.

У процесі багаторічних досліджень розроблено також два типи забійки свердловинних зарядів, які, окрім запирання продуктів вибуху, надають змогу повністю нейтралізувати шкідливі гази. Перший тип – конструкція забійки свердловини, яка передбачає двостадійну очистку від шкідливих газів, утворених у процесі вибухового руйнування скельних порід, і базується на хемосорбції газів негашеним вапном (або відходами виробництва, що його включають) та фізико-хімічній сорбції (адсорбції) цеолітами [5]. Така забійка дозволяє під час вибуху практично повністю нейтралізувати  $\text{NO}_2$  і  $\text{CO}_2$ , а також поглинути  $\text{CO}$  за допомогою цеолітів.

Другий тип – конструкція забійки свердловини, яка включає хемосорбцію газів гашеним вапном. Цей тип забійки має кілька переваг у порівнянні із першим типом. Він дозволяє не лише повністю нейтралізувати такі газоподібні забруднювачі, як  $\text{NO}_2$ ,  $\text{CO}_2$  і  $\text{CO}$ , але і відмовитися від використання цеолітів, що значно зменшує витрати на формування забійки, регенерацію цеолітів тощо, а також дає змогу отримати ефект «зрошення» пилогазової хмари, що зменшує концентрацію пилу в повітрі після вибуху [6]. Схему конструкції заряду та забійки представлено на рис. 2.

За напрямом 2 авторами розроблено технологічну схему утилізації відходів гірничого виробництва для отримання скловолокна [8], яка передбачає вилучення гірської породи з відвалів каменедробильних заводів, тонкий помел відходів до фракції 0,1–0,5 мм, вилучення ферум(III) оксиду на магнітному сепараторі, додавання оксидів Бору  $B_2O_3$  і Магнію  $MgO$  у необхідних пропорціях, подачу сировини до скловарної печі для виробництва скловолокна. Вилучений  $Fe_2O_3$  може бути у подальшому використаний, наприклад, для виробництва пігменту для фарб.

Отже, виробництво щебеню та виробництво скловолокна на основі запропонованої технології, а також виробництво пігменту для фарб з видобутого ферум(III) оксиду, дозволяють впровадити на гірничо-збагачувальних комбінатах безвідходну технологію виробництва будівельних матеріалів, що і було запропоновано для ТОВ «Гранітпромінвест» у межах договору Д/0201.01/2400.01/278/2021 від 23.07.2021 «Способи утилізації відходів видобування будівельного та декоративного каменю». Наразі тривають дослідження щодо можливості вилучення високочистого Силіцій(IV) оксиду із відходів виробництва кварцитового щебеню.

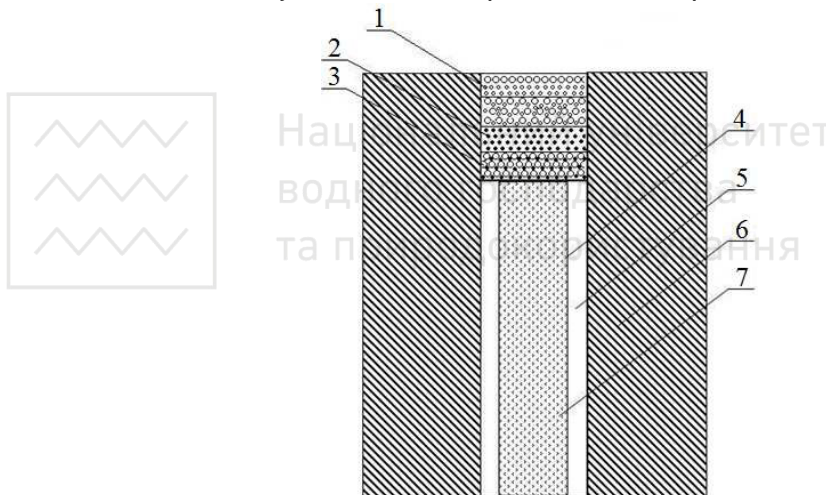


Рис. 2. Ресурсозберігаюча конструкція заряду та забійки [7]:

- 1 – цеоліт; 2 – негашене вапно; 3 – щебінь фракції 5–25 мм;
- 4 – поліетиленовий рукав; 5 – проміжок між зарядом і стінкою свердловини;
- 6 – гірська порода; 7 – вибухова речовина

Пропозиції авторів за напрямом 3 значною мірою залежать від типу відходів (завалів), які будуть розбиратись, і можуть бути напрацьовані у короткі терміни на основі існуючих і перспективних розробок кафедри геоінженерії. В цілому ж утилізація відходів будівництва може здійснюватися у таких напрямках:

– повторне використання у новому будівництві окремих частин будинків (фундаменти, стіни) або їхніх окремих конструкцій (балки, плити, колони) за прямим призначенням;

– або у разі неможливості реалізації першого варіанту – переробка будівельних відходів для їх використання в якості вторинних (повторно перероблених) сировинних матеріалів.

**Висновки.** У статті запропоновано комплексний підхід для вирішення завдань інтенсифікації видобутку будівельної сировини та виробництва будівельних матеріалів для відновлення інфраструктури України у воєнний і післявоєнний періоди. Підхід включає три напрями: збільшення виробничих потужностей гірничо-збагачувальних комбінатів без компромісів щодо впливу на навколишнє середовище (зокрема удосконалення технології видобутку або перехід на ресурсозберігаючі (безвідходні) технології видобутку, модернізація машин та обладнання); розробка техногенних родовищ; утилізація будівельних відходів, що утворилися внаслідок війни.

Перший напрям можливо реалізувати за рахунок впровадження ощадних вибухових методів руйнування, використання циклічно-поточної технології на кар'єрах будівельної промисловості, модернізації обладнання тощо. В межах другого напрямку запропоновано залучати для виробництва скловолокна, фарбників та інших будівельних матеріалів відходи переробки будівельної сировини. Це дозволить значно інтенсифікувати використання вже добутої природної сировини та отримати додаткові доходи від її глибшої переробки з отриманням нових продуктів виробництва. В умовах зростання попиту на будівельну сировину та необхідності розбору зруйнованих об'єктів інфраструктури України у рамках третього напрямку запропоновано повторне залучення будівельних матеріалів у будівництво та інші галузі після їх сепарації, що значно знизить навантаження на видобувну промисловість.

1. «Росія заплатить». Проект зі збору, оцінки й аналізу інформації про матеріальні втрати України від війни з Росією. URL:

<https://kse.ua/ua/russia-will-pay/> (дата звернення: 15.02.2022).  
**2.** Міністерство інфраструктури України : вебсайт. URL: <https://mtu.gov.ua/> (дата звернення: 15.02.2022).  
**3.** Диняк С. В. Розробка циклічно-поточної технології виробництва щебеню на гранітних кар'єрах : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.15.03 / НТУУ «КПІ». Київ, 2016. 16 с.  
**4.** A resource efficient and environmentally safe charge structure for mining in an open-pit / Tverda O., Kofanova O., Repin M., Kofanov O., Tkachuk K., Guts N., Cabana E. *Mining of Mineral Deposits*. 2021. Vol. 15 (2021), Issue 4. P. 84–90.  
**5.** Тверда О. Я., Пляцук Л. Д. Розробка конструкції забійки свердловинного заряду із двоступеневою системою поглинання шкідливих газів. *Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва*. 2018. Вип. 1/2018 (21). С. 103–115. DOI: 10.30929/2074-1537.2018.1.103-115. URL: [http://www.kdu.edu.ua/GV\\_jurnal/GV\\_1\\_2018\(21\)/103-115.pdf](http://www.kdu.edu.ua/GV_jurnal/GV_1_2018(21)/103-115.pdf)  
**6.** Gas-neutralizing and dust-suppressing stemming of borehole charges for increasing the environmental safety of explosion / Tverda O., Kofanova O., Kofanov O., Tkachuk K., Polukarov O., Pobigaylo V. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*. 2021. Vol. 58, Issue 4. P. 15–27. DOI: 10.2478/lpts-2021-0030.  
**7.** Тверда О. Я., Ткачук К. К. Результати промислових випробувань ресурсозберігаючої та екологічно ефективної конструкції свердловинного заряду. *Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва*. 2019. Вип. 1/2019 (23). С. 47–57. DOI: 10.30929/2074-1537.2019.1.47-57. URL: [http://www.kdu.edu.ua/GV\\_jurnal/GV\\_1\\_2019\(23\)/47-57.pdf](http://www.kdu.edu.ua/GV_jurnal/GV_1_2019(23)/47-57.pdf) (дата звернення: 15.02.2022).  
**8.** Waste-Free Technology for The Production of Building Materials by Mining and Processing Plants / Vovk O., Tkachuk K., Tverda O., Syniuk A., Kukuiashnyi E. *International Symposium on Sustainable Aviation – ISSA21 – Abstract Book*. 2021. P. 50. URL: <https://2021.issasci.org/wp-content/uploads/2022/03/ISSA21-Abstract-Book.pdf> (дата звернення: 15.02.2022).

## REFERENCES:

**1.** «Rosiiia zaplatyt». Proiekt zi zboru, otsinky y analizu informatsii pro materialni vtraty Ukrainy vid viiny z Rosiieiu. URL: <https://kse.ua/ua/russia-will-pay/> (data zvernennia: 15.02.2022).  
**2.** Ministerstvo infrastruktury Ukrainy: vebсайт. URL: <https://mtu.gov.ua/> (data zvernennia: 15.02.2022).  
**3.** Dyniak S. V. Rozrobka tsyklichno-potochnoi tekhnolohii vyrobnytstva shchebeniu na hranitnykh karierakh : avtoref. dys. ... kand. tekhn. Nauk : 05.15.03 / NTUU «KPI». Kyiv, 2016. 16 s.  
**4.** A resource efficient and environmentally safe charge structure for mining in an open-pit / Tverda O., Kofanova O., Repin M., Kofanov O., Tkachuk K., Guts N., Cabana E. *Mining of Mineral Deposits*. 2021. Vol. 15 (2021), Issue 4. P. 84–90.  
**5.** Tverda O. Ya., Pliatsuk L. D. Rozrobka konstruktсии zabiiky sverdlovyynnoho zariadu iz

dvostupenevoiu systemoiu pohlynannia shkidlyvykh haziv. *Suchasni resursoenerhozberihaiuchi tekhnolohii hirnychoho vyrobnytstva*. 2018. Vyp. 1/2018 (21). S. 103–115. DOI: 10.30929/2074-1537.2018.1.103-115. URL: [http://www.kdu.edu.ua/GV\\_jurnal/GV\\_1\\_2018\(21\)/103-115.pdf](http://www.kdu.edu.ua/GV_jurnal/GV_1_2018(21)/103-115.pdf) (data zvernennia: 15.02.2022). **6.** Gas-neutralizing and dust-suppressing stemming of borehole charges for increasing the environmental safety of explosion / Tverda O., Kofanova O., Kofanov O., Tkachuk K., Polukarov O., Pobigaylo V. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*. 2021. Vol. 58, Issue 4. P. 15–27. DOI: 10.2478/lpts-2021-0030. **7.** Tverda O. Ya., Tkachuk K. K. Rezultaty promyslovykh vyprobuvan resursozberihaiuchoi ta ekolohichno efektyvnoi konstruksii sverdlovynnoho zariadu. *Suchasni resursoenerhozberihaiuchi tekhnolohii hirnychoho vyrobnytstva*. 2019. Vyp. 1/2019 (23). S. 47–57. DOI: 10.30929/2074-1537.2019.1.47-57. URL: [http://www.kdu.edu.ua/GV\\_jurnal/GV\\_1\\_2019\(23\)/47-57.pdf](http://www.kdu.edu.ua/GV_jurnal/GV_1_2019(23)/47-57.pdf) (data zvernennia: 15.02.2022). **8.** Waste-Free Technology for The Production of Building Materials by Mining and Processing Plants / Vovk O., Tkachuk K., Tverda O., Syniuk A., Kukuiashnyi E. *International Symposium on Sustainable Aviation – ISSA21 – Abstract Book*. 2021. P. 50. URL: <https://2021.issasci.org/wp-content/uploads/2022/03/ISSA21-Abstract-Book.pdf> (data zvernennia: 15.02.2022).

---

**Tverda O. Yu., Doctor of Engineering, Associate Professor, Tkachuk K. K., Doctor of Engineering, Professor, Kofanov O. Ye., Candidate of Engineering (Ph.D.), Senior Lecturer, Kofanova O. V., Doctor of Pedagogical Sciences, Candidate of Chemical Sciences (Ph.D.), Professor, Vovk O. O., Doctor of Engineering, Professor, Bondarenko A. O., Senior Student** (National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv)

## **INTENSIFICATION OF CONSTRUCTION RAW MATERIALS EXTRACTION AND BUILDING MATERIALS PRODUCTION FOR RESTORATION OF UKRAINIAN INFRASTRUCTURE**

**The losses of Ukraine's economy from damage to physical infrastructure since the beginning of hostilities already amount to more than \$ 100 billion. This situation will lead to the need to increase the raw materials extraction and building materials production to restore the infrastructure of Ukraine in the postwar period. A comprehensive approach to the raw materials extraction and building**

materials production has been developed. It includes three areas. Direction 1 – increase in production capacity of mining and processing plants without compromising on influence to the environment (improvement of extraction technology or transition to resource-saving (waste-free) extraction technologies, modernization of machinery and equipment). Direction 2 – development of technogenic deposits. Direction 3 – utilization of construction waste generated as a result of the war. Direction 1 can be implemented through the introduction of resource-saving mining technologies, for example, cyclic-current technology of crushed stone production, which consists in the use of modern gyro crusher located on two paired ledges in the quarry area and combining it with a steep conveyor, which will reduce the amount of intermediate transport equipment and increase quarry productivity. It can also be implemented by improving technological parameters, for example, the use of resource-saving and environmentally friendly design of charge and stemming, which together can reduce mineral losses and completely neutralize harmful gases during the explosive destruction of the rock. In the second direction it is proposed to develop technogenic deposits, to involve for the production of fiberglass, dyes and other building materials wastes from the processing of construction raw materials. It will allow to intensify the use of already extracted natural raw materials and receive additional income from its deeper processing to obtain new products. In the conditions of growing demand for construction raw materials and the need to dismantle the post-war destroyed infrastructure facilities of Ukraine the re-involvement of construction materials in construction and other industries after their separation and, if necessary, processing is proposed under the third direction. This will reduce the burden on the mining industry, and in turn on the environment.

**Keywords:** extraction of construction raw materials; production of construction materials; restoration of infrastructure; post-war period; intensification of extraction.

---

**Дворкін Л. Й., д.т.н., професор, Марчук В. В., к.т.н., доцент**  
(Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

## ПОРИЗОВАНІ СУХІ СУМІШІ НА ОСНОВІ РЕАКЦІЙНО-ПОРОШКОВИХ БЕТОНІВ


**У статті показано можливість отримання поризованих та теплоізоляційних сумішей на основі реакційно-порошкових бетонів. Наведено результати експериментальних досліджень розчинів та сухих будівельних сумішей на основі реакційно-порошкових бетонів. Показано можливість отримання таких розчинів. Наведено і проаналізовано експериментально-статистичні моделі технологічних та фізико-механічних властивостей розчинових сумішей та розчинів, показано шляхи їх покращення.**

**Ключові слова:** портландцемент; реакційно-порошковий бетон; будівельний розчин; міцність; суперпластифікатор.

Сухі будівельні суміші (СБС) стають все більше актуальними в будівництві завдяки перевагам у порівнянні з товарними розчиновими сумішами [1; 2]. В деяких випадках стає неефективною експлуатація великих заводів з виробництва товарних розчинових сумішей внаслідок підвищення транспортних витрат. Використання СБС сприяє підвищенню продуктивності праці і якості робіт, зниженню витрат на транспортування і зберігання, скороченню технологічних операцій. Можливість управління основними властивостями СБС шляхом зміни вмісту різних компонентів створює широкий асортимент необхідних для зведення споруд матеріалів і тим самим дозволяє використовувати їх при виконанні всіх видів робіт.

Реакційно-порошкову бетону суміш (РПБ) до замішування водою можна розглядати як сухі суміші, що містять в'язуче (портландцемент), дисперсний наповнювач (дрібний пісок, зола та інші) і суперпластифікатор, а також добавки-модифікатори (мікрокремнезем, метакаолін та інші) [3]. Ці суміші забезпечують високу міцність, адгезійну здатність та довговічність бетонів та





розчинів у різних умовах експлуатації [4; 5]. Коректуючи склади РПБ різними компонентами можна досягати необхідних властивостей сухих сумішей, розчинів та бетонів різного призначення [6]. Високі механічні характеристики РПБ можна пояснити підвищенням однорідності РПБ шляхом усунення крупних заповнювачів, а також підвищенням щільності бетону шляхом оптимізації зернового складу суміші. На основі проведених досліджень [5–7], як один з базових може бути рекомендований склад РПБ (ПЦ-I – 35%, зола-винесення – 15%, кварцовий пісок фр. 0,15...0,63 – 50%, полікарбоксилатний суперпластифікатор 0,5% від маси цементу). Міцність РПБ при стиску у віці 1 доба становила 38,8 МПа, у віці 7 діб – 87,0 МПа, у віці 28 діб – 112,1 МПа.

Для підвищення термічного опору конструкцій при зведенні будівель та споруд доцільно використовувати поризовані розчини. Поризовані розчини на основі сухих сумішей при відповідності їх властивостей необхідним вимогам можуть успішно використовуватись для влаштування «теплих підлог», як штукатурні, а також мурувальні розчини при застосуванні стінових матеріалів з підвищеними теплоізоляційними властивостями (поризовані керамічні блоки, піно-, газобетонні блоки і т.п.). Ефект від застосування таких матеріалів зростає, якщо теплопровідність розчину для кладки не поступається аналогічному показнику стінового матеріалу. Як відомо, традиційні цементно-піщані розчини мають високу теплопровідність (0,8–0,9 Вт/м·К), що особливо негативно відображається в кладці з поризованих блоків (0,16 Вт/м·К), які вони скріплюють, в результаті чого в такій конструкції в місцях шва утворюються «містки холоду». При застосуванні таких розчинів збільшення товщини швів до 10 мм призводить до зниження середнього термічного опору конструкції приблизно на 20%.

Зазвичай традиційна технологія передбачає нанесення розчинів шаром 10–20 мм. Сучасні стінові камені та блоки виготовляються з мінімальними (до 1 мм) відхиленнями геометричних розмірів від стандартних, що дає можливість використовувати шов 1–5 мм, що сприяє суттєвій економії розчину. Розчини для тонкошарової кладки повинні мати теплопровідність, яка близька до теплопровідності пористих стінових матеріалів. Поряд зі зменшенням теплових витрат такі розчини повинні забезпечувати високу адгезію до основи, водо- та морозостійкість.

**3 метою вивчення** впливу факторів складу на міцнісні характеристики полегшених розчинів на основі РПБ, а також встановлення оптимальних параметрів їх виготовлення основні дослідження були виконані із застосуванням математичного планування експериментів. Для цього був реалізований трирівневий трифакторний план  $B_3$  [8], умови планування експериментів наведено в табл. 1.

Як добавка-поризатор розчинів був застосований піноутворювач UFAPORE CC85 концерн *Mareil*. Даний поризатор є сумішшю аніоноактивних ПАР. Рекомендоване дозування добавки при введенні в мурувальні розчини – 0,02–0,05% маси в'язучого. Окрім пластифікації та підвищення морозостійкості розчину, добавка поризатора дещо знижує водовідділення і розшарування розчинних сумішей [3].

Для підвищення ефективності введення суперпластифікаторів, а також при виконанні робіт у холодну пору року, при температурах нижче 5° С доцільне введення прискорювача тверднення  $Na_2SO_4$ .

Таблиця 1

Умови планування експериментів

Фактори		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
Натуральний вид	Кодований вид	-1	0	+1	
Відношення РПБ до заповнювача, (РПБ/Зап.)	$X_1$	1:3	1:2	1:1	-
Вміст добавки Ufaroge у розчині, %	$X_2$	0,04	0,075	0,11	0,035
Вміст $Na_2SO_4$ , у розчині, % від РПБ	$X_3$	0	1	2	1

У ході досліджень виготовляли розчини на основі РПБ, у яких в якості заповнювача використовували золу-виносу та кварцовий пісок. Рухомість розчинів становила 180 мм за розпливом на віскозиметрі Суттарда. Для розчинової суміші визначали водов'язуче відношення, яке забезпечує необхідну рухомість, для отриманих розчинів – середню густину ( $\rho_0$ ) та міцність на стиск ( $f_m$ ) зразків-кубів з ребром 70,7 мм, які тверднули у повітряно-сухих умовах у віці 3 та 28 діб згідно з ДСТУ Б В.2.7-126:2011. Основні експериментальні результати досліджень поризованих розчинів на основі РПБ наведено в табл. 2.

Після проведення обробки і статистичного аналізу

експериментальних даних були отримані математичні моделі властивостей у вигляді поліноміальних рівнянь регресії, які наведено в табл. 3, і відповідні графічні залежності середньої густини та міцності у віці 3 та 28 діб – на рис. 1–3.

Аналізуючи отримані дані, можна відмітити, що поризація розчинів і відповідно вміст добавки-поризатора помітно збільшує їх рухомість згідно з табл. 2 та рис. 1. Водопотреба розчинових сумішей для досягнення необхідної легкоукладальності суттєво зменшується при збільшенні кількості добавки-пороутворювача, але до певної межі, яка залежить від середньої густини отриманої розчинової суміші та співвідношення «в'яжуче:заповнювач».

Таблица 2

Експериментальні результати досліджень поризованих розчинів

№	Фактори			В/Ц		Середня густина, $\rho_0$ , кг/м <sup>3</sup>		Міцність у віці діб, МПа,			
	РПБ Зап	Ufapore, %	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , %	Зола	Пісок	Зола	Пісок	Зола		Пісок	
								3	28	3	28
1	1:1	0,11	2	0,4	0,34	1180	1320	8,9	15,4	10,2	17,7
2	1:1	0,11	0	0,38	0,32	1170	1310	8,1	14,0	9,2	16,0
3	1:1	0,04	2	0,51	0,43	1340	1490	12,7	21,9	14,7	25,4
4	1:1	0,04	0	0,5	0,43	1320	1470	11,7	20,1	13,6	23,3
5	1:3	0,11	2	0,55	0,47	1360	1550	6,1	10,5	7,0	12,1
6	1:3	0,11	0	0,53	0,45	1350	1540	5,7	9,8	6,5	11,2
7	1:3	0,04	2	0,66	0,56	1400	1590	7,8	13,4	9,0	15,5
8	1:3	0,04	0	0,64	0,54	1390	1580	7,0	12,0	7,9	13,6
9	1:1	0,075	1	0,45	0,38	1210	1370	10,0	17,2	11,4	19,6
10	1:3	0,04	1	0,65	0,55	1390	1580	7,4	12,7	8,6	14,7
11	1:2	0,11	1	0,45	0,38	1200	1380	8,4	14,5	9,5	16,4
12	1:2	0,04	1	0,53	0,45	1290	1470	11,7	20,2	13,6	23,4
13	1:2	0,075	2	0,5	0,43	1250	1440	10,9	18,8	12,3	21,2
14	1:2	0,075	0	0,48	0,41	1240	1430	9,9	17,1	11,4	19,7
15	1:2	0,075	1	0,49	0,42	1250	1450	10,3	17,8	11,7	20,3
16	1:2	0,075	1	0,5	0,43	1250	1440	10,3	17,7	11,6	20,0
17	1:2	0,075	1	0,49	0,42	1240	1440	10,2	17,5	11,7	20,1

При однаковому вмісті пороутворювача зменшення співвідношення «РПБ:Заповнювач» від 1:1 до 1:2 незначно зменшує водопотребу розчинової суміші, у якій заповнювачем є зола-виносу.

При цьому водов'язуче відношення дещо збільшується. Подальше зменшення співвідношення «РПБ:Заповнювач» до 1:3 помітно зменшує водопотребу та водоцементне відношення. Заміна золи як заповнювача на кварцовий пісок суттєво зменшує водопотребу та збільшує рухомість розчинової суміші.

Таблиця 3

Експериментально-статистичні моделі властивостей розчинів на основі РПБ

Заповнювач	Експериментально-статистичні моделі	
зола	$\rho_{0(z)} = 1246 - 67 \cdot x_1 - 48 \cdot x_2 + 6 \cdot x_3 - 28,8 \cdot x_1 x_2 + 1,3 \cdot x_1 x_3 - 1,3 \cdot x_2 x_3 + 59 \cdot x_1^2 + 4 \cdot x_2^2 + 4 \cdot x_3^2$	(1)
пісок	$\rho_{0(n)} = 1440 - 88 \cdot x_1 - 50 \cdot x_2 + 6 \cdot x_3 - 31,3 \cdot x_1 x_2 + 1,3 \cdot x_1 x_3 - 1,3 \cdot x_2 x_3 + 43,5 \cdot x_1^2 - 6,5 \cdot x_2^2 + 3,5 \cdot x_3^2$	(2)
зола	$f_m^3 = 10,3 + 1,75 \cdot x_1 - 1,36 \cdot x_2 + 0,41 \cdot x_3 - 0,54 \cdot x_1 x_2 + 0,08 \cdot x_1 x_3 - 0,08 \cdot x_2 x_3 - 1,64 \cdot x_1^2 - 0,25 \cdot x_2^2 + 0,09 \cdot x_3^2$	(3)
пісок	$f_m^3 = 11,76 + 2,01 \cdot x_1 - 1,64 \cdot x_2 + 0,46 \cdot x_3 - 0,69 \cdot x_1 x_2 + 0,06 \cdot x_1 x_3 - 0,09 \cdot x_2 x_3 - 1,79 \cdot x_1^2 - 0,24 \cdot x_2^2 + 0,06 \cdot x_3^2$	(4)
зола	$f_m^{28} = 17,77 + 3,02 \cdot x_1 - 2,34 \cdot x_2 + 0,7 \cdot x_3 - 0,94 \cdot x_1 x_2 + 0,14 \cdot x_1 x_3 - 0,14 \cdot x_2 x_3 - 2,83 \cdot x_1^2 - 0,43 \cdot x_2^2 + 0,16 \cdot x_3^2$	(5)
пісок	$f_m^{28} = 20,26 + 3,49 \cdot x_1 - 2,78 \cdot x_2 + 0,81 \cdot x_3 - 1,15 \cdot x_1 x_2 + 0,13 \cdot x_1 x_3 - 0,18 \cdot x_2 x_3 - 3,15 \cdot x_1^2 - 0,4 \cdot x_2^2 + 0,15 \cdot x_3^2$	(6)

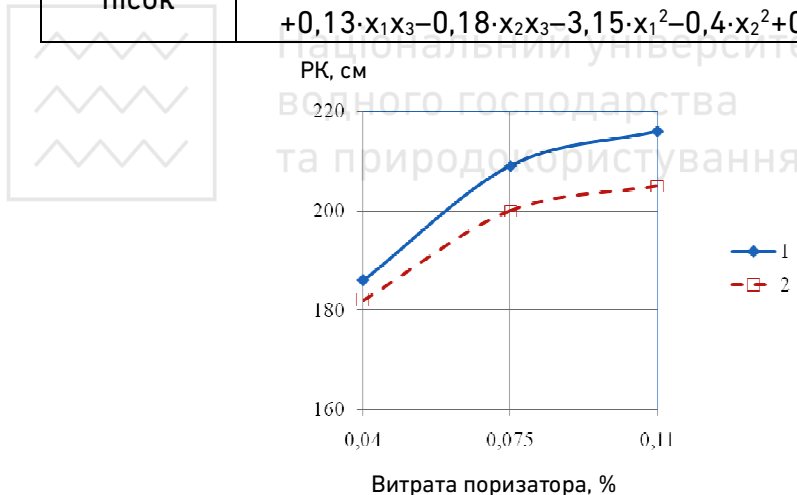


Рис. 1. Залежність розпливу конуса(ПК) поризованих розчинів від витрати поризатора та виду заповнювача (1 – заповнювач – зола-виносу; 2 – заповнювач – кварцовий пісок)

Згідно отриманих математичних моделей (табл. 3) та графічних залежностей на їх основі (рис. 2) можна зробити висновок, що основними факторами, які впливають на середню густину, є вміст та доля заповнювача, а також вміст добавки поризатора у розчині. Прискорювач твердіння, введений до складу суміші, практично не впливає на густину.

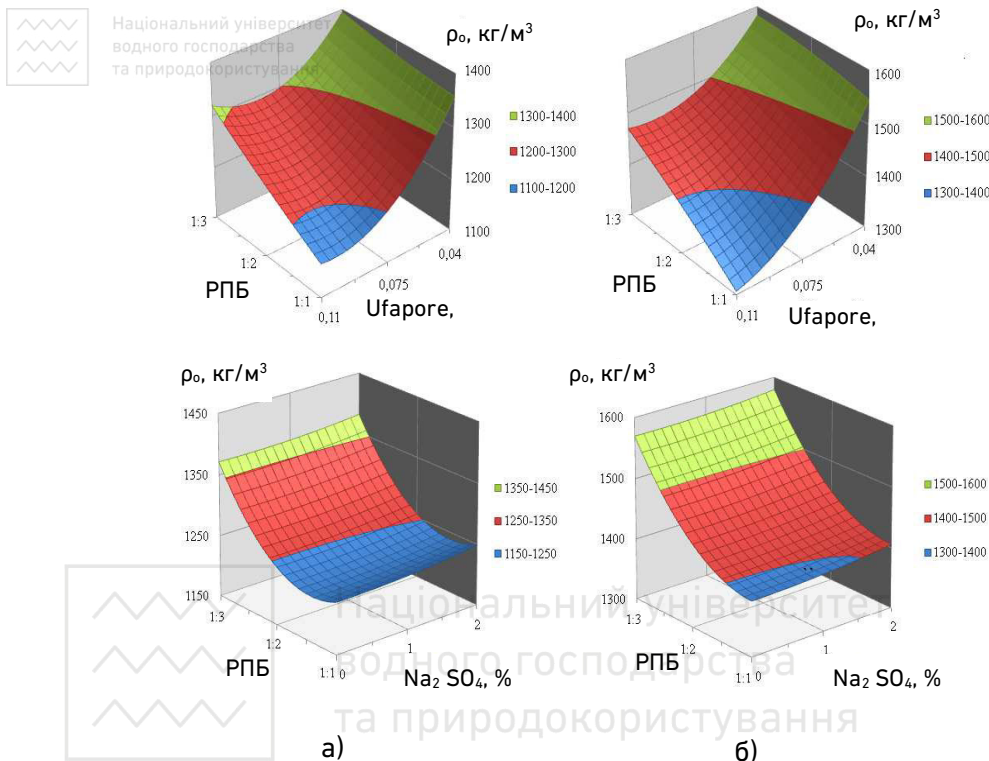


Рис. 2. Поверхні відгуку середньої густини поризованих розчинів на основі РПБ, заповнювач: а – зола-виносу; б – кварцовий пісок

Збільшення вмісту пороутворювача зменшує густину розчину, втім після певної межі (приблизно 0,1% від маси сухої суміші) ефект стає нестабільним. Подальше зменшення густини при використанні прийнятого поризатора практично незначне. З цією метою можна використовувати добавки з більш інтенсивним піноутворенням, хоча при цьому можна очікувати негативного їх впливу на кінетику твердіння та міцність розчинів.

Аналізуючи міцність поризованих розчинів (рис. 3), можна

зауважити, що як і слід було очікувати, вона залежить насамперед не від водов'язучого відношення, а від пористості розчину, яку можна оцінити за середньою густиною. Із збільшенням середньої густини міцність розчину зростає незалежно від складу розчину та виду заповнювача.

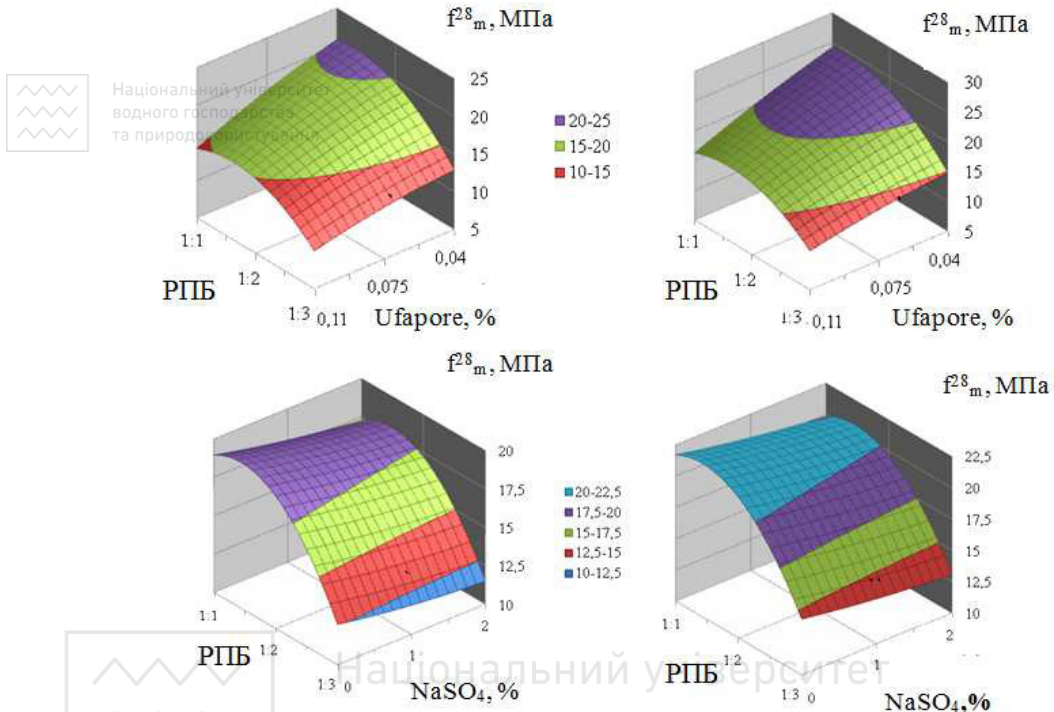


Рис. 3. Поверхні відгуку міцності поризованих розчинів у віці 28 днів на основі РПБ, заповнювач: а) зола-виносу; б) пісок

Для суміші на основі РПБ та золи-виносу характерна середня густина розчинів  $1200\text{--}1400\text{ кг/м}^3$  та міцність  $13\text{--}20$  МПа. При цьому збільшення густини з  $1200$  до  $1300\text{ кг/м}^3$  супроводжується ростом міцності на  $20\text{--}25\%$ , при співвідношенні суміші «РПБ:Зап»= $1:1$ , подальше збільшення середньої густини не призводить до суттєвого підвищення міцності. Така ж залежність спостерігається за умови використання в якості заповнювача суміші кварцового піску, в цьому випадку отримують розчини міцністю  $15\text{--}24$  МПа. В свою чергу для цементно-піщаних сумішей середня густина збільшується до  $1310\text{--}1600\text{ кг/м}^3$ . Поризовані розчини складу РПБ:Зап= $1:2$  при збільшенні густини від  $1210$  до  $1450\text{ кг/м}^3$  характеризуються лінійним збільшенням міцності на  $60\text{--}70\%$ , максимальним значенням  $20$  МПа

та 24 МПа для золи-виносу та піску – відповідно. При збільшенні вмісту заповнювача (РПБ:Зап=1:3) маємо зменшення міцності при рівній густині на обох заповнювачів. Прискорювач твердіння збільшує ранню міцність на 10–15% та марочної до 10%.

### Проектування складу сухої поризованої суміші на основі РПБ.

За допомогою програмного забезпечення Microsoft Excel, зокрема його додатка «Пошук рішення», на основі отриманих експериментально-статистичних моделей (1)–(6) можна знаходити оптимальні склади поризованих розчинів, що забезпечують їх задані значення середньої густини та міцності при мінімальній вартості суміші. Для того щоб, розрахувати оптимальний для досліджених сумішей склад, необхідно розв'язати задачу математичного програмування з наступною постановкою: знайти такий склад суміші, який би дозволяв забезпечити параметри в межах допустимих значень факторів.

Постановку задачі знаходження оптимального складу сухої поризованої суміші на основі РПБ із заданими показниками якості можна сформулювати наступним чином: знайти значення факторів складу суміші  $x_1... x_n$ , що дозволяють мінімізувати її вартість:

$$V_c = V_{РПБ} \cdot РПБ + V_{зап} \cdot (РПБ/n) + V_{п} \cdot П + V_{д} \cdot Д \rightarrow \min \quad (7)$$

за умови забезпечення необхідних показників якості

$$\begin{aligned} P_1 &\geq f(x_1, x_2, \dots, x_n); \\ P_2 &\geq f(x_1, x_2, \dots, x_n); \\ P_m &\geq f(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{aligned} \quad (8)$$

при  $x_1... x_n \in [a...b]$ ,

де  $V_{РПБ}$ ,  $V_{зап}$ ,  $V_{п}$ ,  $V_{д}$  – відповідно вартість РПБ, заповнювача (піску або золи), добавки поризатора та добавки прискорювача твердіння у.о./кг;

$РПБ$ ,  $П$ ,  $Д$  – відповідно витрата РПБ, кварцового піску або золи, добавки поризатора та прискорювача твердіння, кг/м<sup>3</sup>;

$n$  – співвідношення  $РПБ/Зап$ ;

$P_1...P_m$  – задані показники якості суміші;

$x_1... x_n$  – фактори складу;

$a, b$  – обмеження на можливі значення факторів.

Переведення значень параметрів складу суміші в кодований вигляд проводиться за наступними залежностями:

$$x_1 = \frac{РПБ / Зап - 0,5}{0,5}; \quad x_2 = \frac{П - 0,075}{0,035}; \quad x_3 = \frac{ПТ - 1}{1}. \quad (9)$$

Послідовність розрахунку складу суміші наступна.

Підставляємо у моделі (1)–(6) задані значення показників нормованих властивостей, що повинні забезпечуватись, а у вираз (7) – значення вартості компонентів суміші для 3D будівельного принтеру. У виразі (8) встановлюємо обмеження значень факторів (в кодованих значеннях від -1 до 1). Далі комп'ютерна програма перебирає різні комбінації факторів забезпечуючи задані значення нормованих параметрів за виразами (1)–(6) мінімізуючи при цьому функцію (7). Для встановлення вартості суміші під час ітерацій визначаються оптимальні значень факторів складу: відношення РПБ/Зап, витрата РПБ, вміст та вид заповнювача, а також необхідна кількість добавок поризатора та прискорювача твердіння.

В таблиці 4 наведені розрахункові склади сумішей, що забезпечують при стандартній рухомості нормовані значення густини та міцності розчинів за умови мінімальної вартості. При вартості основних компонентів суміші, грн/кг:  $V_{РПБ} = 2,1$ ;  $V_{Зап, піску} = 0,6$ ;  $V_{Зап, золи} = 0,9$ ;  $V_{ПТ} = 26$ ;  $V_{П} = 86$ .


Таблиця 4

Типові склади поризованих сухих будівельних сумішей на основі РПБ

№ з/п	Марка розчину	Середня густина, кг/м <sup>3</sup>	Вид заповнювача	Витрата, кг, на 1 т СБС			
				РПБ	Заповнювач	Поризатор UFAPORE	Прискорювач твердіння
1	M250	1500	пісок	350	650	0,4	7,0
2	M200	1500	пісок	335	665	0,5	2,8
3		1300	зола	315	685	0,4	3,1
4	M150	1350	пісок	280	710	0,9	1,6
5		1250	зола	260	740	1,1	1,5
6	M100	1200	зола	230	770	1,0	-

**Висновок.** Виконані дослідження показали, що пропонувані РПБ доцільно використовувати як напівфабрикат для сухих будівельних сумішей і поризованих розчинів на їх основі. У випадку використання в якості заповнювача золи-виносу міцність розчинів досягається 15–20 МПа при середній густині 1200–1400 кг/м<sup>3</sup> та кварцового піску 20–25 МПа при середній густині – 1350–1550 кг/м<sup>3</sup>. Для досягнення вказаної середньої густини вміст у сухій суміші пороутворювача UFAPORE CC 85 повинен становити 0,04–0,11%.





1. Рунова Р. Ф., Носовський Ю. Л. Технологія модифікованих будівельних розчинів. К. : Видавництво КНУБіА, 2007. 256 с. 2. Сучасні композиційні будівельно-оздоблювальні матеріали / П. В. Захарченко, Е. М. Долгий, Ю. О. Галаган та ін. Київ, 2005. 512 с. 3. Калашников В. И. Перспективы использования реакционно-порошковых сухих бетонных смесей в строительстве. *Строительные материалы*. 2009. № 7. С. 59–61. 4. Батраков В. Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика. М., 1998. 768 с. 5. Реакційно-порошкові бетони і матеріали на їх основі / Дворкін Л. Й., Бордюженко О. М., Житковський В. В., Кочкар'єв Д. В., Марчук В. В. Рівне : НУВГП, 2020. 304 с. 6. Дворкін Л. Й., Марчук В. В., Марчук Б. В. Реакційно-порошкові бетони як напівфабрикат для виготовлення сухих будівельних сумішей різного призначення. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди* : зб. наук. праць. Рівне : Видавництво «Волинські обереги», 2019. Вип. 37. С. 18–26. 7. Бетони нового покоління / Дворкін Л. Й., Житковський В. В., Бордюженко О. М., Марчук В. В., Рубцова Ю. В. Рівне : НУВГП, 2021. 300 с. 8. L. Dvorkin, O. Dvorkin, Y. Ribakov. *Mathematical experiments planning in concrete technology*. Nova Science Publishers, 2011.

## REFERENCES:

1. Runova R. F., Nosovskyi Yu. L. *Tekhnolohiia modyfikovanykh budivelnykh rozchyniv*. K. : Vydavnytstvo KNUBiA, 2007. 256 s. 2. *Suchasni kompozytsiini budivelno-ozdobliuvalni materialy* / P. V. Zakharchenko, E. M. Dolhyi, Yu. O. Halahan ta in. Kyiv, 2005. 512 s. 3. Kalashnikov V. I. *Perspektivyiviy ispolzovaniya reaktsionno-poroshkovyih suhikh betonnyih smesey v stroitelstve. Stroitelnyie materialyi*. 2009. № 7. S. 59–61. 4. Batrakov V. G. *Modifitsirovannyye betonyi. Teoriya i praktika*. M., 1998. 768 s. 5. *Reaktsiino-poroshkovi betony i materialy na yikh osnovi* / Dvorkin L. Y., Bordiuzhenko O. M., Zhytkovskyi V. V., Kochkarov D. V., Marchuk V. V. Rivne : NUVHP, 2020. 304 s. 6. Dvorkin L. Y., Marchuk V. V., Marchuk B. V. *Reaktsiino-poroshkovi betony yak napivfabrykat dlia vyhotovlennia sukhykh budivelnykh sumishei riznoho pryznachennia. Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy* : zb. nauk. prats. Rivne : Vydavnytstvo «Volynski oberehy», 2019. Vyp. 37. S. 18–26. 7. *Betony novoho pokolinnia* / Dvorkin L. Y., Zhytkovskyi V. V., Bordiuzhenko O. M., Marchuk V. V. Rubtsova Yu. V. Rivne : NUVHP, 2021. 300 s. 8. L. Dvorkin, O. Dvorkin, Y. Ribakov. *Mathematical experiments planning in concrete technology*. Nova Science Publishers, 2011.

---

**Dvorkin L. Y., Doctor of Engineering, Professor, Marchuk V. V.,  
Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate professor** (National  
University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

## **POROUS CONSTRUCTION MIXES ON THE BASIS OF REACTION-POWDER CONCRETE**



Національний університет  
водного транспорту  
та природокористування

**This paper presents the results of experimental studies of mortars based on dry mixes using reaction-powder concrete. For reaction-powder concrete (RPC), the typical compressive strength is in the range from 100 to 200 MPa, which can be several times higher than the strength of conventional concrete. RPC, along with high strength, also has a high crack resistance, which is characterized by the ratio of compressive strength to flexural strength. Powdered concrete can serve not only as the main structural material in the construction of buildings and structures, but also as a semi-finished product for obtaining dry building mixes for various purposes. The RPC does not contain a large filler instead, fine powders are used, such as quartz sand, ground quartz with particle sizes from 0.045 to 0.6 mm, microsilica, fly ash, ground slag and others. The term "reaction-powder" reflects the fact that all dispersed components in the RPC during curing undergo chemical transformations. Fly-ash can be used as additional component for the preparation of mixtures for various purposes. Dry construction mixes (DCM) are becoming increasingly important in construction due to a number of advantages over commercial mortar mixes. In some cases, the operation of large plants for the production of commercial mortar mixtures becomes inefficient due to increased transport costs. The use of DCM helps to increase productivity and quality of work, reduce transportation and storage costs, reduce technological operations. The ability to control the basic properties of DCM by changing the content of various components creates a wide range of materials needed for the construction of structures and thus allows you to use them in all types of work. For development of compositions of dry mixes it is expedient to use the statistical models received by means of mathematical planning of experiments. Based on the obtained data, experimental and statistical models of physical and mechanical properties of fresh**

**and hardened mortar has been built and analyzed. The article shows a solution to the optimization problem according to the criterion of the minimum cost of the composition mixture using computer software.**

***Keywords:* portland cement; reactive-powder concrete; mortar; strength superplasticizer.**



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

## ГІДРОТЕХНІЧНЕ БУДІВНИЦТВО, ВОДНА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ВОДНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 627.25:627.52«1932»

<https://doi.org/10.31713/vt120229>

Гриб Й. В., д.б.н., професор, Шинкарук Л. А., к.т.н., доцент,  
Вечер В. В., к.т.н., доцент (Національний університет водного  
господарства та природокористування, м. Рівне)



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

### ВИКОРИСТАННЯ ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУД, ГІДРОЛОГІЧНОГО РЕЖИМУ РІЧКИ СЛУЧ ТА ЇЇ ЗАПЛАВИ В СИСТЕМІ ЗАХИСНИХ УКРІПЛЕНЬ У 1939 РОЦІ

В період з 1926 до 1939 рр. на ділянці р. Случ, розташованій між с. Старе Село та смт Цумань, було побудовано значну кількість гідротехнічних споруд, які мали виконувати функцію військових захисних укріплень (рис. 1). Але, на жаль, польське військо не встигло ними скористатися за причини знищення укріплень та їх обслуги радянськими диверсійними групами у вересні 1939 року. Натепер є сенс використати вищезазначені гідротехнічні споруди, взявши до уваги такі об'єктивні обставини, що склалися: 1) за допомогою гідротехнічних споруд можна ренатуралізувати болотні масиви в створах торфомасиву «Кремінне», оз. Тухове, оз. Середнє, оз. Нижнє та старе русло р. Льва як сполучної артерії, що поєднує русло р. Прип'ять та руслові озера р. Льва, які виступають шляхами нерестових і зимувальних міграцій аборигенної іхтіофауни; 2) в світлі останніх подій, що відбулися на кордоні Польщі з Білоруссю, можна стверджувати, що доцільно використати тепер тодішній досвід застосування гідротехнічних захисних споруд, в надто складний політичний період для України, оскільки є нагальна необхідність здійснення надійного захисту кордонів України від сусідів: Білорусі, Росії, від нелегальних емігрантів, проявів гібридної війни.

**Ключові слова:** р. Случ; рівні води; озера; болота; відновлення іхтіо-екосистем; гідротехнічні споруди; захист територій; гібридна війна.

1. Сарненський укріпрайон – хронологія становлення (1926–1939 рр.)

2. Гідротехнічні рішення в системі оборонних споруд
3. Таємниці Лисої гори (лівий берег р. Случ, створ с. Тинне)
4. На сторожі «кресів всходніх»
5. Ласкаво просимо до «западні»
6. Косий місток у системі оборонного комплексу на р. Люблянка
7. Поліська лінія Мажино (легенда)
8. «Французьке танго» або вилучення схеми оборонних споруд радянської розвідкою



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

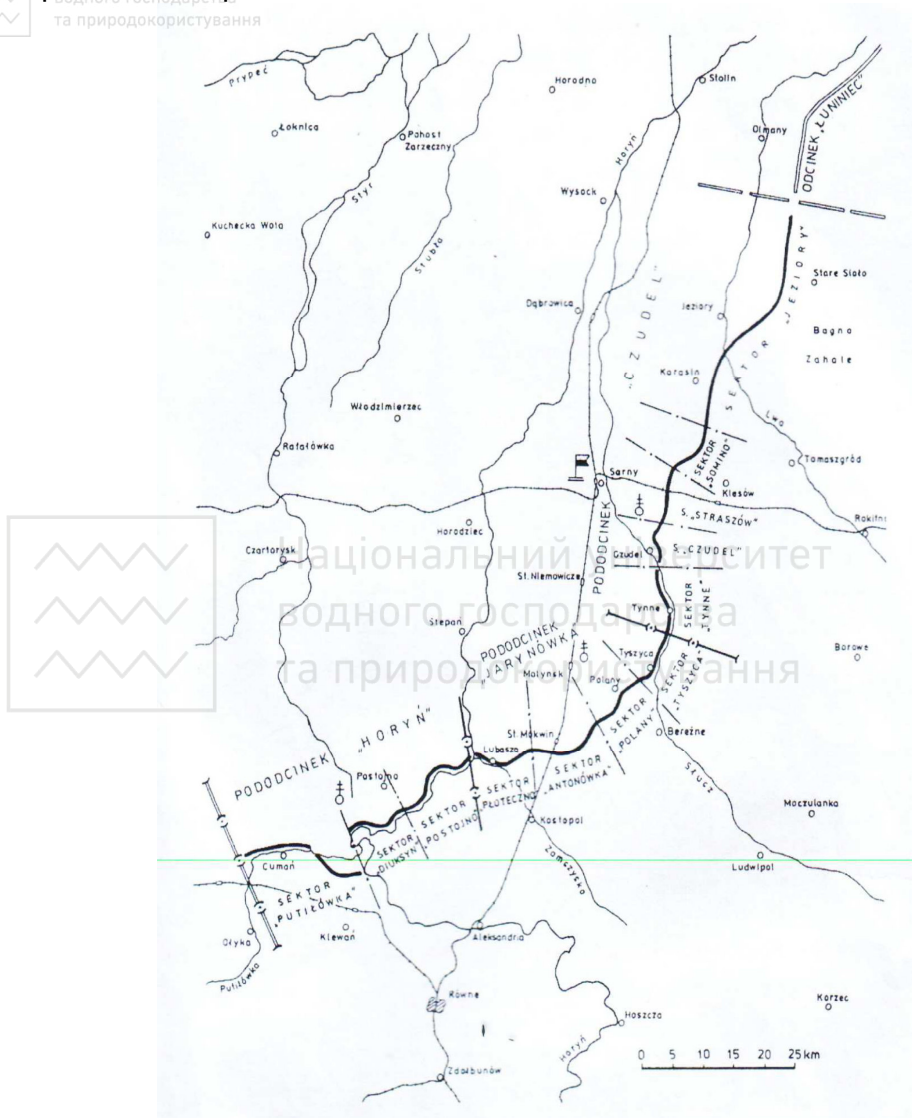


Рис. 1. Схема ділянки укріплення «Сарни» (за даними Z. Pruski [1])

## 9. Басейн р. Льва і заплави р. Случ у системі Льва-Слуцького заповідника

**1. Сарненський укріпрайон: хронологія становлення (1926–1939 рр.).** Кордони Польщі у 30-ті роки ХХ ст. простягалися на 5 тис. км, з них на східних рубежах – на 1412 км, у т. ч. 430 км припадало на болота і бездоріжжя Полісся [1]. За доктриною начальника держави Ю. Пілсудського, оборона кордонів повинна була вестись власними силами, оскільки у держави Польща була найсильніша у Європі кавалерія та численна піхота. Оборонна стратегія передбачувала постійні польові та фортечні укріплення, які, за прикладом союзної Польщі Франції, необхідно було побудувати. Перша черга будівництва повинна була припасти на Надслуччя через значні переваги – болота, водні перепони, відсутність доріг, наявність каменю (граніту) та піску. Однак з моменту проєктування до завершення будівництва неповного переліку запропонованих об'єктів необхідно було затратити майже 10 років.

Ось хронологія тих складних і героїчних подій для Польщі:

- 1926 рік – наукові дослідження з прив'язкою до місцевості та врахування особливостей ландшафту;
- 27.05.1931 рік – перший проєкт укріпрайонів (група польських інженерів на чолі з бригадним генералом Й. Бургардом, орієнтовна вартість – 700 млн злотих), геодезична зйомка;
- травень 1933 року – початок будівництва сховищ для боєприпасів;
- травень 1935 року – смерть Юзефа Пілсудського;
- лютий 1936 року – допрацьований проєкт фортифікаційних споруд групою інженерів на чолі з генералом Й. Бургардом з використанням ландшафтних перепон – річок, стариць, боліт;
- 1936 рік – початок інтенсивних будівельних робіт на першій лінії оборони, ділянці «Сарни» протяжністю 170 км, 358 укріплень кошторисною вартістю 16 млн злотих. Планувалось влаштувати три відділення – Чудель протяжністю 77 км, 117 об'єктів; Озера протяжністю 37 км, 35 бастіонів; Сомино протяжністю 10 км – 18 бастіонів; Страшів протяжністю 8 км – 18 об'єктів; Чудель протяжністю 8 км – 20 бастіонів; Тинне протяжністю 14 км – 26 об'єктів. Завершення будівництва планувалось у 1939 році.

Будівництво велось у суворій секретності, місцеве населення в цю зону не допускали. Охорону вели команди прикордонної служби

за місцем їх дислокації (Рокитне, Березне, Давидгородок) та ескадрони, які базувались у населених пунктах Бистричі, Рокитне та Зурне.

Будівельні роботи вело Управління будівельних робіт № 9, згодом – № 13.

Бойова комплектація – дві 75 мм гармати і важкий кулемет середньої потужності, одна протитанкова гармата на ДЗОТ, три важких кулемети та один легкий; малі об'єкти – до 2 важких кулеметів;

- квітень 1939 року – створено фортифікаційну роту в Тинному (691 особи із штабом у сусідньому селі Зносичі), вузол зв'язку у центрі с. Тинне біля церкви, командир – капітан Е. Маркевич (залишився живий);

- улітку завершено бойове оснащення об'єктів 75 мм гарматами, протитанковими гарматами (по 12 кожної одиниці) та важкими кулеметами [1];

- серпень 1939 року – відрядження більшої частини залоги на західний фронт, залишилось четверо офіцерів та підофіцерів, 12 рядових; пізніше проведено доукомплектування за рахунок резервістів з Любліна;

- 12–13 вересня 1939 року – перші загопи Червоної армії з'явилися у передпіллі укріпрайону в районі сіл Федорівка, Олексіївка, Селище, Чабель, Лінчин;

- 18 вересня 1939 року – концентрація радянських військ, підготовка до оборони бастіонів;

- 19 вересня 1939 року – флангові атаки червоних з метою оточення;

- 20 вересня 1939 року о четвертій годині ранку – наступ червоних. Залога під командуванням капітана Р. Шрайбера, капітанів М. Фіялкового, Е. Жолковського, поручників К. Каспицького та Я. Яблонського, поручника П. Ялкевича та підпоручника Болбота мужньо відбивала атаки ворога;

- 21 вересня 1939 року 47 воїнів вийшли з оточення, 60 піхотна дивізія Червоної армії зайняла лінію оборони, розстрілюючи офіцерів, полонячи поранених та залишки залоги.

Вдивляючись тепер у зруйновані вибухом метрової товщини бетонні стіни укріплень, не можна погодитись з тим, що вони були знищені після війни чи з приходом німців (рис. 2). Володіючи секретними матеріалами розміщення дотів та пвт (прихована

вогнева точка), командування Червоної армії, за оповідями жителів села Тинне, підготувало спеціальну групу підричників, одягнених у польську військову форму. Ними було знищено малочисельну заложу, а під кожний із дотів була закладена вибухівка і вони були висаджені у повітря.

Згідно з даними втрати польської сторони склали 226 офіцерів та рядових. Однак насторожує той факт, що 301 особа зникла безвісти, в тому числі 7 офіцерів. Це є побічним підтвердженням знищення частини заложі диверсійними групами Червоної армії.

На жаль, могутні bastiони не змогли зупинити навалу більш важкої техніки і краще оснащених частин Червоної армії [2].

## **2. Гідротехнічні рішення в системі оборонних споруд.**

Сарненська науково-дослідна меліоративна станція внесла відчутний вклад у освоєння поліського краю – як позитивний, так і негативний. Пониження рівнів ґрунтових вод до рівня кореневого живлення рослин і дерев зберегло фітоценоз лісів і перезволожених земель, що дало змогу використати частину боліт для вирощування сільськогосподарських культур, створити пасовища для тваринництва та зберегти від затоплення населені пункти. До негативів належать: переосушення земель, зникнення мочарів, мінералізація торф'яників, зникнення боліт, відсутність стоку малих річок у літній період. Вражає, що навіть на дослідних ділянках польських меліораторів з вирощування дрібноплідної та крупноплідної журавлини, які ще проглядались 30 років тому, зникли всі рослини і залишився лише сухий мох. Але дослідні роботи станції, хоч і вагомі, були лише ширмою для реалізації важливого державного проєкту – захисту кордонів Польщі.

Заплава ріки Случ вище м. Сарни навесні та під час повеней затоплювалась талими водами, наповнюючи озерця та стариці, даючи життя лучним травам та пасовищам, численним популяціям риби. у давні часи вся річкова мережа в цей час зливалась у велике прісноводне Поліське море. І сьогодні на урізі берега річки, нижче глинистих наносів, біліє промитий морський пісок. Використовуючи незначні перепади висот можна отримати сполучення між окремими річковими басейнами, зокрема річками Случ, Любонька та Льва.





Рис. 2. Бетонні елементи зруйнованого ДОТа в урочищі «Косий місто»



Рис. 3. Проміжні бики регульовального шлюза на р. Случ


Це і було використано інженерами-гідротехніками. Шлюз на р. Случ дозволив акумулювати річковий стік, направити його за необхідності на заплаву, далі каналом на заболочену територію Залив (рис. 3). Нині для місцевого населення це заповідне водноболотне мисливське господарство. Далі через невеликий шлюз вода потрапляла у систему річки Любонька, озеро Сомино – болота р. Льва. Таким чином створювалось непрохідне для техніки і напівпрохідне для піхоти болото, яке без плавзасобів подолати було неможливо.

Тепер це територія Рівненського природного біосферного заповідника з центром біля озера Сомино (в минулому мала назву «карасиний рай»). Вражає рівень вирішення питань екологічної безпеки при експлуатації руслового шлюзу на р. Случ – влаштування розсіючого випуску для попередження значного розмиву дна та ловчої кишені для вловлювання і подальшого використання промитого в руслі піску. До річі, нами допрацьована система забезпечення прохідності риб під час перекриття русла шляхом використання літнього польдера.

Перед шлюзом була передбачена на заплаві яма для накопичення та збереження прохідних риб за відсутності шляхів зимових і нерестових міграцій. Береги русла укріплювали шляхом насадженням дерев.

### **3. Таємниця Лисої гори (лівий берег р. Случ, створ с. Тинне)**

Лівий берег р. Случ у створі села Тинне Сарненського району



різко піднімається над заплавою. Звідси відкривається широка панорама лучної долини, помережана старицями, озерцями, кущами верболозу та глоду на суходолі. Незвичайне підвищення берега, покрите рідколіссям сосни, називається Лисою горою. Вона давала змогу контролювати переправу через р. Случ та шлюз на річці, який, за необхідності, перекивав стік річки і направляв його на заплаву і далі у басейни сусідніх малих річок та боліт. Саме тут було розташовано дві оборонні споруди тривалої дії – супердоти з бетонними стінами товщиною не менше одного метра, залишки яких, зруйновані вибухом, щиряться обривками металевої арматури товщиною до 20 мм. Прошло понад 80 років, а уламки бетону синіють споконвічною міцністю, так само вони виглядатимуть навіть тоді, коли не стане цивілізації... Дивно, яку ж силу повинна була мати вибухівка, щоб підняти і спотворити залізобетонні блоки метрової товщини? Подібну картину ми спостерігали у зруйнованій вибухами ставці фюрера «Вервольф» (Wegwolf) біля смт Стрижавка за 8 км на північ від м. Вінниця.

Після викрадення схеми дотів та пвт, які розтяглися від с. Карасин до с. Моквин, у радянського командування була поставлена задача знищення цієї системи оборонних споруд. Розбомбити з повітря за допомогою літаків заманливо, але й малоперспективно, оскільки потрапити в ціль важко, та й як зруйнувати цю потугу. Тому було прийнято рішення використати людський фактор – підричників. При цьому для отримання необхідного ефекту потрібно спрямувати вибухову хвилю до верху, тобто закласти вибухівку всередині споруди.

Залишається лише здогадуватись, яким чином була доставлена команда підричників та значна маса вибухівки – щось біля двох тонн на споруду. За свідченням місцевих мешканців підричники використали польську військову форму. Знання польської мови, висока бойова і фізична підготовка дозволили безшумно зняти охорону та обслугу. Після закладення вибухівки в середині дотів земля здригнулася від потужного вибуху, навсідч розлетілись уламки бетону, дахи споруд піднялись і осіли скособочені, на дні з'явилися глибокі вирви.

До сьогоднішнього дня поряд зі зруйнованими спорудами на вершині гори збереглися акуратні фундаменти будівель обслуги та гуртожитку юніорів.

Неушкодженим залишився командний бункер біля церкви у центрі села Тинне без бійниць з окремим овальним лазом. Зовні табличка з написом польською та українською мовами з посвятою солдатам Війська Польського, які загинули у вересні 1939 року.

Усі доти мали між собою телефонний зв'язок. Лиса гора мала стати вагомою ланкою в оборонних боях. Натепер вона може стати серйозним туристичним об'єктом як свідчення використання тогочасної, але вже застарілої стратегії військових дій та недовіри до агресивного сусіда.

**4. На сторожі «кресів всходніх», (східні креси, пол. *Kresy Wschodnie*, від *kres* – «границя», «край») – польська назва територій сьогоденної Західної України, Західної Білорусі і Литви, що колись входили до складу Польської республіки).**

1937 рік. В Європі неспокійно. Германія милітаризується, вимагає перегляду кордонів. Польща знаходиться між двох «пітонів» – Німеччини і СРСР.

Варшава, засідання Ради держави. Розглядається питання розвитку країни. Очолює засідання «начальник держави» Юзеф Пілсудський, серед присутніх: головний інспектор збройних сил Едвард Ридз-Смігли, голова Ради міністрів Феліціан Савой Складовський, його помічник – міністр фінансів Еугеніуш Квятковський, представник міністерства оборони Франції, яка співпрацює з Польщею відповідно до договору 1921 року, командувач армії «Полісся» та Сарненської науково-дослідної меліоративної станції Академії наук Польщі. Розвиток економіки Польщі, згідно з програмою генерала Юзефа Пілсудського, дав свої результати – можливість розвивати промисловість, освіту. Щодо Полісся, то планувалось добувати камінь на Вирівському кар'єрі з будівництвом містечка для юніорів, розпочати навчання місцевої молоді у 4-класних початкових школах і технікумах для майбутнього використання у гірничій промисловості, будівництві доріг, розвитку меліорації. Але була ще і інша програма розвитку – секретна військова. Необхідно було закріпити східні рубежі держави зі сторони залізничного вузла Сарни від можливого нападу СРСР. Оборонний проєкт передбачав поєднання фортифікаційних та меліоративних зусиль для досягнення поставленої мети. Зокрема проєктом передбачалось:

а) перекриття стоку р. Случ вище м. Сарни двома шлюзами у створі сіл Бистричі (верхній) і Тинне (нижній) для затоплення

заплави р. Случ та спрямування каналами маси води в сторону заболоченого пониззя «Залив» та озера Сомине і далі у напрямку заплави і боліт у басейні р. Льва, що унеможливить наступ ворога;

б) забезпечити армію «Полісся» житлом, амуніцією та плавзасобами;

в) побудувати за проєктами Франції систему дотів вздовж лівого гористого берега р. Случ;

г) побудувати систему дотів і пвт вздовж залізничних ліній Рокитне – Сарни та Сарни – Костопіль (станції Страшів та Моквин);

д) побудувати систему дотів та доріг-лежнівок по болотах на лінії Клесів–Карпилівка та озеро Сомине – с. Карасин, а також споруд першої лінії оборони по дорозі Клесів – Карпилівка (район «Косого містка»);

е) будівництво табору юніорів у с. Вири для поселення робітників, які будуть добувати камінь на кар'єрі та працювати на завантажувальній рампі;


ж) будівництво системи дотів на роздоріжжі доріг Костопіль – Сарни та Костопіль – Березне;

з) прикриття оборонних робіт та дезінформація ворога – використання високої огорожі, будівництво фабрики pomp як основного об'єкту, меліоративне будівництво, наукове прикриття – дослідження з вирощування журавлини, геодезичні, гідрологічні та геологічні дослідження, публікації.

Будівництво військових об'єктів передбачалось здійснювати складом юніорів та прикордонників. Місцеве населення здійснювало будівництво доріг, насипів, каналів, просік тощо.

**5. Ласкаво просимо до «западні».** Французькі інженери-проєктувальники, гідротехніки, військові спеціалісти з будівництва фортифікаційних споруд відмінно поєднали особливості природи Полісся того часу та необхідність стовідсоткового захисту Сарненського залізничного вузла від можливого ворога. Це добре розуміли і з іншого, протилежного боку – взаєморозрахунки тягнулись роками, а більшовики ніяк не змогли забути поразку 20-х років при намаганні експорту соціалістичної революції у соціал-демократичну Польщу.

Яку ідею передбачала схема захисту від нападаючих оборонна лінія на шляху до Сарненського вузла? Грунтова дорога посеред чарівного лісу проходила до косого містка через потічок. Тут ворога чекав перший перехресний вогонь з дотів. З боків – вода – цю



систему оборони використовували не раз. Якщо ворог проривався – на нього чекав ще один дот. Під вогнем колона змушена була б повернути в ліс, в напрямку озера Сомине. Для продовження руху необхідно переправитись через струмок Любоньку. Минаючи озеро, колона рухається по лісовій піщаній дорозі, а далі по лежнівці серед боліт в сторону с. Карасин, де її зустрічає командна група дотів з трьох одиниць. У випадку прориву – дорога тільки вперед, по боках – болото. Через декілька кілометрів при незначному повороті дороги нападаючих зустрічає група з кулеметно-гарматним оснащенням, яка прострілює дорогу наскрізь...

У випадку прориву дорога закінчується за кілька кілометрів у болоті заплави р. Льва. Це кінець можливого наступу ворога.

Ще є одна лежнівка, яка веде в сторону урочища Веретинки. Вона повертає вправо перед головними дотами. Ця дорога також закінчується тупиком у глухому болоті, який прострілюється наскрізь.

**6. Косий місток у системі оборонного комплексу на р. Люблянка.** Косий місток через струмок, що впадає у р. Люблянку, розташований між двома ставками на дорозі Клесів – Карпилівка і, далі, на Сарни. Це місце – мрія кожного риболова-любителя. Відсутність людей, багата рибалка та природа, чисте повітря. Як років 30–40 назад, так і нині краса цього куточка природи вражає. Очевидно, проєктувальники оборонних об'єктів, цієї майбутньої «мишоловки» для ворогів, були романтиками. Справа у ставок виступає мисок з рідкими деревами-соснами. Однак за цією красою причаїлась смерть. З висоти миска хижо вдивляються в дорогу бійниці підірваного доту. На замшілій поверхні обломків бетону сьогодні дозрівають лісові суниці та квітує білими суцвіттями валеріана лікарська. Зліва містка під прикриттям лісової хащі ворога зустрічають перехресним вогнем ще два доти, які сьогодні темніють надщербленими уламками поміж дерев... Ті ж могутні на віки стіни, та ж потужна, напівобрізана на металолом, арматура, ті ж задарма витрачені кошти. Вражають збережені дотепер під'їзди, ґрунтові дороги до споруд.

До пересихання торф'яників і наявності ґрунтового та дренажного стоку на ставах біля косоного мосту добре ловилась риба – карасі, плітка, лини, рідше щука. Рудий бобер міг годинами спостерігати за риболовлею, сидячи на нахиленій над самою водою березі. Під пеньком вовтузились вужі.

Сьогодні все заросло деревами та кущами, неначе завмерло. Вода у ставки із меліоративної канами майже не поступає. Поверхня дзеркала ставів повністю зтягнулась ряскою, що не дає можливості виживати рибі через дефіцит кисню у воді.

**7. Поліська лінія Мажіно (Легенда).** Весна 1953 року. Після смерті вождя народів Йосипа Сталіна-Джугашвілі у верховому керівництві Москви сформувалась нестійка рівновага, базована на колективній домовленості чотирьох наближених осіб – Берії, Маленкова, Хрущова, Молотова. Вона базувалась на основі ймовірної смерті першого Сталіна ще у 1947 році, таємно похованого та легалізації його двійника. Міжнародна ситуація була напруженою – за даними розвідки керівництво недавнього союзника у війні з Німеччиною – Сполучених Штатів Америки вже декілька разів відклало напад на СРСР (проєкт «Дропшорт»), а Радянський Союз нарощував зусилля заволодіти атомною зброєю. Керівник атомного проєкту, а тепер друга особа в державі, розглядав можливі варіанти повного захвату влади в країні. Навкруги Москви і в самій столиці знаходились підпорядковані йому військові підрозділи та навіть танкові частини. На контрольних постах у Кремлі стояли його люди з червоними облямівками на кашкетах. Берія розумів – для утримання влади необхідна була підтримка на місцях, особливо на західних кордонах України – у Волинській, Рівненській, Львівській та Івано-Франківській областях. Ще недавно, у 1944 році, коли Радянська Армія ввійшла на терени Західної України, він разом із Жуковим писав Сталіну про необхідність у майбутньому переселення населення цих територій у далекі азійські степи. Та й національне підпілля давало себе знати.

По замощених бруківкою вулицях Рівного, оточених обабіч одно- двоповерховими будівлями, збереженими під час війни, у супроводі броньованих авто прибув керівник МГБ Лаврентій Берія. Заступник голови Ради міністрів СРСР, куратор міністерств: МВД, МГБ і міністерства державного контролю, він їхав з інспекцією до свого підлеглого, давнього знайомого і друга полковника Климнюка, керівника служби безпеки області.

Важкі залізні ворота території обласного НКВД, що займав цілий квартал, відгороджений високим дерев'яним парканом, широко відчинились. Постаць маршала у мундирі, що виблискував золотом, винирнула з теплих обійм легковика. Окинувши оком багатоповерху адміністративно-слідчу частину, в'язницю,

господарські будівлі, виструнчену охорону, привітався рукою. З прибуттям.

- Ну що ж, полковнику, доповідай ситуацію, який стан боротьби з бандерівцями, як твої псевдозагони?

- Ну досить. Працюєте добре. Я тебе знаю ще по Сарненському вузлу та польських дотах. До речі, ти зіграв роль полковника Генштабу Війська Польського класично. Всі схеми розташування дотів отримав, прямо на тарілочки з «голубою каймою».

Піднялися сходами до кабінету, пахло специфічним духом камер, затхлістю, тривогою. На стіні – дошка пошани загиблих – красивих молодих хлопців, вдень – оперативників, вночі – з почепленими тризубами повстанців.

Я тебе ось про що попрошу – ситуація у столиці і у світі знаєш яка, необхідна сильна людина в державі. Якщо я стану цією людиною ти підтримаєш?

Климнюк вражено завмер, перехопило подих.

- Як скаже партія, – відповів.

- Зрозуміло, про нашу розмову, сам розумієш, нікому.

На тому і відбув.

...Москва, засідання політбюро. Присутні: Сталін, Берія, Каганович, Молотов, Хрущов. Повістка дня – стратегія СРСР в Європі після підписання договору Молотова – Ріббентропа між Німеччиною та СРСР.

Сталін: Гітлерівська Німеччина завойовує капіталістичну Європу. Як гниле дерево, країни падають до ніг Німеччини. Наше завдання в цій ситуації – використовуючи протиріччя імперіалістичних держав, добитись їх ослаблення, щоб увійти в Європу. Ваше завдання – допомогти Німеччині, посилити військову взаємодію. В цьому нам повинен допомогти Комінтерн.

...Франція, Париж. Засідання Кабінету Міністрів Франції. Доповідає Прем'єр-міністр Деладьє. Присутній посол Польщі: «Більшовики мають намір увійти в Європу. Ми повинні їм протидіяти».

З боку Німеччини наш кордон захищає лінія Мажино. З боку СРСР ми повинні захистити наші рубежі, допомагаючи Польщі збудувати польську лінію оборони, використовуючи її як буферну територію. Ми маємо досвід боротьби 20-х років – заманити і знищити ворога в болотах. Необхідно виділити кошти і людей.

...Лондон. Засідання Кабінету Міністрів Великої Британії. Головує Прем'єр-міністр Вінстон Черчилль: «Необхідно допомогти Польщі, скласти договір про взаємодопомогу. Але їй одній не втриматись – ворог з двох боків. Союз СРСР і Німеччини ситуаційний, як вовка з козою. СРСР не витримає удару Німеччини з завойованою нею Європою. Потрібно послабити комуністів і не дати зростати силам Німеччини у наступі на наші колонії і в бік Індії.

- Яким чином, сер?

- Я думаю, слід готувати авіацію до нападу на Бакинські нафтові родовища разом із авіазагонами Франції. Базуватись будуть на авіабазі в Єгипті. Одним ударом позбавимо нафти одних і других.

Міністри вражені. Ще більше вони будуть вражені, коли після перемоги у 1945 році Черчилль запропонує план «Нечуване» – об'єднаними силами союзників разом із 1,5 мільйонами озброєних полонених німців відкинути росіян на схід за р. Шпрее.

**8. «Французьке танго» або вилучення схеми оборонних споруд радянською розвідкою.** Робота розвідника подібна до бальних танців – смокінги, ритуал, світські розмови, знання па, манірні поклони при затаєних думках і намірах.

Прощаючись у Кремлі з полковником Климнюком, Лаврентій Берія уточнив порядок проведення операції «Французьке танго»: перше – отримання оригіналу плану розміщення дотів та пвт вздовж лінії пограниччя; план операції розроблений в деталях, штабний поїзд буде готовий в умовленому місці, там же одяг і все необхідне. Люди підготовлені. На все вам буде відведено дві години часу, доки затримуватимуть дійсний потяг із Варшави під виглядом ремонту; другу частину операції по знищенню цих оборонних об'єктів готують.

... На залізничному вокзалі Сарни оркестр зіграв гімн Польщі «Єще Польска не згінела», пролунала команда «Бачность» для почесної варті. Присутні – проєктанти, будівельники, військові з тривогою спостерігали за полковником Війська Польського, що спускався по сходах штабного вагона у супроводі ад'ютантів та спеціалістів державної приймальної комісії. Тривожитись господарям було ні до чого – шлюзи, доти, пвт, що не були зірвані, стоять і досі без єдиної тріщини.

- Маємо дві години часу для прийому об'єктів, часи тривожні, – каже полковник. – Дивимось схему, вибираємо ближні споруди і гайда.



Дот у селі Страшів біля залізничної лінії, дот на Лисій горі та шлюз на р. Случ прийняли без особливих зауважень. Юніори ще прибирали дошки та сміття біля шлюзів.

- Всі об'єкти практично готові, завозимо військове спорядження, димові пакети, човни на пристань біля головних дотів на озері Соминому, – доповідає головний інженер будівництва.

Полковник передає схему ад'ютантові, підписує акт приймальної комісії, із значним полегшенням і на здивування господарів, хоча ще було багато недоробок.

Випили шампанського, комісію проводжають до поїзда, що стояв, попихкуючи парою, на першій колії. Під звуки переможного маршу поїзд відбуває.

Через деякий час у коменданта Сарн телефон повідомляє – на станцію прибуває ще один поїзд з комісією з Варшави. Головна умова успішного використання оборонних споруд – це секретність, а вона була втрачена. Наступала друга черга операції – ліквідація оборонних споруд, або їх нейтралізація. Головний інженер будівництва закінчив життя самогубством. Схема дотів осіла в архівах КДБ, залишивши навіки закопані в болотах шалені гроші.

**9. Басейн р. Льва і заплави р. Случ у системі Льва-Слуцького заповідника.** Заповідник поєднує такі водні об'єкти: р. Случ в створі від Соколиних гір до с. Тинне через заплаву до болотного масиву «Залив» через гідротехнічні споруди до оз. Солине та у басейн р. Льва в створі болотного масиву «Кремінне».

Мета роботи: відновити болотні масиви або здійснити їх ренатуралізацію та забезпечити охорону в межах торфомасиву «Кремінне», оз. Тухове, оз. Середнє і оз. Нижнє та старого русла р. Льва як сполучної артерії, що поєднує русло р. Прип'ять та руслові озера р. Льва, як шляхи нерестових і зимувальних міграцій.

### **Загальні висновки та сьогодення**

Взявши до уваги об'єктивні проблемні обставини, що склалися можна зробити такі конкретні висновки:

1. Слід вважати доцільним відновлення за допомогою гідротехнічних споруд болотних масивів в створах торфомасиву «Кремінне», оз. Тухове, оз. Середнє, оз. Нижнє та старе русло р. Льва, як сполучної артерії, що поєднує русло р. Прип'ять та руслові озера р. Льва, які виступають шляхами нерестових і зимувальних міграцій

аборигенної іхтіофауни і таким чином забезпечити нормальне функціонування Льва-Слуцького заповідника.

2. Можна констатувати: в надто складний політичний період для України доцільно тепер використати досвід застосування гідротехнічних захисних споруд, оскільки є нагальна необхідність здійснення надійного захисту кордонів України з боку Білорусі та РФ, від нелегальних емігрантів, проявів гібридної війни.



Национальний університет  
водного господарства  
та природокористування

1. Lach W. Fortyfikacje odcinka Sarny w wojnie 1939 roku. *Korpus Ochrony Pogranicza* : materiały z Konferencji Naukowej / pod redakcją dr. Jerzego Prochwicza. Kętrzyn, 2005. 2. Юрчук Л. В., Матійченко В. І. Сарненський укріпрайон у системі прикордонних фортифікацій польської держави (1926–1939 рр.). 2009. 29.08.2010 at7: 52 PM. Матеріал 1, «1а».


## REFERENCES:

1. Lach W. Fortyfikacje odcinka Sarny w wojnie 1939 roku. *Korpus Ochrony Pogranicza* : materiały z Konferencji Naukowej / pod redakcją dr. Jerzego Prochwicza. Kętrzyn, 2005. 2. Yurchuk L. V., Matiichenko V. I. Sarnenskyi ukripraion u systemi prykor-donnykh fortyfikatsii polskoi derzhavy (1926–1939 rr.). 2009. 29.08.2010 at7: 52 RM. Material 1, «1а».

**Hryb Y. V., Doctor of Biological Sciences, Professor, Shynkaruk L. A., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor, Vecher V. V., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor** (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

## USE OF HYDRAULIC STRUCTURES, HYDROLOGICAL REGIME OF THE RIVER SLUCH AND ITS FLOODPLAIN IN THE SYSTEM OF PROTECTIVE FORTIFICATIONS IN 1939

In the period from 1926 to 1939, a significant number of hydraulic structures were built on the section of the river Sluch from the village of Stare Selo to the village of Tsuman (downstream). These structures were to serve as military defensive fortifications, and were part of three divisions: «Chudel», «Yarynivka» and «Horyn». In turn, they were divided into smaller sections – sectors, which numbered 12. The first line of defense included the 170 km long Sarny sector, 358 bastions, Chudel, 77 km, 117 bastions; Lakes – 37 km,



**35 bastions; Somyno – 10 km, 18 bastions; Strashiv – 8 km, 18 objects; Chudel – 8 km, 20 bastions; Tynne – 14 km, 26 objects. Completion of construction was planned in 1939. Most of these buildings were built, but unfortunately, Polish troops did not have time to use them due to their destruction by Soviet sabotage groups in September 1939. Nowadays, it makes sense to return to these hydraulic structures, as some of them have remained in working order, some need repair, and their use may be justified by the following reasons: 1) with the help of existing buildings and their restoration it is possible to renaturalize swamps in the peat massif «Kreminne», Lake Tukhove, Lake Serednie and Lake Nyzhnie and the old channel of the river Lev, as a connecting artery connecting the river Pripyat and river lakes. Lions that act as spawning and wintering migrations of aboriginal ichthyofauna; 2) due to the recent events on the border between Poland and Belarus, it can be argued that the experience of designing and building protective structures of that time should be used now, in a difficult political time for Ukraine; as there is an urgent need for reliable protection of borders from neighbors: Belarus, Russia, from illegal immigrants, manifestations of hybrid war.**

**Keywords:** the river Sluch; water levels; lakes, swamps; restoration of ichthyoecosystems; hydraulic structures; protection of territories; hybrid war.



# ВІСНИК

Національного університету  
водного господарства та  
природокористування

**ISSN 2306-5478**

**В И П У С К 1(97)**



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

<https://doi.org/10.31713/vt120220>

Заснований  
у 1999 р.

Збірник наукових праць  
затверджений  
Наказом Міністерства освіти і науки  
України № 886  
від 2 липня 2020 р., категорія «Б»  
спеціальності – 113, 121, 122, 133,  
184, 191, 192, 194.

Наказом Міністерства освіти і науки  
України № 1471  
від 26 листопада 2020 р., категорія «Б»  
спеціальність – 141

Збірник наукових праць

**Технічні науки**

Адреса редколегії:  
33028, м. Рівне, вул. Соборна, 11,  
НУВГП

Телефон: (0362)63-57-31

У збірнику опубліковано наукові статті з раціонального використання природних ресурсів, гідротехнічних споруд, будівництва та архітектури, машинознавства, а також інформаційних технологій. Призначений для наукових працівників, інженерів, аспірантів та студентів навчальних закладів.

**Головний редактор:** Мошинський В.С.,  
д.с.-г.н., професор, ректор.

**Заступник головного редактора:** Савіна Н.Б.,  
д.е.н., професор, проректор з  
наукової роботи та міжнародних зв'язків.

### Редакційна колегія:

**Герасимов Є.Г.**, к.т.н., доцент,  
відповідальний секретар (НУВГП, Рівне)

**Рокочинський А.М.**, д.т.н., професор  
(НУВГП, Рівне)

**Бабич Є.М.**, д.т.н., професор (НУВГП, Рівне)

**Бомба А.Я.**, д.т.н., професор (НУВГП, Рівне)

**Дворкін Л.Й.**, д.т.н., професор (НУВГП, Рівне)

**Кравець С.В.**, д.т.н., професор (НУВГП, Рівне)

**Маланчук Є.З.**, д.т.н., професор (НУВГП, Рівне)

**Слюсарчук В.Ю.**, д.ф.-м.н., професор,  
член-кор. НАН України (НУВГП, Рівне)

**Трач В.М.**, д.т.н., доцент (НУВГП, Рівне)

**Филипчук В.Л.**, д.т.н., професор (НУВГП, Рівне)

**Надутьий В.П.**, д.т.н., професор (Інститут  
геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН  
України, Дніпро)

**Корнієнко В.Я.**, д.т.н., професор (НУВГП, Рівне)

**Турбал Ю.В.**, д.т.н., професор (НУВГП, Рівне)

**Науменко Ю.В.**, д.т.н., професор (НУВГП, Рівне)

**Мартинов С.Ю.**, д.т.н., професор (НУВГП, Рівне)

**Налобіна О.О.**, д.т.н., професор (НУВГП, Рівне)

**Мартинюк П.М.**, д.т.н., професор (НУВГП, Рівне)

**Сафоник А.П.**, д.т.н., професор (НУВГП, Рівне)

**Пінчук О.Л.**, к.т.н., доцент (НУВГП, Рівне)

**Мічута О.Р.**, к.т.н., доцент (НУВГП, Рівне)

**Василець С.В.**, д.т.н., професор (НУВГП, Рівне)

**Давиденко В.А.**, к.т.н., доцент (НУВГП, Рівне)

**Жуковський В.В.**, к.т.н., доцент (НУВГП, Рівне)

**Іванчук Н.В.**, к.т.н., доцент (НУВГП, Рівне)

**Жуковська Н.А.**, к.т.н., доцент (НУВГП, Рівне)

**Михайлишин О.Л.**, д.арх., професор (НУВГП, Рівне)

**Сергіюк І.М.**, к.арх., доцент (НУВГП, Рівне)

**Ричков П.А.**, д.арх., професор (НУВГП, Рівне)

**Еугеніуш Кода**, д.т.н., професор, декан факультету  
цивільної інженерії та інженерії довкілля  
(Варшавський університет природничих наук,  
Варшава, Польща)

**Харша Ратнавіра**, д.т.н., професор, керівник  
відділу наукових досліджень факультету наук та  
технологій (Норвезький університет природничих  
наук, Оз, Норвегія)

**Анджей Стружинській**, доктор габілітований,  
інженер, кафедра водної інженерії і геотехніки  
(Краківський сільськогосподарський університет,  
Краків, Польща)

**Любош Юрик**, доцент, к.т.н., доцент кафедри  
водних ресурсів та інженерії довкілля  
(Словацький сільськогосподарський університет в  
Нітрі, Словачина)

**Ченгіз Коч**, д.т.н., професор, професор кафедри  
міського і регіонального планування (Мугла Сіткі  
Кочман Університет, Мугла, Туреччина)

Матеріали збірника розглянуто і рекомендовано до видання  
Вченою радою університету 25 березня 2022 р., протокол № 2.

Адреса редколегії: 33028, м. Рівне, вул. Соборна, 11, НУВГП  
© Національний університет водного господарства  
та природокористування, 2022

# **BULLETIN**

**NATIONAL UNIVERSITY OF  
WATER AND ENVIRONMENTAL  
ENGINEERING**

**ISSN 2306-5478**  
**VOLUME 1(97)**



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

<https://doi.org/10.31713/vt120220>

**Founded  
In 1999**

Collection of Scientific Papers

The given Collection of Scientific Papers is approved by the Decree of the Ministry of Education and Science of Ukraine # 886 dated July 2, 2020, category "B" (majors: 113, 121, 122, 133, 184, 191, 192, 194) & by the Decree of the Ministry of Education and Science of Ukraine # 1471 dated November 26, 2020, category "B" (major: 141).

**Technical Sciences**

Scientific Editorial Board Address:  
33028 Rivne, vul. Soborna, 11, NUWEE

Tel: (0362)63-57-31

© National University of Water and  
Environmental Engineering, 2022

The collection contains scientific papers on rational natural resources use, waterworks, construction and architecture, engineering and information technology. The given Bulletin is designed for scientists, engineers, graduate students and undergraduate students of educational establishments.

**Senior Editor:** Moshynskiy V.S.,  
Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Rector.

**Deputy Senior Editor:** Savina N.B.,  
Doctor of Economic Sciences,  
Vice-Principal for Research and International Relations.



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

### Scientific Editorial Board:

- Gerasimov Ie.H.**, Candidate of Engineering, Associate Professor, Executive Secretary (NUWEE, Rivne)
- Rokochynskiy A.M.**, Doctor of Engineering, Professor (NUWEE, Rivne)
- Babych Y.M.**, Doctor of Engineering, Professor (NUWEE, Rivne)
- Bomba A.Y.**, Doctor of Engineering, Professor (NUWEE, Rivne)
- Dvorkin L.Y.**, Doctor of Engineering, Professor (NUWEE, Rivne)
- Kravets S.V.**, Doctor of Engineering, Professor (NUWEE, Rivne)
- Malanchuk Ye.Z.**, Doctor of Engineering, Professor (NUWEE, Rivne)
- Stiusarchuk V.Y.**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Corresponding Member of the National Academy of Science of Ukraine (NUWEE, Rivne)
- Trach V.M.**, Doctor of Engineering, Associate Professor (NUWEE, Rivne)
- Fylypchuk V.L.**, Doctor of Engineering, Associate Professor (NUWEE, Rivne)
- Nadutyi V.P.**, Doctor of Engineering, Professor (Institute of Geotechnical Mechanics named by M.S. Poliakov of the National Academy of Science of Ukraine, Dnipro)
- Korniienko V.Ye.**, Doctor of Engineering, Professor (NUWEE, Rivne)
- Turbal Y.V.**, Doctor of Engineering, Professor (NUWEE, Rivne)
- Naumenko Y.V.**, Doctor of Engineering, Professor (NUWEE, Rivne)
- Martynov S.Y.**, Doctor of Engineering, Professor (NUWEE, Rivne)
- Nalobina O.O.**, Doctor of Engineering, Professor (NUWEE, Rivne)
- Martyniuk P.M.**, Doctor of Engineering, Professor (NUWEE, Rivne)
- Safonyk A.P.**, Doctor of Engineering, Professor (NUWEE, Rivne)
- Pinchuk O.L.**, Candidate of Engineering, Associate Professor (NUWEE, Rivne)
- Michuta O.R.**, Candidate of Engineering, Associate Professor (NUWEE, Rivne)
- Vasylets S.V.**, Doctor of Engineering, Professor (NUWEE, Rivne)
- Davydenko V.A.**, Candidate of Engineering, Associate Professor (NUWEE, Rivne)
- Zhukovskiy V.V.**, Candidate of Engineering, Associate Professor (NUWEE, Rivne)
- Ivanchuk N.V.**, Candidate of Engineering, Associate Professor (NUWEE, Rivne)
- Zhukovska N.A.**, Candidate of Engineering, Associate Professor (NUWEE, Rivne)
- Mykhailyshyn O.L.**, Doctor of Architecture, Professor (NUWEE, Rivne)
- Serhiuk I.M.**, Candidate of Architecture, Associate Professor (NUWEE, Rivne)
- Rychkov P.A.**, Doctor of Architecture, Professor (NUWEE, Rivne)
- Eugeniusz Koda**, Doctor of Engineering (Ph.D.), Professor (Warsaw University of Life Sciences)
- Harsha Ratnaweera**, Doctor of Engineering (Ph.D.), Professor (Norwegian University of Life Sciences)
- Andrzej Struzynski**, Doctor Habilitatus, Engineer (University of Agriculture in Krakov)
- Ľuboš Jurik**, Candidate of Engineering, Associate Professor (Slovak University of Agriculture in Nitra)
- Cengiz Koç**, Doctor of Engineering, Professor (Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi)

All papers have been reviewed and accepted for publication by the Academic Council of the University on March 25, 2022, Academic Council Meeting Minutes #2.

Scientific Editorial Board Address: 33028 Rivne, vul. Soborna, 11, NUWEE  
© National University of Water and Environmental Engineering, 2022

## Зміст

### ВОДОПОСТАЧАННЯ ТА ВОДОВІДВЕДЕННЯ

Ковальчук В. А. Реконструкція міських каналізаційних очисних споруд ..... 3



Корчик Н. М.,  
Беседюк В. Ю.,  
Шугайло В. А. Очищення стічних вод готельно-ресторанних комплексів ..... 13

Олійник Т. П.,  
Маковецька О. О.,  
Кириленко Г. А.,  
Клімов С. В. Застосування зворотноосмотичних мембран для доочищення водопровідної води ..... 21

Филипчук Л. В. Автоматизація систем водопідготовки в теплоенергетиці ..... 32

Филипчук Л. В.,  
Нагорнюк К. О. Системи контролю та вимірювання параметрів рН та Eh під час очищення води ..... 41



### БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ

Ласлов С. В. Аналіз заходів шумової безпеки на автомобільних дорогах світу ..... 51

Тверда О. Я.,  
Ткачук К. К.,  
Кофанов О. Є.,  
Кофанова О. В.,  
Вовк О. О.,  
Бондаренко А. О. Інтенсифікація видобутку будівельної сировини та виробництва будівельних матеріалів для відновлення порушеної інфраструктури України ..... 65

Дворкін Л. Й.,  
Марчук В. В. Поризовані сухі суміші на основі реакційно-порошкових бетонів ..... 74



## ГІДРОТЕХНІЧНЕ БУДІВНИЦТВО, ВОДНА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ВОДНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Гриб Й. В.,  
Шинкарук Л. А.,  
Вечер В. В.

Використання гідротехнічних споруд,  
гідрологічного режиму річки случ та її  
заплави в системі захисних укріплень у  
1939 році ..... 86



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

Мисковець І. Я.,  
Мольчак Я. О.

Покращення агроекологічного стану  
дерново-підзолистих ґрунтів волині  
місцевими мінерально-сировинними  
ресурсами ..... 102

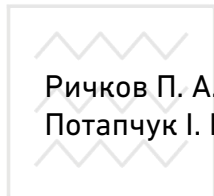
Мамаду Алума  
Діалло,  
Герасімов Є. Г.

Геостатистичний підхід до моделювання  
підземних вод для прибережного  
водоносного горизонту тіароє ..... 116

### АРХІТЕКТУРА

Ричков П. А.

Архітектурний образ будівель спортивного  
призначення 1940–1950-х рр. у містах  
України ..... 132



Ричков П. А.,  
Потапчук І. В.

Роль озеленення у формуванні  
містобудівних ансамблів України 1940–  
1950-х рр. .... 139

### ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА

Кочмарський В. З.,  
Костюк О. П.,  
Тимейчук О. Ю.

Перепад та зниження ККД водогрійних  
котлів внаслідок відкладень ..... 148

### ГЕОДЕЗІЯ ТА ЗЕМЛЕУСТРІЙ

Бухальська Т. В.,  
Янчук О. Є.,  
Трохимець С. М.

Планування раціонального використання  
порушених земель унаслідок незаконного  
видобування бурштину ..... 159

## РОЗРОБКА РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН

Шевченко Г. О.,  
Маланчук Є. З.,  
Корнієнко В. Я.,  
Чолишкіна В. В.,  
Курілов В. С.

Обґрунтування промислових кондицій  
вмісту міді і цінних металів у відвалах  
базальтових кар'єрів Волині ..... 172

Почтарьов О. В.,  
Калініченко О. В.,  
Калініченко В. О.,  
Кучерук М. О.

Дослідження впливу відхилення  
свердловини від проєктного контуру на  
якість подрібнення руди ..... 189

Бессараб І. М.,  
Подкопаєв Є. С.

Оцінка стійкості бічних порід крутого  
вугільного пласта в моделі  
вуглепородного масиву з виробками ..... 195

## ПРИКЛАДНА МАТЕМАТИКА, ІНФОРМАТИКА ТА ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА

Пінчук О. Л.,  
Герасімов Є. Г.,  
Куницький С. О.,  
Іванчук Н. В.,  
Шатний С. В.

Комп'ютерна програма для розрахунку  
втрат напору в оболонках-рукавах  
гідротехнічних систем поверхневого  
обігріву ґрунту ..... 218

Сокол О. В.,  
Цветкова Т. П.,  
Харів Н. О.

Проєктування та розробка  
автоматизованих процесів впровадження  
вебсервісу за devops методологією ..... 231

Шпортько О. В.,  
Шпортько Л. В.,  
Бомба А. Я.

Формування розкладу модифікованого  
алгоритму LZ77 у форматі Deflate з  
орієнтацією довжин однакових  
послідовностей на цілі пікселі ..... 244

Уляньчук-  
Мартинюк О. В. Алгоритми числового урахування інтегральних умов спряження в моделях середовищ з геобар'єрами ..... 261

Турбал Ю. В.,  
Тулашвілі Ю. Й. Програмна реалізація алгоритму побудови туристичного маршруту та його інформаційного супроводу ..... 281



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

Бомба А. Я.,  
Мороз І. П. Чисельно-асимптотичний метод розв'язання сингулярно збурених модельних задач про стаціонарний розподіл носіїв заряду в активній області P-I-N-діодів ..... 291

Сорока В. С.,  
Лагоднюк О. А.,  
Корбутяк В. І.,  
Клімова А. В.,  
Ровенець Т. О. Організаційно-інформаційне та документне забезпечення цифрової трансформації освітнього процесу у Національному університеті водного господарства та природокористування ..... 307

### МАШИНОЗНАВСТВО

Стрілець О. Р.,  
Сергійчук В. Ю.,  
Щучик В. О. Будова, принцип роботи та розрахунки муфти реверсивної з W-подібними пружинами ..... 324

### ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ

Кусковець С. Л.,  
Филипчук В. Л.,  
Кусковець А. С. Вибухопожежонебезпека аміачної селітри в умовах її тривалого зберігання ..... 336

Довбенко Т. О. Міжнародні імперативи системи менеджменту гігієною та безпекою праці .. 346

Бучинський О. А., Филипчук В. Л., Кусковець С. Л. Нос М. В., Тимкіна О. Л.	Впровадження ризик-орієнтованої моделі управління охороною праці на підприємствах Рівненщини ..... 355
--	--

### ХІМІЯ ТА ФІЗИКА




Національний університет водного господарства та природокористування Прохоренко М. В., Прохоренко С. В., Мороз М. В., Ярема Н. П.	Прості періодичні розв'язки одного рівняння коливань струни з імпульсною дією ..... 369
---	---




Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

## Content


### WATER SUPPLY AND WASTEWATER DISPOSAL

Kovalchuk V. A.	Municipal Wastewater Treatment Plant Reconstruction .....	3
 Korchyk N. M., Besediuk V. Y., Shuhailo V. A.	Wastewater Treatment of the Hotel-Restaurant Complexes .....	13
Oliinyk T. P., Makovetska O. O., Kyrylenko H. A., Klimov S. V.	Application of Reverse Osmosis Membranes for Tap Water Purification .....	21
Fylypchuk L. V.	Automation of Water Treatment Systems In Heat Energy .....	32
Fylypchuk L. V., Nahorniuk K. O.	Control and Measurement Systems of pH and eH Parameters During Wastewater Purification .....	41

### CONSTRUCTION AND CIVIL ENGINEERING

 Laslov S. V.	Analysis of Noise Safety Measures on the World Roads .....	51
Tverda O. Yu., Tkachuk K. K., Kofanov O. Ye., Kofanova O. V., Vovk O. O., Bondarenko A. O.	Intensification of Construction Raw Materials Extraction and Building Materials Production For Restoration of Ukrainian Infrastructure .....	65
Dvorkin L. Y., Marchuk V. V.	Porous Construction Mixes On the Basis of Reaction-Powder Concrete .....	74


## HYDROTECHNICAL CONSTRUCTION, WATER ENGINEERING AND WATER TECHNOLOGIES

- Hryb Y. V.,  
Shynkaruk L. A.,  
Vecher V. V. Use of Hydraulic Structures, Hydrological  
Regime of the River Sluch and Its Floodplain  
in the System of Protective Fortifications in  
1939 ..... 86
-  Національний університет  
водного господарства  
та природокористування  
Myskovets I. Ya.,  
Molchak Ya. O. Improvement of Agro-Ecological Condition  
of Sod-Podzolic Soils of Volyn Region With  
the Help of Local Mineral Resources ..... 102
- Mamadou  
Alouma Diallo,  
Gerasimov Ie. G. Geostatistical Approach to Groundwater  
Modelling for Thiaroye Coastal Aquifer ..... 116

## ARCHITECTURE

- Rychkov P. A. Sports Buildings Architectural Image of  
Ukrainian Cities In 1940–1950s ..... 132
- Rychkov P. A.,  
Potapchuk I. V. Role of Greening in the Formation of Urban  
Ensembles of Ukraine in 1940–1950s ..... 139

## HEAT ENERGY

-  Національний університет  
водного господарства  
та природокористування  
Kochmarskyi V. Z.,  
Kostiuk O. P.,  
Tymeichuk O. Yu. Burning and Reduction of Efficiency of Water  
Heating Boilers Due to Deposits ..... 148

## SURVEYING AND LAND STRUCTURE

- Bukhalska T. V.,  
Yanchuk O. Ye.,  
Trokhymets S. M. Planning the Rational Use of Disturbed  
Lands As a Result of Illegal Amber Mining .... 159

## WATER SUPPLY AND WASTEWATER DISPOSAL

- Shevchenko H. O.,  
Malanchuk Ye. Z.,  
Korniienko V. Ya.,  
Kurilov V. S. Justification of Industrial Conditions of  
Copper and Valuable Metals Content In the  
Dumps of The Basalt Quarries of Volyn ..... 172

Pochtarev A. V.,  
Kalinichenko O. V.,  
Kalinichenko V. O.,  
Kucheruk M. O. Study of the Influence of Well Division From  
the Project Contour On the Quality of Ore  
Crushing ..... 189

Bessarab I. M.,  
Podkopaiev Y. S. Assessment of the Stability of Wall Rocks of  
the Steep Coal Seam In the Model of Coal  
Massif With Workings ..... 195



### APPLIED MATHEMATICS, COMPUTER SCIENCE AND COMPUTER ENGINEERING

Pinchuk O. L.,  
Gerasimov Ie. G.,  
Kunyskyi S. O.,  
Ivanchuk N. V.,  
Shatnyi S. V. Computer Program For Calculation of  
Pressure Losses In Shells-Sleeves of  
Hydrotechnical Systems of Surface Heating  
Soil ..... 218

Sokol O. V.,  
Tsvietkova T. P.,  
Khariv N. O. Design and Development of Automated  
Processes of Web Service Implementation  
Using Devops Methodology ..... 231



Shportko A. V.,  
Shportko L. V.,  
Bomba A. Ya. Formation of the Decomposition of The  
Modified LZ77 Algorithm in Deflate Format  
With Orientation of Lengths of the Same  
Sequences on Whole Pixels ..... 244

Ulianchuk-  
Martyniuk O. V. Algorithms to Numerically Account For  
Integral Conjugation Conditions in Modeling  
Environments With Geobarriers ..... 261

Turbal Yu. V.,  
Tulashvili Yu. Y. Software Implementation of the Algorithm  
For Building a Tourist Route and Its  
Information Support ..... 281

Bomba A. Ya.,  
Moroz I. P. Numerical-asymptotic Method for Solving  
Singularly Perturbed Model Problems on the  
Stationary Distribution of Charge Carriers in  
the Active Region of P-I-N-diodes ..... 291

Soroka V. S., Lahodniuk O. A., Korbutiak V. I., Klimova A. V., Rovenets T. O.	Organizationally-Informative and Documentary Ensuring the Digital Transformation of the Educational Process in National University of Water and Environmental Engineering ..... 307
---	---



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

## ENGINEERING SCIENCE

Strilets O. R., Serhiichuk V. Yu., Shchuchyk V. O.	The Structure, Principle of Operation and Calculation of the Reversible Coupling With W-Shape Springs ..... 324
--	---

## OCCUPATIONAL HEALTH AND LIFE SAFETY

Kuskovets S. L., Fylypchuk V. L., Kuskovets A. S.	Explosion and Fire Safety of Ammonia Nitrate in the Conditions of Its Long-Term Storage ..... 336
---	---

Dovbenko T. O.	International Imperatives of the Hygiene and Management System Occupational Safety .... 346
----------------	--



Buchynskiy O. A., Fylypchuk V. L., Kuskovets S. L., Nos M. V., Tymkina O. L.	Introduction of Risk-Oriented Model of Labor Protection Management At Enterprises of the Rivne Region ..... 355
--	---

## CHEMISTRY AND PHYSICS

Prokhorenko M. V., Prokhorenko S. V., Moroz M. V., Yarema N. P.	Simple Periodic Solutions One Equations of String Oscillation With Impulse Influence ..... 369
--	---



Наукове видання

**ВІСНИК**  
**Національного університету водного**  
**господарства та природокористування**



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

Збірник наукових праць

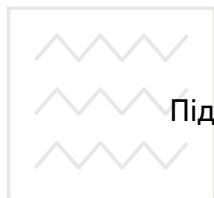
**Випуск 1(97)**

**Технічні науки**

*Комп'ютерна верстка*  
*Літературний редактор*

*Галина Сімчук*  
*Ольга Якимчук*

*Друкується в авторській редакції*



Національний університет

Підписано до друку 25.03.2022 р. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.

Ум.-друк. арк. 22,5. Обл.-вид. арк. 25,1.

Тираж 150 прим. Зам. № 5588.

*Видавець і виготовлювач*  
*Національний університет*  
*водного господарства та природокористування*  
*вул. Соборна, 11, м. Рівне, 33028.*

*Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до державного*  
*реєстру видавців, виготівників і розповсюджувачів*  
*видавничої продукції РВ № 31 від 26.04.2005 р.*

**Мисковець І. Я., к.геогр.н., доцент, Мольчак Я. О., д.геогр.н., професор** (Луцький національний технічний університет, м. Луцьк)

### **ПОКРАЩЕННЯ АГРОЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ ДЕРНОВО-ПІДЗОЛИСТИХ ҐРУНТІВ ВОЛИНІ МІСЦЕВИМИ МІНЕРАЛЬНО-СИРОВИННИМИ РЕСУРСАМИ**



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

**У статті викладено концептуальну модель управління родючістю дерново-підзолистих ґрунтів. Наведено коротку характеристику та детальний аналіз їх агроекологічного стану, умов і ефективності використання місцевих мінерально-сировинних ресурсів, що дає загальну стратегічну орієнтацію, виходячи із спрямованості агрогенної трансформації родючого потенціалу ґрунтових ресурсів.**

**Бідний мінералогічний склад дерново-підзолистих ґрунтів обумовлений легким гранулометричним складом, що визначає несприятливі водно-фізичні, фізико-хімічні та агрохімічні властивості ґрунтів. Ці ґрунти характеризуються низьким вмістом гумусу і поживних речовин, що обумовлено постійним протистоянням підзолистого процесу дерновому, а також тим, що органічні рештки трав'янистих рослин, які виростили на бідному підзолистому ґрунті, містять малозольних елементів і азоту. Крім цього, горизонти додатково обеззолюються при надходженні у ґрунт опадів.**

**Розглянуто питання щодо оптимізації агроекологічного стану дерново-підзолистих ґрунтів місцевими меліорантами та добривами, які сприяють покращенню водно-повітряного режиму та водно-фізичних властивостей дерново-підзолистих ґрунтів. Застосування на дерново-підзолистих ґрунтах комплексу заходів (внесення органо-мінеральних добрив та елементів мінерально-сировинних ресурсів) підвищує властивості і режими ґрунту, збільшує його родючість та зменшує міграцію радіонуклідів. Запропоновано запаси суглинку та глини за категоріями; карбонатної сировини за найважливішими родовищами північної частини Волині. З метою забезпечення значного покращення фізичних та агрохімічних характеристик дерново-підзолистих ґрунтів для підвищення їх родючості на кілька років, представлено**

**норми застосування складових родовищ місцевого значення та місцевих добрив у конкретних умовах. Встановлено екологічну ефективність впливу локального використання місцевих мінерально-сировинних добрив на продуктивність вирощуваних сільськогосподарських культур.**

**Ключові слова:** дерново-підзолисті ґрунти; родючість; екологічний вплив; меліоранти; добрива; агроекологічний стан; родовища копалин місцевого значення.



Національний університет  
життєвих наук і природокоористування

**Вступ.** Земельні ресурси Волинської області зазнають надмірного антропогенного впливу, який виражається в перевищенні допустимих показників його сільськогосподарської освоєності та незбалансованості структури земельних угідь. Стан земельних ресурсів близький до критичного. Серед земель найбільшу територію займають землі сільськогосподарського призначення (78%), 49% з яких є ріллею. Порушення екологічно-допустимих співвідношень площ ріллі, природних кормових і лісових угідь негативно відбилосся на стійкості агроландшафтів, які втрачають екологічну рівновагу і спричиняють великі складності при веденні сільськогосподарського виробництва. Ефективна система землекористування в умовах реформування земельних відносин неможлива без розширеного відтворення родючості ґрунтів, їх охорони і раціонального використання.

Дерново-підзолисті ґрунти є найпоширенішими на території Волині і займають понад 500 тис. га, або 34,9% від загальної площі. Вони зазнали значного радіоактивного забруднення у результаті аварії на ЧАЕС та мають низьку родючість. Для поліпшення властивостей і підвищення їхньої родючості потрібно застосовувати мінеральні добрива, які є не тільки джерелом поживних елементів для рослин, а й засобом поліпшення водного, теплового і повітряного режимів ґрунтів. Містять мало гумусу, тільки 1–3%. Для підвищення урожайності сільськогосподарських культур, які на них вирощуються, потрібно вносити сорбенти, однак залишаються маловивченими питання впливу на агроекологічний стан дерново-підзолистих ґрунтів мінерально-сировинних ресурсів, питання поширення їх запасів, властивостей мінерально-сировинних ресурсів, впливу їх на склад, родючість, властивості та режими дерново-підзолистих ґрунтів [1]. Раціональне використання родовищ копалин місцевого значення повинно сприяти не лише

стабілізації, але й підвищенню родючості дерново-підзолистих ґрунтів, що забезпечує прогресивне зростання врожайності та підвищення якості продукції рослинництва [2].

**Метою роботи** було вивчення впливу мінерально-сировинних ресурсів на агроекологічний стан дерново-підзолистих ґрунтів на підставі виконаних геоекологічних та конструктивно-географічних розробок, що стосуються покращення родючості ґрунтів використанням місцевих меліорантів.

**Матеріали і методи досліджень.** У роботі використано інформацію про дерново-підзолисті ґрунти Волинського обласного управління земельних ресурсів, Волинського центру «Облдержродючість», Волинського обласного гідрометеоцентру, картографічний матеріал, архівні і літературні джерела, монографії, публікації та інтернет-джерела. Методами дослідження є порівняльно-географічний, порівняльно-профільно-генетичний, порівняльно-аналітичний, експериментальний, польовий, енергетичний аналіз сільськогосподарського виробництва.

**Стан вивчення питання.** На території Волинської області сільськогосподарські угіддя займають 97%, в т.ч. 62% – орні землі. Область складається з різних типів ґрунтів, які відрізняються між собою як складом, так і генезисом [4]. Основними типами ґрунтів області є дерново-підзолисті, які сформовані під впливом перемінної або сумісної дії підзолистого і дернового процесів ґрунтоутворення.

Бідний мінералогічний склад дерново-підзолистих ґрунтів обумовлений легким гранулометричним складом, що визначає несприятливі водно-фізичні, фізико-хімічні та агрохімічні властивості ґрунтів. Зазначені ґрунти характеризуються низьким вмістом гумусу і поживних речовин. Це зумовлено тим, що дерновому процесу постійно протистоїть підзолистий процес, а також тим, що органічні рештки трав'янистих рослин, які вирости на бідному підзолистому ґрунті, містять мало зольних елементів і азоту. Окрім цього, горизонти додатково обеззолюються при надходженні у ґрунт опадів [3].

У цих ґрунтах переважають фульвокислоти над гуміновими кислотами. Фізико-хімічні характеристики ґрунту свідчать про низьку ступінь насиченості основами (37–40%). Обмінні основи представлені, головним чином, кальцієм і магнієм. Вміст кальцію в орному горизонті вищий ніж у нижніх горизонтах. Для цих ґрунтів характерні малі запаси рухомих форм фосфору і калію. В орному шарі

ґрунту спостерігається підвищена гідрологічна кислотність, а рН коливається в межах 5,2–6,0.

Особливе місце в окультуренні дерново-підзолистих ґрунтів повинно відводитись покращенню їх складу шляхом внесення різного роду меліорантів, а саме – мінерально-сировинних ресурсів. У цьому напрямі працювали відомі вчені: Бондарчук Л. Ф., Веремеєнко С. І., Зінчук М. І., Зінчук П. Й., Клименко О. М., Клименко М. О., Мерленко І. М., Мороз О. С., Мольчак Я. О., Носко Б. С., Шевчук М. Й. та ін.

Меліорація та сільськогосподарське використання ґрунтів, на думку вчених, в одних випадках призводить до підвищення їх ефективної родючості, в інших – до прогресивного розвитку деградації ґрунтів [9]. Інтенсивне застосування мінеральних добрив, засобів хімічного захисту рослин, масового розорювання ґрунтів значно загостило екологічні проблеми, особливо після аварії на ЧАЕС, коли основна маса радіонуклідів сконцентрувалася у верхньому шарі ґрунту [5]. Серед заходів, які були рекомендовані щодо ведення сільськогосподарського виробництва, пропонувалось захоронення забрудненого шару ґрунту та внесення підвищених доз фосфорно-калійних добрив [7].

Збагачення дерново-підзолистих ґрунтів глинистими частками сприяє покращенню їх водного режиму та водно-фізичних властивостей, а якщо поєднати їх із системою органо-мінеральних добрив та вапнуванням, то підвищиться вміст гумусу і покращиться якісний склад ґрунту [8]. Отже, із вищесказаного витікає, що застосування на дерново-підзолистих ґрунтах комплексу заходів (внесення органо-мінеральних добрив, внесення елементів мінерально-сировинних ресурсів) покращує властивості і режими ґрунту, збільшує родючість ґрунту та зменшує міграцію радіонуклідів.

**Результати досліджень.** До факторів, які визначають рухомість радіонуклідів, належать кліматичні умови, властивості речовини, в складі якої радіонукліди поступають в біосферу, та особливості генезису ґрунтів [5]. Застосовування добрив супроводжується певними змінами якісного складу гумусу. Зміна реакції ґрунтового розчину шляхом вапнування призводить до зниження вмісту радіонуклідів у рослинах, а сільськогосподарське використання перетворює мінералогічний склад дерново-підзолистих ґрунтів. Внесення добрив та вапнякових матеріалів призводить до зміни мінералогічного складу глинистої фракції дерново-підзолистих ґрунтів, з'являються смектити, що свідчить про покращення

фізичного складу ґрунту в процесі його окультурення, а також суттєво покращує їхні водно-фізичні властивості, водно-повітряний режим, збільшуються запаси вологи.

Покращення агроекологічного стану дерново-підзолистих ґрунтів можна здійснити за рахунок заходів, представлених у (табл. 1).

Із вищезазначеного важливим є вивчення питань запасів родовищ місцевого значення та їх впливу на покращення родючості дерново-підзолистих ґрунтів і їхнього агроекологічного стану.



Таблиця 1


Внесення органічних та мінеральних добрив під сільськогосподарські культури (дані Волинського центру «Облдержродючість»)

Вид добрив	Роки								
	1990	1995	2000	2005	2010	2011	2013	2017	2021
Загальна посівна площа, тис. га	818	624	376	222	170	183	199	197	205
Мінеральні добрива									
Внесено у ґрунт поживних речовин, на 1 га, кг посівної площі	233	113	28	63	79	97	108	117	133
Органічні добрива									
Внесено на 1 га, т посівної площі	23,88	16,4	9,9	6,6	4,7	4,2	3,9	3,3	3,2

У геологічному розміщенні Волинська область розташована на південно-західній окраїні Східноєвропейської платформи в межах двох структурних елементів – Львівської впадини і західного схилу Українського кристалічного щита.

Мінерально-сировинна база області має значний потенціал, спроможний забезпечити подальший розвиток промисловості у ринкових умовах.

Як відомо, корисні копалини загальнодержавного значення поділяються на п'ять груп. Особливе значення в народному господарстві має третя група неметалевих корисних копалин – це родовища копалин місцевого значення, а саме: пісок, глина, крейда,



галька, гравій, ракушняк, вапняк, гіпс, сапропель, гажа, лес, граніт, пісковик, сланець, суглинок, супісок тощо, які використовуються для хімічних меліорацій ґрунтів як сировина для будівельного вапна та гіпсу, сировина піщано-гравійна, сировина цегельно-черепична. Волинська область порівняно небагата на родовища копалин місцевого значення. Ними є глини, сапропель, суглинок, крейда, фосфорити зернисті [6]. Мергелі, суглинки належать до четвертинних геологічних відкладів, які, на відміну від найдавніших геологічних утворень, на Волині поширені майже повсюди і відсутні лише там, де непорушені техногенним втручанням людини.

Четвертинні відклади Волині досить різноманітні та мають свої особливості у розміщенні. На півдні області поширені верхньочетвертинні еолово-делювіальні відклади (лісові суглинки та супіски). Майже всю центральну частину займають середньочетвертинні водно-льодовикові відклади: піски різнозернисті, суглинки, супіски. Лише «острівцями» зустрічаються моренні (валунні супіски, піщано-гравійні піски), а також верхньокрейдяні відклади (крейда, мергелі). На півночі, в долинах Прип'яті та в долинах її приток, трапляються верхньочетвертинні алювіальні відклади першої надзаплавної тераси (піски, суглинки). Найглибше верхньочетвертинні алювіальні відклади поширені біля Камінь-Каширська, а також на заході та на півночі. Ближче до поверхні вони знаходяться на півдні та на південному сході, а з виступом менше 5 метрів зустрічаються у Любомльському, Ковельському, Старовижівському та Маневицькому районах.

Крейдові відклади потужністю від 70 м (сміт Маневичі) до 280 м (м. Любомль) розчленовані древньою ерозією, де поширені, переважно, четвертинні відклади. Поліська частина області сформована водно-льодовиковими відкладами, а в лісостеповій частині поширені леси. Проте, результати досліджень показують, що використання копалин місцевих родовищ для покращення властивостей та режимів дерново-підзолистих земель є виправданим, у переважній більшості, при розташуванні місця видобування близько до місця застосування [10].

Мінерально-сировинний потенціал Волині характеризується наявністю в її надрах значної кількості мінерально-сировинних ресурсів (суглинки, глини, карбонатні породи, торф, сапропель та фосфорити), які використовуються як добрива для сільськогосподарських культур (табл. 2).

Тому для сільськогосподарських культур як добрива більше використовуються копалини місцевих родовищ північної частини області, де вони є найпоширенішими [8].

У північних і центральних частинах області знаходяться потужні (до кількох метрів) поклади глини та суглинків. Карбонатна сировина, торфові запаси, родовища зернистих та жовтих фосфоритів – переважно в перехідній та північній частині області. Запаси крейди поширені у центральній та південній частинах області. Аналізуючи дані про запаси та розміщення мінерально-сировинних ресурсів (табл. 3, 4), слід зазначити, що суглинки та глини зустрічаються на території області переважно у південних районах, які залягають практично на поверхні і перекривають усі дочетвертинні відклади. Потужність цих порід досягає 20 м і більше. Крейда на Волині унікальна, має високий вміст кальцію і використовують її для виробництва вапна, цементу та вапнування кислих ґрунтів Полісся.

Таблиця 2

Мінерально-сировинні ресурси (МСР) Волинської області  
(за даними ПДРГП «Північгеологія»)

Види МСР	Кількість родовищ		Кількість розвіданих родовищ		Одиниці виміру	Видобуток сировини у 2020 р.	Балансові запаси на початок 2021 р.
	всього	в т.ч. розроблено	всього	в т.ч. розроблено			
Пісок	56	10	19	5	млн м <sup>3</sup>	0,453	62,24
Крейда	29	10	10	3	млн т	0,061	29,94
Глини та суглинки	41	10	26	8	млн м <sup>3</sup>	0,211	36,5
Сапропель	198	6	191	6	млн м <sup>3</sup>	0,028	65,59
Торф	417	6	231	7	млн т	0,24	128,8
Фосфорити	4	1	4	1	млн т	0,012	1,3



Таблиця 3

Запаси суглинку та глини за категоріями та найважливішими родовищами північної частини Волинської області, тис. м<sup>3</sup>  
(за даними ВАТ «Північукргеологія»)

Назва родовищ	Вид сировини	Балансові запаси категорій				Незатверджені запаси
		A	B	C <sub>1</sub>	A+B+C <sub>1</sub>	
Городоцьке	суглинок	43	103	232	378	
Галузіївське	суглинок	28	108	58	194	
Городненське	глина	121	213	577	911	
Кадищенське	суглинок, глина	168	430	1013	1614	
Олицьке	суглинок	726	711	684	2121	
	лес	-	-	304	304	
Арсенівське	суглинок	-	127	243	370	
Любчівське	суглинок	-	299	521	820	
Дубечнівське	глина	-	-	609	609	
Потоківське	глина, суглинок	-	-	2330	2330	
Селецьке	суглинок	-	73	243	316	
Усього по родовищам півночі області		1086	2064	6817	9967	
Усього по області		4177	10144	19519	33840	8395

За кількістю поживних речовин, гумусу, який коливається в межах від 0,6 до 1,6%, якщо вміст фізичної глини до 25% – вміст гумусу зростає до показників 2,2–4,0%, так визначають їх родючість, кількість яких корегується людиною для покращення стану. Для цього вносять добрива, високі дози яких забезпечують значне покращення фізичних та агрохімічних характеристик ґрунтів, таким чином підвищують їх родючість на кілька років.


Таблиця 4

Запаси карбонатної сировини за найважливішими родовищами північної частини Волині, тис. м<sup>3</sup> (за даними ВАТ «Північукргеологія»)

Назва родовищ	Вид сировини	Балансові запаси категорій			
		A	B	C <sub>1</sub>	A+B+C <sub>1</sub>
Череваське	крейда	83	261	276	620
Городилецьке	крейда	296	311	3169	3776
Великобузьке	крейда	запаси не затверджувалися			
Пожарське	крейда	328	656	-	984
Улянівське	крейда	3587	2324	-	5911
Тростянецьке	крейда	запаси не затверджувалися			
Городецьке	крейда	запаси не затверджувалися			
Полапське	крейда	запаси не затверджувалися			
Луківське	крейда	1258	3059	6192	10509
Всього по родовищам півночі області	крейда	5635	6872	9913	22420
Всього по області	крейда	7237	10270	11395	28903

Значна частина дерново-підзолистих ґрунтів Волині має підвищену кислотність, здебільшого характеризується невисоким вмістом поживних елементів, особливо фосфору та калію, а також мікроелементів (Клименко, 2002). На цих ґрунтах, в окремі періоди вегетації, помітний дефіцит легкозасвоюваних сполук азоту. Все це вимагає постійних зусиль, спрямованих на підвищення родючості за рахунок створення бездефіцитного балансу гумусу [7].

Внесення вапна в одній нормі по ГК значно покращує реакцію ґрунтового розчину в бік її нейтралізації. Причому ці зміни з'являються вже в перший рік використання вапна. Дія вапна найсильніше проявляється в орному шарі ґрунту, оскільки в цьому шарі вапно рівномірно перемішується та вступає у взаємодію з ґрунтовим розчином [10]. Вапнування значно підвищує біологічну активність дерново-підзолистих ґрунтів: стимулює розвиток мікроорганізмів, які мають важливу агрономічну роль (амоніфікаторів, нітрифікаторів, целюлозо-руйнуючих), посилює активність процесів нітрифікації, азотофікації, синтезу амінокислот, целюлозоруйнування та інше.



Вапнування дозволяє зберегти родючість ґрунтів ненасиченими основами, що забезпечує високу ефективність мінеральних добрив при тривалому використанні. При вапнуванні посилюється мобілізація фосфатів у ґрунті, покращується живлення рослин фосфором. Високі прирости врожаю спостерігаються, коли вносяться мінеральні добрива разом із суглинком [8]. Таким чином, локальне внесення як традиційних добрив (суперфосфату), так і копалин місцевого значення покращує фосфорний режим ґрунтів і підвищує їх біопродуктивність. Найсуттєвіший вплив на оптимізацію родючості дерново-підзолистих ґрунтів чинить локальне внесення мінеральних добрив та копалин місцевого значення, порівняно із розкидним способом застосування, як таке, що значною мірою задовольняє потреби рослин у біогенних елементах протягом вегетаційного періоду як у прямій дії, так і в післядії. Проте розроблені та запропоновані технології не повністю враховують доцільність застосування складових родовищ місцевого значення для покращення агроекологічного стану дерново-підзолистих земель, не розроблено методики реалізації екологічно обґрунтованих норм і способи внесення цих складових та удобрюючих речовин і економічної окупності застосування складових родовищ місцевого значення та місцевих добрив у конкретних умовах [8]. Одним із ефективних прийомів покращення родючості дерново-підзолистих ґрунтів є альтернативні способи внесення меліорантів та добрив, так би мовити локальне та стрічкове внесення.

Результати щодо впливу складових мінерально-сировинних ресурсів на урожайність сільськогосподарських культур, отримані [6], показують, що внесення суглинку, мергелю, туфу забезпечувало подальше зростання урожайності сільськогосподарських культур. При внесенні суглинку в нормі 200 т/га та 300 т/га на фоні мінеральних добрив мало місце збільшення урожаю картоплі на 50% та 139%, а кукурудзи з тими ж нормами – на 186% та 196% відповідно. Внесення мергелю в нормі 40 т/га та 80 т/га і мінеральних добрив забезпечило надвишки урожаю картоплі на 100% та 121%, а кукурудзи – на 236% та 244%, відповідно. Внесення меліорантів суглинку, мергелю, туфу забезпечувало подальше зростання урожайності сільськогосподарських культур за рахунок збільшення фракцій фізичної глини, зменшенню кислотності, покращенню властивостей ґрунтів. Існують рекомендації щодо

внесення складових родовищ місцевого значення на забруднені радіонуклідами ґрунти Західного Полісся, в яких визначені оптимальні норми піску, суглинку або глини (200–400 т/га). Для дерново-підзолистих ґрунтів, з метою зниження надходження радіонуклідів до рослин, необхідно вносити на фоні органо-мінеральних добрив глину, суглинок до 20–30 т/га або мергель до 40–60 т/га.



**Висновки:** 1. Просторове різноманіття ґрунтів Волині визначається географічним перерозподілом кліматичних ресурсів, геологічними й орографічними чинниками, ступенем залісненості та дренаваністю територій. 2. Для поліпшення властивостей і підвищення родючості дерново-підзолистих ґрунтів Волині, які займають понад 500 тис. га, або 34,9% від загальної площі, потрібно застосовувати мінерально-сировинні ресурси, які є не тільки джерелом поживних елементів для рослин, а й засобом поліпшення водного, теплового і повітряного режимів ґрунтів. 3. Волинська область, особливо її північна частина, характеризується значними запасами копалин місцевого значення – суглинків, глини, карбонатних порід, торфу, сапропелю, фосфоритів і їх різновидностей, які можуть бути використані як меліоранти та місцеві добрива для оптимізації агроекологічного стану дерново-підзолистих ґрунтів. 4. Внесення в дерново-підзолисті ґрунти складових мінерально-сировинних ресурсів сприяє покращенню водно-повітряного режиму ґрунтів та режиму рівнів ґрунтових вод, а також підвищенню врожайності сільськогосподарських культур та зниженню надходження Цезію – 137 до рослинної продукції.

1. Андрощук І. В., Мольчак Я. О., Мисковець І. Я. Геоінформаційне моделювання та екологічна оцінка природного агроресурсного потенціалу : монографія. Луцьк : РВВ ЛНТУ, 2016. 164 с. 2. Бондарчук Л. Ф. Особливості використання меліорантів для покращення агроекологічних властивостей ґрунтів Волині. *Сільськогосподарські машини*. Луцьк : РВВ ЛНТУ, 2002. Вип. 7. С. 30–33. 3. Веремеєнко С. І., Мороз О. С. Застосування суглинків, мергелів та туфів як меліорантів на землях, що забруднені радіонуклідами. *Агрохімія і ґрунтознавство* : міжвідомчий тематичний збірник. Спецвипуск до V з'їзду агрохіміків та ґрунтознавців. Харків, 1998. С. 118–119. 4. Ґрунти Волинської області : монографія / М. Й. Щевчук, М. І. Зінчук, П. Й. Зінчук та ін. ; за ред. М. Й. Щевчука, М. І. Зінчука, П. Й. Зінчука. 2-ге вид. Луцьк : Вежа-Друк, 2016. 144 с. 5. Клименко О. М. Розробка технології меліорації забруднених радіонуклідами ґрунтів внесенням меліорантів у

суспензійному стані : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Рівне, 2002. 18 с.

**6.** Мерленко І. М., Зінчук М. І., Бондарчук Л. Ф. Проведення еколого-меліоративного моніторингу осушених земель Полісся України. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. Київ-Луцьк, 2002. Т. 4. С. 243–247. **7.** Мороз О. С. Вплив меліорантів на агроекологічний стан дерново-підзолистих ґрунтів Полісся України : автореф. дис. ... канд. с.-г. наук. Житомир, 2000. 18 с.

**8.** Мольчак Я. О., Бондарчук Л. Ф., Бондарчук С. П. Оптимізація агроекологічного стану осушуваних земель шляхом використання місцевих меліорантів та добрив : монографія. Луцьк : РВВ ЛНТУ, 2009. 195 с.

**9.** Мольчак Я. О., Мисковець І. Я. Покращення агроекологічного стану дерново-підзолистих ґрунтів Волині родовищами місцевого значення. *Наукові засади підвищення ефективності сільськогосподарського виробництва* : зб. наук. праць. Харків : ХНАУ, 2020. С. 61–64. **10.** Шевчук М. Й., Гаврилюк В. А. Використання місцевих фосфоритів, продуктів їх переробки та фосфатний режим дерново-слабопідзолистих ґрунтів. *Агрохімія і ґрунтознавство*. Спец. випуск до VI з'їзду УТГА. Харків-Луцьк, 2002. Книга 4. С. 46–51.

## REFERENCES:

**1.** Androshchuk I. V., Molchak Ya. O., Myskovets I. Ya. Heoinformatsiine modeliuвання та ekolohichna otsinka pryrodnoho ahroresursnooho potentsialu : monohrafiia. Lutsk : RVV LNTU, 2016. 164 s. **2.** Bondarchuk L. F. Osoblyvosti vykorystannia meliorantiv dlia pokrashchennia ahroekolohichnykh vlastyvostei gruntiv Volyni. *Silskohospodarski mashyny*. Lutsk : RVV LNTU, 2002. Vyp. 7. S. 30–33. **3.** Veremeienko S. I., Moroz O. S. Zastosuvannia suhlynkiv, merheliv ta tufiv yak meliorantiv na zemliakh, shcho zabrudneni radionuklidamy. *Ahrokhimiia i gruntoznavstvo* : mizhvidomchyi tematychnyi zbirnyk. Spetsvypusk do V zizdu ahrokhimikiv ta gruntoznavstiv. Kharkiv, 1998. S. 118–119. **4.** Grunty Volynskoi oblasti : monohrafiia / M. Y. Shchevchuk, M. I. Zinchuk, P. Y. Zinchuk ta in. ; za red. M. Y. Shchevchuka, M. I. Zinchuk, P. Y. Zinchuka. 2-he vyd. Lutsk : Vezha-Druk, 2016. 144 s. **5.** Klymenko O. M. Rozrobka tekhnolohii melioratsii zabrudnenykh radionuklidamy gruntiv vnesenniam meliorantiv u suspenziinomu stani : avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk. Rivne, 2002. 18 s. **6.** Merlenko I. M., Zinchuk M. I., Bondarchuk L. F. Provedennia ekoloho-melioratyvnoho monitorynhu osushenykh zemel Polissia Ukrainy. *Hidrolohiia, hidrokimiia i hidroeolohiia*. Kyiv-Lutsk, 2002. T. 4. S. 243–247. **7.** Moroz O. S. Vplyv meliorantiv na ahroekolohichni stan dernovo-pidzolistykh gruntiv Polissia Ukrainy : avtoref. dys. ... kand. s.-h. nauk. Zhytomyr, 2000. 18 s. **8.** Molchak Ya. O., Bondarchuk L. F., Bondarchuk S. P. Optyimizatsiia ahroekolohichnoho stanu osushuvanykh zemel shliakhom vykorystannia mistsevykh meliorantiv ta dobryv : monohrafiia. Lutsk : RVV

LNTU, 2009. 195 s. **9.** Molchak Ya. O., Myskovets I. Ya. Pokrashchennia ahroekolohichnoho stanu dernovo-podzolistykh gruntiv Volyni rodovyshchamy mistsevoho znachennia. *Naukovi zasady pidvyshchennia efektyvnosti silskohospodarskoho vyrobnytstva* : zb. nauk. prats. Kharkiv : KhNAU, 2020. S. 61–64. **10.** Shevchuk M. Y., Havryliuk V. A. Vykorystannia mistsevykh fosforytiv, produktiv yikh pererobky ta fosfatnyi rezhym dernovo-slabopodzolistykh gruntiv. *Ahrokhimiia i gruntoznavstvo. Spets. vypusk do VI zizdu UHA*. Kharkiv-Lutsk, 2002. Knyha 4. S. 46–51.



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

**Myskovets I. Ya., Candidate of Geographical Sciences (Ph.D.),  
Associate Professor, Molchak Ya. O., Doctor of Geographical Sciences,  
Professor (Lutsk National Technical University, Lutsk)**

### **IMPROVEMENT OF AGRO-ECOLOGICAL CONDITION OF SOD-PODZOLIC SOILS OF VOLYN REGION WITH THE HELP OF LOCAL MINERAL RESOURCES**

**The article presents a conceptual model of fertility management of sod-podzolic soils, gives a brief description and detailed analysis of their agro-ecological condition, conditions and efficiency of local mineral resources. It gives a general strategic orientation based on the direction of agrogenic transformation of the fertile potential of soil resources.**

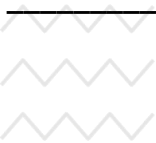
**Land resources of Volyn region sustains excessive anthropogenic impact, which is expressed in exceeding the allowable indicators of its agricultural development and imbalance in the structure of land. The state of land resources is close to critical. Among the lands, the largest territory is occupied by agricultural fields (78%), 49% of which are arable land. Violation of ecologically acceptable ratios of arable lands, natural forage and forest lands have been negatively affected the sustainability of agricultural landscapes, which has lost ecological balance and caused great difficulties in agricultural production.**

**The poor mineralogical composition of sod-podzolic soils is due to the light particle size distribution, which determines the unfavorable water-physical, physico-chemical and agrochemical properties of these soils. Such soils are characterized by low content of humus and nutrients. This is due to the fact that the sod process is constantly opposed by the podzolic process, as well as the fact that**

the organic remains of herbaceous plants grown on poor podzolic soil contain little ash elements and nitrogen. In addition, the horizons are additionally deashed when precipitation enters the soil.

The issues consider the optimization of agroecological condition of sod-podzolic soils with the help of local ameliorants and fertilizers that contribute to the improvement of water-air regime and water-physical properties of sod-podzolic soils. The application of measures set (in particular, application of organo-mineral fertilizers and elements of mineral resources) on sod-podzolic soils increases the properties and regimes of the soil, enlarges its fertility and reduces the migration of radionuclides. Stocks of loam and clay by categories are offered; carbonate raw materials for the most important deposits of the northern part of Volyn region. In order to significantly accomplish the physical and agrochemical characteristics of sod-podzolic soils was to increase their fertility, for long years. The norms of application the constituent deposits of local importance are presented and local fertilizers in specific conditions are described. The ecological influence efficiency was established by usage of local mineral fertilizers on the productivity of cultivating crops.

**Keywords:** sod-podzolic soils; fertility; ecological impact; ameliorants; fertilizers; agro-ecological condition; deposits of local significance.



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

**Mamadou Alouma Diallo, Doctor of Sciences, Engineer, Director of Carmels Research Institute** (10500, Medina, Dakar, Senegal, [carmels.tech@gmail.com](mailto:carmels.tech@gmail.com)), **Gerasimov Ie. G., Doctor of Engineering, Associate Professor** (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, Ukraine, [e.g.gerasimov@nuwm.edu.ua](mailto:e.g.gerasimov@nuwm.edu.ua))



Національний університет

водо- та гідрологічної інженерії

## **GEOSTATISTICAL APPROACH TO GROUNDWATER MODELLING FOR THIAROYE COASTAL AQUIFER**

**In this paper, we investigate a combination of geostatistical and mathematical methods for explaining the Thiaroye coastal aquifer groundwater dynamics and contamination by both seawater and Nitrates. The purposes of this investigation were to provide an overview of current groundwater hydraulic heads and quality spatial distributions in the study area. First we use GIS data to specify a model of hydraulic heads depending on both GPS coordinates and time using an ordinary least square estimation performed on Eviews. Then we use the governing partial differential equations for unconfined aquifers to calculate net recharge. In a second part, we specify geospatial models for explaining the variations of electric conductivity and for establishing relationships between nitrate and sodium concentrations. We find that throughout the study area, there is a weak monthly recharge rate certainly due to efforts aiming to prevent the area from flooding by controlling the water table level with pumping systems. Furthermore, correlations show that sodium and electric conductivity increase with depth and that nitrate and sodium concentrations are inversely correlated.**

***Keywords:* Hydraulic heads; GIS data; Unconfined aquifer; Electrical conductivity; Groundwater quality; Statistical modelling; tests of hypothesis.**

### **1. Introduction:**

The Thiaroye aquifer is an unconfined and coastal aquifer. Situated in the peri-urban part of Dakar, this region is located in an old dune network formed by hills and depressions. As schematized in figure 1, it concerns several areas like Guediawaye, Thiaroye, Pikine Yeumbel, Boune, Keur Massar, Malika, Tivavouane Peul. The water table is naturally close to the surface and without human intervention, the water table forms lakes in these depressions.



Almost 40% of the population has settled in these areas with potential risk of flooding, coastal erosion or sea level rise. This is the reason why Thiaroye groundwater resource evaluation and management still rise two main issues:

- What will be the effect of human intervention like pumping on the area water levels?
- Are there likely to be any undesirable side effects of development, such as seawater intrusion or any contamination that could serve to limit yields.



Национальний  
водного  
та природ

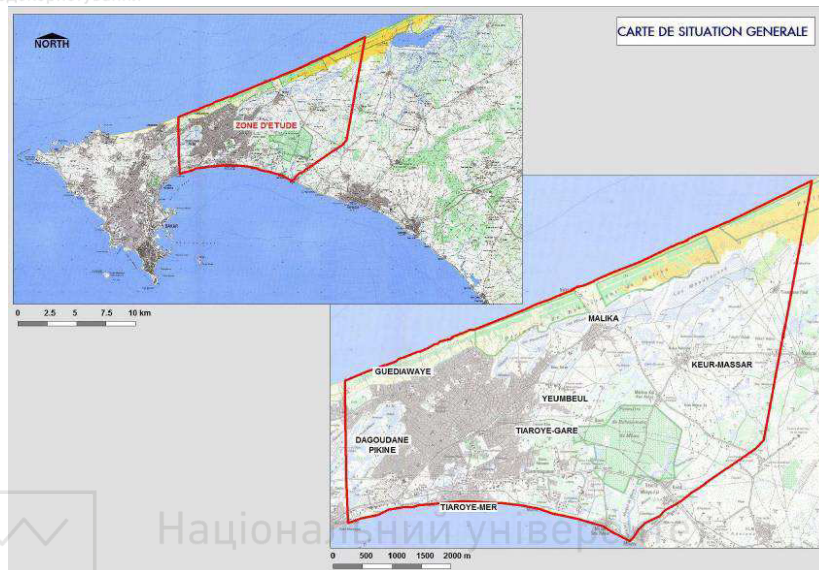


Figure 1. Thiaroye area (tire du PDD, rap. technique, Annexe 1, p. 9)

In 1950, the city of Dakar began pumping its groundwater for drinking with an average flow rate of 17,000 m<sup>3</sup> / d. This induced a lowering of the water table level. As water table is in contact with the sea, this drop in level has created a risk of sea water intrusion into the unsalted water of the groundwater. As this risk became major, the exploitation of the water table was stopped between 1959–1961 (Cabinet SGI-Merlin, 2010).

In 1961, pumping resumed. However, it is reduced to around 10,000 m<sup>3</sup>/d to protect the groundwater from salt water intrusions (Cabinet SGI-Merlin, 2010). This pumping will last until 1988 and will cause a lowering of water table level along with drying up of naturally flooded land (ANAMS). In the same time the land drained by the drop in the water table was very quickly used to build new homes for welcoming people coming from rural areas. This area corresponds to the city of Pikine where approximately 900,000 people currently live.

This constant increase of the population of Dakar justifies the importation of water from Lake Guiers to meet drinking water needs. Part of this water is used in Pikine and is added to the natural recharge of this water table.

In this framework and for addressing the two key issues outlined earlier in the introduction, through modelling tools, we will study two problems using geostatistical models: one model simulating the distribution of heads and showing groundwater flownets and then, in a second part, we will study the contamination problem in order to find links that will be useful for a better understanding and management of this groundwater.

Geostatistics is a collection of statistical techniques for the analysis of spatial data. This technique can be used in a variety of groundwater modelling studies, such as mapping of spatial variables, estimation and simulation of piezometric heads and transmissivities, estimation of groundwater flow velocity based on observed heads, estimation of contamination volume based on point measurements, design of sampling and monitoring networks, etc (Sarkar B.C., 2019). Geostatistical methods are generally associated to interpolation techniques. Kriging is a linear interpolation method for which observation points are correctly re-estimated. Ordinary Kriging (OK) and lognormal Kriging were used to produce the spatial patterns of heavy metals and disjunctive Kriging was applied to quantify the probability of heavy metal concentrations higher than their guide values (Lui X et al. 2005). In the study conducted by Hu et al. (2005), spatial variability of groundwater quality and risk of NO<sub>3</sub> pollution in groundwater in the central North China Plain were determined using the OK method. Geostatistical methods, Kriging and co-Kriging, were applied by Pozdnyakova and Zhang (1999) to estimate the sodium adsorption ratio (SAR) in a 3,375 ha agricultural field. The spatial distribution of nitrate concentration in the aquifer of central Italy (about 110 km<sup>2</sup>) was investigated and co-Kriging and OK techniques were compared in another study by D'Agostino et al. (1998). In this present study, instead of interpolation methods, we will use Ordinary Least Square estimations. This method has the advantage of providing mathematically continuous and regular functions that can be handled easily and specifically that can accommodate to partial differential equations for function or parameter estimation. In this framework, after the OLS estimation step for getting an equation linking piezometric heads, geospatial coordinates and time, we use this equation to estimate the net recharge in the area using the governing equation in unconfined aquifers. In the second part, for assessing the ongoing

groundwater contamination in the area, we use OLS estimation along with statistical tests.

## 2. Modelling of groundwater dynamics:

Three factors that are reduced pumping, increased recharge and precipitation can explain the rise of water table in Thiaroye area. This rise in water table level is a disaster for the inhabitants of Pikine since it induces a high risk of flooding. It was the reason why the senegalese government undertook an important project of rehabilitation of old boreholes and construction of new ones in 2014. The objective was to install sufficient pumping capacities throughout the Thiaroye zone that will make it possible to meet the water demand of farmers in the market garden area and fight floodings simultaneously. So in this present modelling work, we aim to assess the aquifer behavior with respect to these discharge wells and to calculate the net recharge within the area.

In general, a model should be calibrated against one period of the historical record, then verified against another period of record (Freeze, R. Allan, and John A. Cherry, 1979). In our case, for the calibration of the hydraulic heads, we will use a least square criteria (2) using the model expressed by equation (1):

$$h = \alpha_0 + P(t) + \varphi(x, y). \quad (1)$$

Where  $h$  is the hydraulic head in meters,  $\alpha_0$  is a constant expressed in meters,  $P(t)$  is a polynomial function of time  $t$  only and  $\varphi(x, y)$  a polynomial function of space coordinates  $x$  and  $y$  only. So the calibration will consist in finding the best polynomial functions  $P$  and  $Q$  minimizing the residual  $R_h$ .

$$R_h = \frac{1}{n_{obs}} \left[ \sum_{(i=1)}^{(n_{obs})} (h_{measured(i)} - h_{modelled(i)})^2 \right]^{1/2}. \quad (2)$$

Table 2 provides the values of  $h_{measured}$  for three selected piezometers installed at Pikine, Boune and Tivavouane Peulh from May 2005 to April 2017.

In this table and the following mathematical model, the spatial coordinates are translated in order to handle relatively «small» numbers.

The real coordinates  $X_r$  and  $Y_r$  along with new  $X$  and  $Y$  coordinates obtained after translation by a vector  $v = \begin{pmatrix} -244129 \\ -1636215 \end{pmatrix}$  are presented in the below table 1.

Table 1

**Spatial coordinates of the piezometers**

Points	$X_r$	$Y_r$	$X$	$Y$
<b>P25</b>	244129	1636215	0	0
<b>P26</b>	247982	1633711	3853	-2504
<b>P28</b>	255065	1639393	10936	3178

Table 2

Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

**Hydraulic head of each piezometer as function of time**

Points	Time (months)		1	3	5	7	9	39	43	44	144
	X	Y									
	<b>Piezometric heights (m)</b>										
<b>P25</b>	0	0	-1.36	-1.26	-2.22	-1.99	-1.77	-1.42	-1.97	-1.78	-3.48
<b>P26</b>	3853	-2504	-2.34	-2.35	-3.7	-3.61	-3.52	-3.7	-3.65	-3.84	-5.27
<b>P28</b>	-7650	-1244	0.37	0.45	-0.07	-0.08	-0.09	0.76	-0.1	-0.115	-1.615

The *water table* is best defined as the surface on which the fluid pressure  $p$  in the pores of a porous medium is exactly atmospheric. If  $p$  is measured in gage pressure, then on the water table,  $p = 0$ . Since

$h = z + \psi$ , with  $\psi = \frac{p}{\rho g}$  this implies  $\psi = 0$ , and the hydraulic head at any point on the water table must be equal to the elevation  $z$  of the water table at that point.

$$h = z.$$

Meaning that the hydraulic head is given by only the knowledge of the altitude of the water table.

Groundwater flow in an unconfined aquifer is modeled by a parabolic PDE of the following form

$$S_y \frac{\partial h}{\partial t} - \nabla \cdot (T \nabla h) = \Delta R_N. \quad (3)$$

With:

$h$  – piezometric head (m);

$\Delta R_N$  – net recharge (m/s);

$T$  – Transmissivity of the aquifer  $m^2 / s$ ;

$S_y$  – Storativity or specific yield of the aquifer.

In table 3 below, we present the different values of the transmissivity  $T$ , hydraulic conductivity  $K$  and specific yield  $S_y$  considered for each of our three piezometers. Values of  $K$  and  $S_y$  are obtained from (Harold KOUKOUI et Ndéné NDIAYE, 2003). For the computation of transmissivities  $T$ , we will consider a mean depth to

substratum of 20 meters within the Thiaroye area (refer to SONYA CHAOUI, 1996).

Table 3

Values of  $K$  and  $Sy$  and  $T$  for each piezometer

Points	$K$ (m/s)	$Sy$ (%)	$T$ ( $m^2/s$ )
P25	$1.75 \cdot 10^{-4}$	4.8	$3.5 \cdot 10^{-3}$
P26	$1.85 \cdot 10^{-4}$	2.1	$3.7 \cdot 10^{-3}$
P28	$1.79 \cdot 10^{-4}$	1.5	$3.58 \cdot 10^{-3}$

These values are consistent with those in the report of CHAOUI, S. (1996). The hydrodynamic characteristics of the aquifer were also estimated by the MH / WHO study in 1972 where the values of transmissivity are between  $1.6 \cdot 10^{-3}$  and  $6.75 \cdot 10^{-3} m^2/s$ . The highest values are found in the east and south of Retba Lake. In the Thiaroye basin, the transmissivity is of the order of  $3 \cdot 10^{-3} m^2/s$ . The values of the storage coefficient are between 0.3% and 14%".

The unit time chosen in this study is the « month ». In this study, we will chose a polynomial function  $P$  of degree 4 in time and a polynomial function  $\varphi$  of degree 2 in space coordinates. After performing an OLS estimation using equation 1 and Eviews software, one obtains table 4 below.

Table 4

Results of the estimation of hydraulic heads  $h$  with Eviews

Dependent Variable:  $h$

Method: Least Squares

Date: 10/05/20 Time: 13:14

Sample: 1 27

Included observations: 27

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	-0.883432	0.217187	4.067613	0.0006
$t$	-0.235791	0.054611	4.317669	0.0003
$t^2$	0.014664	0.003798	-3.861182	0.0010
$t^3$	-0.000284	8.26E-05	3.440460	0.0026
$t^4$	1.34E-06	4.09E-07	-3.272134	0.0038
$X^2$	4.13E-08	2.50E-09	-16.50190	0.0000
$Y^2$	-3.59E-07	2.33E-08	15.39025	0.0000
R-squared	0.969468	Mean dependent var	1.841481	

Continuation of the table 4

Adjusted R-squared	0.960309	S.D. dependent var	1.620609
S.E. of regression	0.322869	Akaike info criterion	0.795274
Sum squared resid	2.084888	Schwarz criterion	1.131232
Log likelihood	-3.736198	F-statistic	105.8423
Durbin-Watson stat	2.203092	Prob(F-statistic)	0.000000

According to the above table 4 and with student tests, one can see that all independent variables of the model are significant at an error threshold of at most 0.3%.

We therefore obtain the following equation.

$$h = -0.88343 - 0.23579 \cdot t + 0.01466 \cdot t^2 - 0.00028 \cdot t^3 + 1.338 \cdot 10^{(-6)} t^4 + 4.131 \cdot 10^{(-8)} \cdot X^2 - 3.588 \cdot 10^{(-7)} \cdot Y^2 \quad (4)$$

Note that P25 is located at Pikine, P26 at Boune and P28 at Tivavouane Peulh. A groundwater flownet is a 2D representation of a set of equipotential lines or flowlines. The construction of flow nets is one of the most powerful analytical tools for the analysis of groundwater flow (Freeze, R. Allan, and John A. Cherry, 1979). The flow net represented in figure 2 below shows that groundwater flows from Pikine to Boune and from Tivavouane Peulh to Boune. Moreover, in figure 3 below, we show the position of the three piezometers in a Dakar area map.

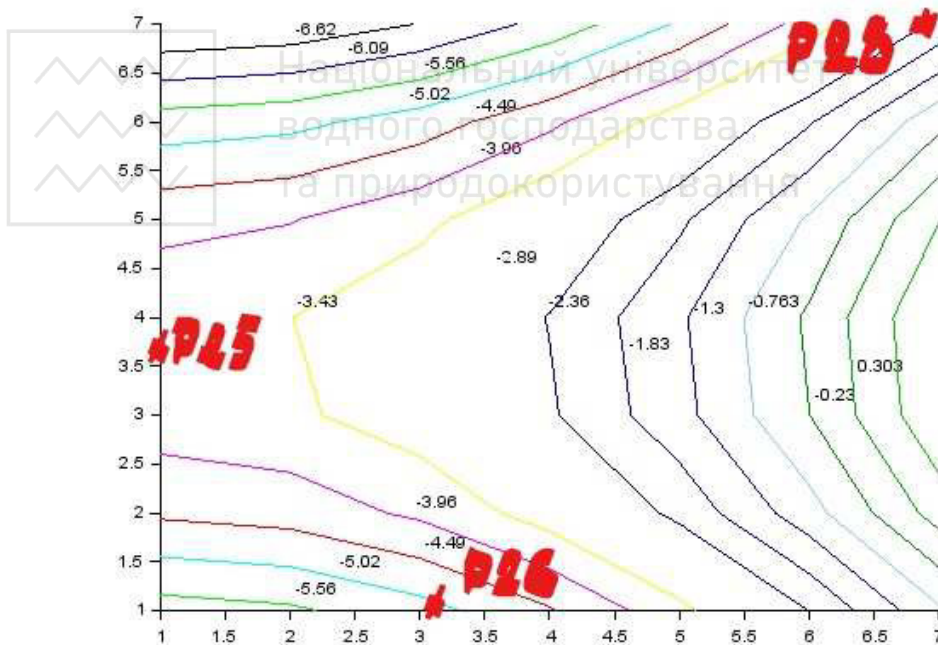


Figure 2. Flownets in the area delimited by P25, P26 and P28 piezometers

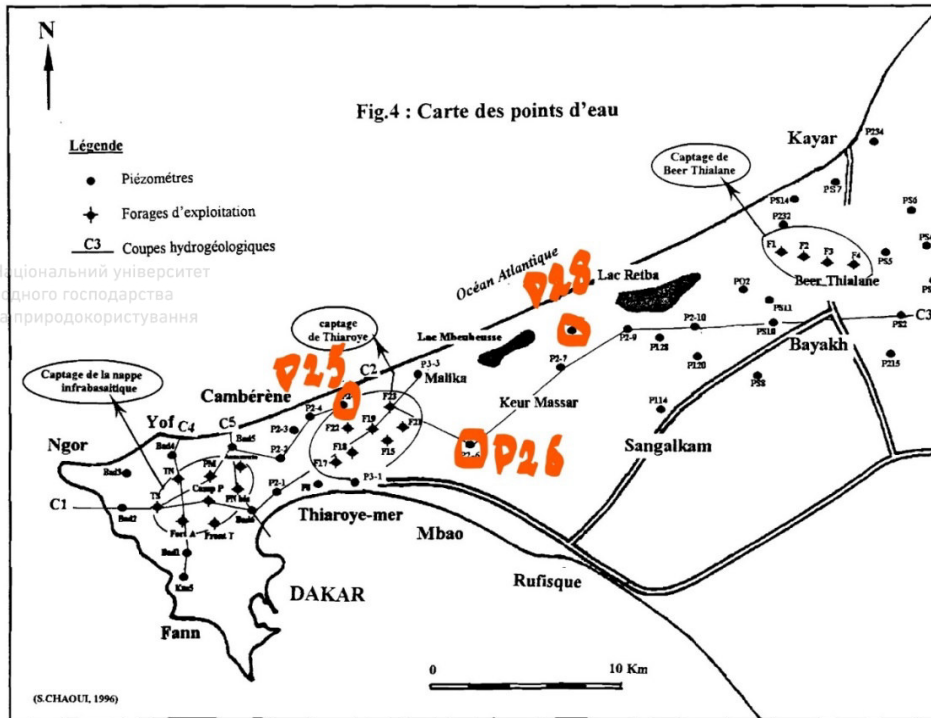


Figure 3. Map of the area showing piezometers P25, P26 and P28

From (3) and (4), one can infer the following equation (5) for the net recharge  $\Delta R_N$ :

$$\Delta R_N = [-0.23579 + 0.02932 \cdot t - 0.00084 \cdot t^2 + 5.352 \cdot 10^{-6} \cdot t^3] s_y - 6.3498 \cdot 10^{-7} \cdot T \quad (5)$$

The results of the calculations are summarized in table 5 below.

Table 5

Results of the estimation of net recharges

	Time ( months)		1	3	5	7	9	39	43	44	144
	X	Y	Net discharges (m)								
P25	0	0	-0,010	-0,007	-0,005	-0,003	-0,002	-0,003	-0,005	-0,006	0,122
P26	3853	-2504	-0,004	-0,003	-0,002	-0,001	-0,001	-0,001	-0,002	-0,002	0,054
P28	-7650	-1244	-0,003	-0,002	-0,002	-0,001	-0,001	-0,001	-0,002	-0,002	0,038
<b>Mean net discharge (m)</b>			<b>-0,006</b>	<b>-0,004</b>	<b>-0,003</b>	<b>-0,002</b>	<b>-0,001</b>	<b>-0,001</b>	<b>-0,003</b>	<b>-0,003</b>	<b>0,071</b>

**NB:** If net recharges are negative, this corresponds rather to discharges.

One notice from the table 5 above that for each month within the area covered by the three piezometers, one has a mean recharge varying between -0.006 to +0.071 m/month. These values which are

very near to zero can be explained by flooding fight strategies consisting mainly of pumping groundwater out of the concerned areas.

### 3. Modelling of groundwater contamination:

In Thiaroye partly irregular settlements, sanitation was and remains sparse and inefficient. The latrines are mainly connected to septic tanks which are not adapted to the hydrological situation. In fact, the wastewater from the septic tanks flows directly into the water table even when groundwater is pumped. The urbanization of the area therefore coincided with a significant increase of the level of nitrate in water. In the Thiaroye wells, for example, the nitrate concentration ranged from 5 to 40 mg/l in 1970 from 400 to 450 mg/l in 1997 (Diédhiou, M. et al. 2011). The resulting mineralization in the Thiaroye area is as result due to two main factors : saline invasion and high nitrate content of the water above the maximum allowable concentration of 50 mg/l defined by WHO. For this reason, we have chosen to specify two geostatistical models: First, we investigate the relationships between electrical conductivity, geospatial coordinates, depth to water table and an indicator of salt presence like TDS. This approach is justified by the fact that given that conductivity varies with water source like groundwater, water drained from agricultural fields, household waste water, rainfall, etc, and can therefore indicate groundwater seepage or a sewage leak. And as result, electrical conductivity can be used for water quality assessment.

We will use the least square method based on the minimization of  $R_{CE}$  in equation (7). Electric conductivity will be expressed using the below linear model (6):

$$CE = a_0 + a_1X + a_2Y + a_3H + a_4TDS. \quad (6)$$

In which model, the coefficients ( $a_i$ ) are to be estimated, based on the minimization of the residue  $R_{CE}$  in equation (7) which expresses the mean difference between measured and simulated EC over the number of observations  $n_{obs}$ :

$$R_{CE} = \frac{1}{n_{obs}} \left[ \sum_{t=1}^{n_{obs}} (CE_{measured(t)} - CE_{modelled(t)})^2 \right]^{1/2}. \quad (7)$$

Furthermore, regression statistics, including parameter sensitivities and correlations are presented below. We obtain then the following specification for the Electrical conductivity function:

And in a second part, we specify a model which links mainly Nitrate and sodium concentrations through geospatial coordinates and



depth to water table.

$$[Na] = b_0 + b_1X + b_2Y + b_3H + b_4[NO_3]^{-1}. \quad (8)$$

In this model, the coefficients ( $b_i$ ) in equation (8) are to be estimated, based on the minimization of the residue  $R_{Na}$  in equation (9) which expresses the differences between measured and simulated Na:

$$R_{Na} = \frac{1}{n_{obs}} \left[ \sum_{i=1}^{n_{obs}} (Na_{measured(i)} - Na_{modelled(i)})^2 \right]^{1/2}. \quad (9)$$

Fields measurements were performed in 2014 in the Thiaroye area at locations identified by their geospatial coordinates (X,Y) and consisted mainly of measuring the depth to water table (H) in meters, Electric conductivity (EC), the concentration of Total dissolved Solids (TDS), the concentration of Nitrates ( $NO_3$ ) and the concentration of Sodium (Na). In table below, we present the results for 13 boreholes located in Thiaroye area.

Table 6  
Physico-chemical parameters for 13 boreholes in Thiaroye area

<i>Désignation</i>	<i>xCoord UTM</i>	<i>yCoord UTM</i>	<i>Depth (m)</i>	<i>EC</i>	<i>TDS</i>	<i>NO3</i>	<i>Na</i>
THIAROYE F18	244144	1633165	42	3200	3602	-2	1295
THIAROYE Nord 1	243446	1635016	38	700	1942	112	280
THIAROYE F22	244094	1634118	38	3200	3320	-2	1221
THIAROYE F23	245475	1634503	46	4500	3330	3	1168
THIAROYE F11 bis	246082	1632468	43	4175	2499	7	900
THIAROYE F21 bis	245288	1633860	36	238	388	28	29
THIAROYE F19 bis	244782	1634080	37	263	570	40	36
THIAROYE F17 bis	243666	1633201	37	288	600	104	49
THIAROYE F2	243670	1633569	41	215	314	16	33
THIAROYE F4	244560	1632884	42	238	355	26	40
THIAROYE F5	245954	1634529	36	241	430	16	37
THIAROYE F6	246129	1634097	37	350	494	28	36
THIAROYE F8	248650	1631980	35	350	422	26	44

Table 7 below shows the results of the estimation of EC obtained with Eviews software using formula 6.

Table 7

Results of the estimation of Electric Conductivity with Eviews

Dependent Variable: CE  
Method: Least Squares  
Date: 09/28/20 Time: 21:32  
Sample: 1 13  
Included observations: 13



Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	12311.79	332573.5	0.037020	0.9714
X	0.268896	0.119899	2.242692	0.0552
Y	-0.051579	0.194189	-0.265615	0.7973
H	154.0033	56.95678	2.703862	0.0269
TDS	1.007503	0.140831	7.153996	0.0001
R-squared	0.940006	Mean dependent var		1381.385
Adjusted R-squared	0.910010	S.D. dependent var		1694.561
S.E. of regression	508.3409	Akaike info criterion		15.58390
Sum squared resid	2067284.	Schwarz criterion		15.80119
Log likelihood	-96.29538	F-statistic		31.33691
Durbin-Watson stat	1.224776	Prob(F-statistic)		0.000062

This estimation leads to the following formula :

$$CE = 12311.78969 + 0.2688956516.X - 0.05157946788.Y + 154.0032841.H + 1.007503297.TDS. \quad (10)$$

Following the results provided by table, one can formulate the following remarks :

- The coefficient of determination  $R^2 = 0,94$  indicates that 94% of the variations of CE are explained by the geostatistical coordinates, the depth to water table and dry residues.
- The values of probabilities the Student statistic associated to the variables "depth" and "TDS" show that the corresponding coefficients for these variables are significant at an error threshold of 2% max. EC does increase with an increase in depth and TDR. This is probably due to the increase of salinity with depth.
- The value of probability associated to the Fisher statistic (and the little value of the associated probability) shows that the model is significant at an error threshold of 0.01% max: there is globally a linear relation between EC and the other variables.
- An increase in water table depth of 1 meter yields an increase of

the EC by about 154 points.

- The gradient of the EC is in the direction of the vector:  
 $\mathbf{T} = (0,2688, -0,0515)$ .

Table 8 below shows the results of the estimation obtained with Eviews software using formula 8.

Table 8

Results of the estimation of sodium concentration with Eviews



Dependent Variable: Na  
Method: Least Squares  
Date: 09/28/20 Time: 21:28  
Sample: 1 13  
Included observations: 13

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	-369288.5	187204.2	-1.972651	0.0840
X	0.169939	0.073738	2.304622	0.0501
Y	0.197451	0.108016	1.827975	0.1050
H	139.3336	26.29919	5.298020	0.0007
$[NO_3]^{-1}$	-1730.496	396.4282	-4.365219	0.0024
R-squared	0.821446	Mean dependent var		397.5385
Adjusted R-squared	0.732169	S.D. dependent var		530.5531
S.E. of regression	274.5741	Akaike info criterion		14.35204
Sum squared resid	603127.3	Schwarz criterion		14.56933
Log likelihood	-88.28827	F-statistic		9.201083
Durbin-Watson stat	1.299730	Prob(F-statistic)		0.004356

This estimation leads to the following formula:

$$[Na] = -369288.5181 + 0.16994X + 0.19745Y + 139.33363H - 1730.4957.[NO_3]^{-1}. \quad (11)$$

Following the results provided by table, one can formulate the following remarks:

- The coefficient of determination  $R^2 = 0,82$  indicates that 82% of the variations of  $[Na]$  are explained by the geostatistical coordinates, the depth to water table and Nitates concentrations.
- The values of probabilities associated to the Student statistic for the variables "depth" and " $[NO_3]$ " show that these variables are significant at an error threshold of 0.5%.  $[Na]$  does increase with an increase in depth and decreases with a increase of salinity.
- The value of probability associated to the Fisher statistic shows

that the model is significant at a threshold of 0.5%: there is globally a linear relation between  $[Na]$  and the other variables of the model.

- An increase in water table depth of 1 meter yields an increase of the  $[Na]$  by about 139 points.
- The gradient of the  $[Na]$  is in the direction of the vector:  
 $T = (0,1699, -0,1974)$



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

**Note 1:**

The total dissolved solids concentration can be related to the conductivity of the water, but the relationship is not a constant. The relationship between total dissolved solids and conductivity is a function of the type and nature of the dissolved cations and anions in the water and possible the nature of any suspended materials.

$$TDS = \omega C, \quad (12)$$

where  $C$  is the conductance in: microsiemens or micromhos,  $TDS$  is expressed in  $g/m^3$  or  $mg/t$ , and  $\omega$  is a conversion factor. For most groundwater,  $\omega$  is between 0.55 and 0.75, depending on the ionic composition of the solution (Freeze, R. Allan, and John A. Cherry, 1979).

**4. Conclusion:**

This study shows that there is a monthly weak recharge rate ranging between -0.006 to +0.071 certainly due to efforts aiming to prevent the area from flooding by controlling the water table level with pumping systems. Concerning groundwater quality, we notice a high dependence of Electrical conductivity to geospatial coordinates, depth to water table and salinity as well as an inverse correlation between sodium and nitrates concentrations. If one moves deeper in the aquifer, seawater is predominant whereas at shallow depths, nitrates are more present.

**Abbreviations:**

- OLS – Ordinary Least Square
- PDE – Partial Differential Equation
- EC – Electric Conductivity
- TDS – Total dissolved Solids concentration
- $[Na]$  – sodium concentration
- $[NO_3]$  – nitrate concentration

**Acknowledgement:**

This research is performed with the assistance of Mr. Djibril

Diagne, an hydrogeological engineer at TPF SETICO, Dakar, Senegal, for providing us the various data involved in this study and to whom we show our gratitude. We thank as well Dr. Bernard Collignon executive manager of URBACONSULTING/ HYDROCONSEIL whose comments have greatly contributed to the improvement of the quality of this paper.

- 
1. Sarkar B. C. Geostatistics in Groundwater Modelling. *Groundwater Development and Management* / Sikdar P. (eds). Springer, Cham. 2019. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-75115-3\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-75115-3_5), (дата звернення: 12.02.2022).
  2. Liu X., Wu J., Xu J. Characterizing the Risk Assessment of Heavy Metals and Sampling Uncertainty Analysis in Paddy Field by Geostatistics and GIS. *Environmental Pollution*. 2005. 141, 257.
  3. Hu K., Huang Y., Li H., Li B., Chen D., White R. E. Spatial Variability of Shallow Groundwater Level, Electrical Conductivity and Nitrate Concentration, and Risk Assessment of Nitrate Contamination in North China Plain. *Environment International*. 2005. 31, 896.
  4. Pozdnyakova L., Zhang R. Geostatistical Analyses of Soil Salinity in a Large Field. *Precision Agriculture*. 1999. 1, 153.
  5. D'agostino V., Greene E. A., Passarella G., Vurro M. Spatial and Temporal Study of Nitrate Concentration in Groundwater by Means of Coregionalization. *Environmental Geology*. 1998. 36, (3–4), 285.
  6. Diédhiou M. Approche multitraceur géochimique et isotopique à l'identification des sources de la pollution nitratée et des processus de nitrification/dénitrification dans la nappe de Thiaroye. *Th. De doctorat unique U.C.A.D.* 2011. 210 pp.
  7. Freeze, R. Allan, and John A. Cherry. *Groundwater*. Englewood Cliffs, N. J. : Prentice-Hall, 1979.
  8. CABINET SGI-MERLIN. Étude d'actualisation du plan directeur d'assainissement liquide de Dakar 2025 (PDA). 2010.
  9. DONNÉES DE ANAMS (association nationale de météorologie sénégalaise).
  10. Sonya Chaoui. Hydrogéologie et Hydrochimie de la presqu'île du Cap-Vert (nappe infrabasaltique et nappe de Thiaroye). *Sénégal, Rapport de stage, Ministère de l'Hydraulique Division Hvdrogéologique et ORSTOM*. 1996.
  11. Harold Koukoui et Ndéné Ndiaye. Modélisation numérique de la nappe des sables quaternaires de Thiaroye : Phase 1 : Elaboration des paramètres d'entrée du modèle. *Projet de fin d'études, Ecole Polytechnique de Thiès*. 2003.

## REFERENCES:

1. Sarkar B. C. Geostatistics in Groundwater Modelling. *Groundwater Development and Management* / Sikdar P. (eds). Springer, Cham. 2019. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-75115-3\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-75115-3_5), (data zvernennia: 12.02.2022).
2. Liu X., Wu J., Xu J. Characterizing the Risk Assessment of Heavy Metals and Sampling Uncertainty Analysis in Paddy Field by Geostatistics and GIS. *Environmental Pollution*. 2005. 141, 257.
3. Hu K., Huang Y., Li H., Li B., Chen D.,

White R. E. Spatial Variability of Shallow Groundwater Level, Electrical Conductivity and Nitrate Concentration, and Risk Assessment of Nitrate Contamination in North China Plain. *Environment International*. 2005. 31, 896.

4. Pozdnyakova L., Zhang R. Geostatistical Analyses of Soil Salinity in a Large Field. *Precision Agriculture*. 1999. 1, 153.

5. D'agostino V., Greene E. A., Passarella G., Vurro M. Spatial and Temporal Study of Nitrate Concentration in Groundwater by Means of Coregionalization. *Environmental Geology*. 1998. 36, (3–4), 285.

6. Diédhiou M. Approche multitraceur géochimique et isotopique à l'identification des sources de la pollution nitratée et des processus de nitrification/dénitrification dans la nappe de Thiaroye. *Th. De doctorat unique U.C.A.D.* 2011. 210 pp.

7. Freeze, R. Allan, and John A. Cherry. Groundwater. Englewood Cliffs, N. J. : Prentice-Hall, 1979.

8. CABINET SGI-MERLIN. Étude d'actualisation du plan directeur d'assainissement liquide de Dakar 2025 (PDA). 2010.

9. DONNÉES DE ANAMS (association nationale de météorologie sénégalaise).

10. Sonya Chaoui. Hydrogéologie et Hydrochimie de la presqu'île du Cap-Vert (nappe infrabasaltique et nappe de Thiaroye). *Sénégal, Rapport de stage, Ministère de l'Hydraulique Division Hvdrogéologique et ORSTOM*. 1996.

11. Harold Koukoui et Ndéné Ndiaye. Modélisation numérique de la nappe des sables quaternaires de Thiaroye : Phase 1 : Elaboration des paramètres d'entrée du modèle. *Projet de fin d'études, Ecole Polytechnique de Thiès*. 2003.

---

**Мамаду Алума Діалло, доктор наук, інженер, директор**

**Дослідницького інституту Кармелс** (10500, Медіна, Дакар, Сенегал, tech@gmail.com), **Герасімов Є. Г., д.т.н., доцент** (Національний університет водного господарства та природокористування, Рівне, Україна, e.g.gerasimov@nuwm.edu.ua)

### **ГЕОСТАТИСТИЧНИЙ ПІДХІД ДО МОДЕЛЮВАННЯ ПІДЗЕМНИХ ВОД ДЛЯ ПРИБЕРЕЖНОГО ВОДОНОСНОГО ГОРИЗОНТУ ТІАРОЄ**

**У статті досліджено поєднання геостатистичних і математичних методів для пояснення динаміки підземних вод прибережного водоносного горизонту Тіаройе та забруднення як морською водою, так і нітратами. Цілями цього дослідження було надання огляду поточного гідравлічного напору підземних вод і якісного просторового розподілу на території дослідження. Спочатку ми використовуємо дані ГІС, щоб визначити модель гідравлічних напорів залежно від GPS-координат і часу, використовуючи звичайну оцінку найменших квадратів, виконану в**

**EvIEWS.** Потім ми використовуємо керівні диференціальні рівняння в частинних похідних для необмежених водоносних горизонтів для розрахунку чистого поповнення. У другій частині визначені геопросторові моделі для пояснення варіацій електропровідності та для встановлення зв'язків між концентраціями нітратів і натрію. Встановлено, що по всій досліджуваній території спостерігається слабка місячна швидкість поповнення, що обумовлюється заходами спрямованими на запобігання затоплення території шляхом контролю рівня ґрунтових вод за допомогою насосних систем. Крім того, кореляції показують, що натрій і електропровідність збільшуються з глибиною і що концентрації нітратів і натрію обернено корелюють.

**Ключові слова:** гідравлічні напори; дані ГІС; безнапірний водоносний горизонт; електропровідність; якість підземних вод; статистичне моделювання; перевірка гіпотез.

---



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

## АРХІТЕКТУРА

УДК 72.012«1940/1950»

<https://doi.org/10.31713/vt1202212>

**Ричков П. А., д.арх., професор** (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне,  
p.a.rychkov@nuwm.edu.ua)



Національний університет  
водного господарства

### **АРХІТЕКТУРНИЙ ОБРАЗ БУДІВЕЛЬ СПОРТИВНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ 1940–1950-х рр. У МІСТАХ УКРАЇНИ**

Статтю присвячено дослідженню будівель спортивного призначення – стадіонів, басейнів, водних станцій тощо у містах України 1940–1950-х рр. Ці будівлі, зазвичай реконструйовані відповідно до потреб сучасності, у багатьох містах все ще активно використовуються згідно зі своїм функціональним призначенням і продовжують відігравати важливу роль у містобудівній структурі.


Зазвичай будівлі спортивного призначення не входили в парадний ансамбль центральної площі або магістралі, але знаходилися поблизу або створювали окремий репрезентативний містобудівний акцент. Архітектурні об'єкти 1940–1950-х рр. наслідували в стилістичному рішенні фасадів класицистичний канон. З великих архітектурних об'єктів спортивного призначення в містах України у стилі радянського неокласицизму були збудовані стадіон та басейн у Києві, водна станція у м. Дніпро та інші будівлі.

Загалом в містах центрального та східного регіонів України досліджуваного періоду будівлі спортивного призначення споруджувалися більш активно, ніж на заході. У містах Західної України в 1940–1950-х рр. в основному реконструювалися існуючі стадіони та в рамках благоустрою зводилися невеликі спортивні споруди – човнові станції, вишки для стрибків у воду, відкриті басейни, спортивні майданчики. Будівництво та реконструкція великих будівель спортивного призначення у містах Західної України розгорнулося дещо пізніше – в 1960-х рр., відповідно, для них характерні інші стилістичні підходи та лаконічне архітектурне рішення.

**Ключові слова:** архітектура 1940–1950-х рр.; архітектура соцреалізму; будівлі спортивного призначення; стадіони;



## громадські будівлі; міста України.



**Постановка проблеми.** Містобудівні перетворення, які відбувалися у містах України в 1940–1950-х рр. у межах повоєнної відбудови, зазвичай передбачали спорудження великих громадських архітектурних об'єктів, в тому числі будівель спортивного призначення – стадіонів, спортивних баз, басейнів, водних станцій та ін. Перелічені будівлі не входили в парадний ансамбль центральної площі або магістралі, але знаходилися поблизу або ж створювали окремий репрезентативний акцент у містобудівній структурі, розташовуючись на важливих з композиційної точки зору ділянках, часто – в оточенні зелених насаджень, парків тощо.

Ці будівлі, зазвичай реконструйовані відповідно до потреб сучасності, у багатьох містах все ще активно використовуються згідно зі своїм безпосереднім функціональним призначенням і продовжують відігравати важливу роль у містобудівній структурі. Проте наявні дослідження у сфері історії архітектури та містобудування повоєнних років, як правило, зосереджені на ансамблях центрів. Таким чином, актуалізується необхідність дослідження будівель спортивного призначення 1940–1950-х рр., встановлення особливостей їх архітектурного образу та загалом ролі у структурі українських міст.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Питання архітектурного образу великих будівель спортивного призначення 1940-1950-х рр. в містах України та їх ролі у містобудівній структурі висвітлені в недостатній мірі. Наявні джерела згадують будівлі спортивного призначення в контексті типології будівель років повоєнної відбудови [1; 2] та історії української архітектури [3]. Інформація щодо первинного архітектурного образу досліджуваних будівель міститься у фаховій архітектурній періодиці радянських часів [4]. Також вартими уваги при дослідженні будівель спортивного призначення є праці сучасних дослідників, присвячені семантичним аспектам – наприклад, де дані будівлі (зокрема головні стадіони Радянського Союзу) розглядаються як своєрідна репрезентація влади [5].

**Мета статті** – визначити характерні особливості архітектурного образу будівель спортивного призначення у містах України 1940–1950-х рр. та визначити роль об'єктів у містобудівній композиції.

**Виклад основного матеріалу.** В процесі повоєнної відбудови серед будівель різноманітної типології активно споруджувалися об'єкти спортивного призначення, які відігравали важливу роль у формуванні архітектурного образу повоєнних міст [2, С. 403]. Відповідно до вимог епохи, в межах методу соцреалізму в архітектурі ці будівлі наслідували в своєму архітектурному рішенні класицистичний канон. Сучасні дослідники вбачають у великих стадіонах, зведених в 1940–1950-х рр. (наприклад, в стадіоні олімпійського комплексу «Лужники» в Москві, збудованого в 1956 р.), алюзії римського амфітеатру [5].

Стадіон на 50 тис. глядачів було збудовано у Києві (арх. – М. Гречина, М. Іванюк) (таблиця). В архітектурному рішенні павільйонів стадіону використовувалися коринфський ордер та аркада. Будівля відкрита в сторону однієї з головних магістралей міста – вул. Великої Васильківської (раніше – вул. Червоноармійської) [4, С. 58]. Нині вигляд будівлі відмінний від первинного внаслідок реконструкцій, остання з яких, як відомо, проводилася в роки незалежності України напередодні Чемпіонату Європи з футболу ЄВРО-2012.

Загалом найбільш поширеними у повоєнні роки були районні стадіони місткістю до 15 тис. глядачів, а також стадіони спортивних товариств, які вмщали до 5 тис. глядачів (як приклад – стадіон заводу «Азовсталь» в Маріуполі) [1, С. 173].

Водні станції споруджувалися у містах, розташованих на берегах великих водойм. Яскравий приклад – водна станція заводу ім. К. Лібкнехта (таблиця) в парку ім. Воронцова (нині – парк Сагайдак) у м. Дніпро (архітектор – Д. І. Щербаков, 1952 р. (будівля не збережена)) [6]. У цокольній частині будівлі, витягнутій вздовж берега Дніпра, розміщувалися приміщення для зберігання човнів – елінг, обабіч нього – ремонтні майстерні. Над майстернями – трибуни на 360 глядачів. Перекриття елінгу та трибун виконувалось із залізобетону, тоді як будівля з роздягальнями та іншими спеціальними приміщеннями над елінгом була дерев'яною [1, С. 177]. Особливістю будівлі є те, що її система декорування використовувала дерев'яні елементи ордеру. Загалом архітектурний образ водної станції характеризувався легкістю форм і асоціювався з кораблем [6].

Також будувалися плавальні басейни, зокрема басейн ЦСКА в Києві (таблиця), архітектор – Ф. В. Поліщук, інженер – Д. Я. Чеський,

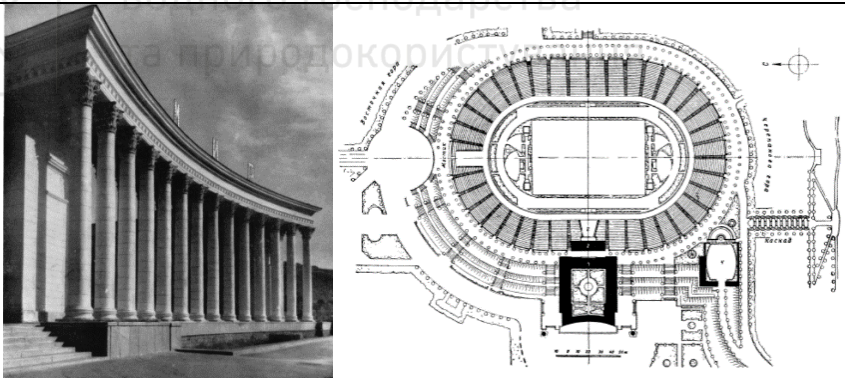
1955 р. [1, С. 175]. Будівля має характерний для стилю радянського неокласицизму симетричний головний фасад, з колонами великого ордеру та пілястрами, ліпними декоративними елементами. Увінчує будівлю масивний декорований карниз. Центральне ядро будівлі – зал для плавання та трибуни на 1500 глядачів. Басейн освітлюється верхнім світлом [1, С. 176].

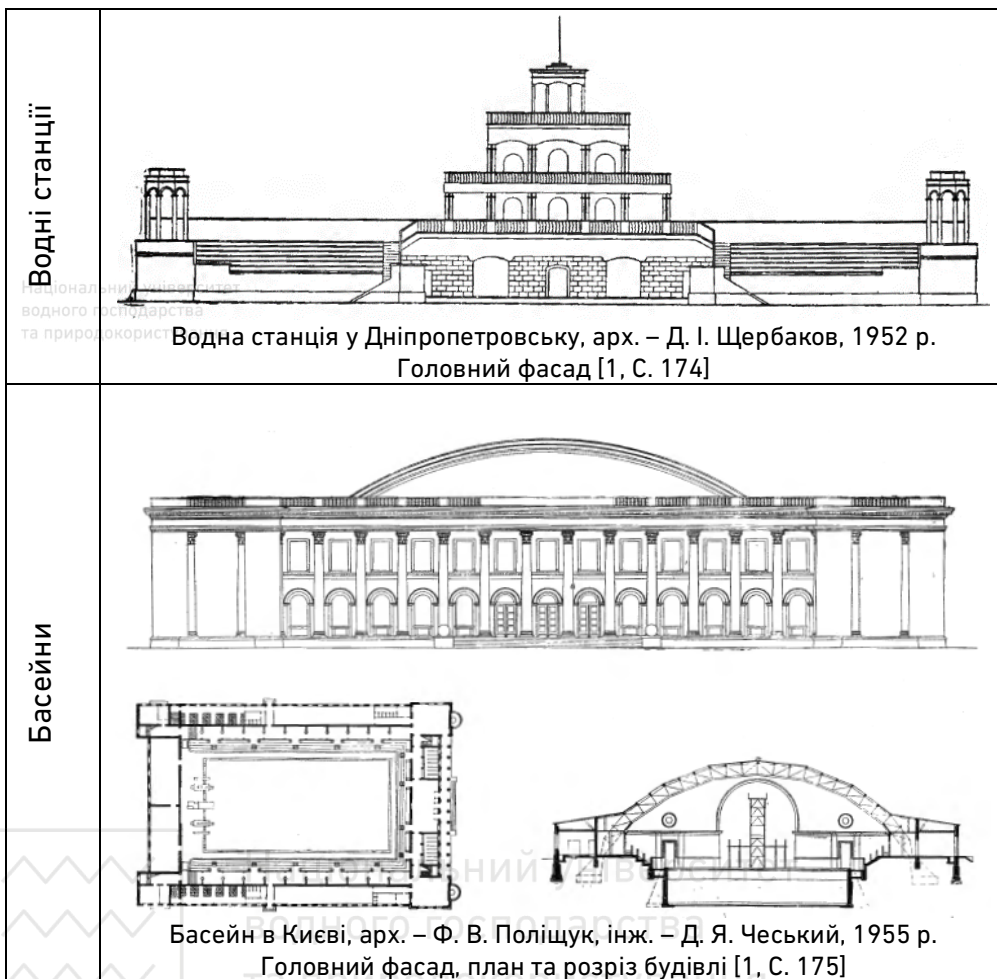
Варто зауважити, в містах центрального та східного регіонів України досліджуваного періоду спорудження будівель спортивного призначення розгорталося більш активно, ніж на заході. Ймовірно, причиною цього стало те, що згідно нових генеральних планів міст Західної України 1940–1950-х рр., першочерговою задачею ставилося будівництво та реконструкція ансамблів центру. Оскільки будівлі спортивного призначення в ці ансамблі не включалися, їх спорудження відбулося пізніше, після виконання першочергових завдань.

У містах Західної України в 1940–1950-х рр. в основному реконструювалися існуючі стадіони довоєнних років та зводилися відносно невеликі спортивні споруди. Так, на водоймах влаштовувалися човнові станції (у Тернополі [7, С. 260], Івано-Франківську [8, С. 75] та інших містах), вишки для стрибків у воду, відкриті басейни, в парках – спортивні майданчики тощо.

Таблиця

Будівлі спортивного призначення 1940–1950-х рр.

Стадіони	 <p style="text-align: center;">Стадіон ім. М. С. Хрущова (нині – Олімпійський) в Києві, арх. – М. Гречина, М. Іванюк, 1937–1950 рр. Загальний вигляд будівлі та генплан [4, С. 58; 2, С. 403]</p>
----------	--



Будівництво або ж докорінна реконструкція великих будівель спортивного призначення у містах Західної України розгорнулося дещо пізніше – в 1960-х рр., після постанови про усунення «надмірностей», тому для фасадів цих будівель характерне більш лаконічне архітектурне рішення (приклади – стадіон «Україна» у Львові, стадіон «Авангард» у Рівному та ін.).

**Висновки.** Отже, великі будівлі спортивного призначення в часових межах досліджуваного періоду споруджувалися насамперед у містах центрального та східного регіонів України (Київ, Дніпро та ін. міста). Дані будівлі створювали нові містобудівні акценти, а їх фасади вирішувалися згідно неокласицистичного канону.

На теренах Західної України активне будівництво стадіонів та інших будівель спортивного призначення розгорнулося дещо пізніше, і відповідно стилістичне рішення їх фасадів характеризується лаконічністю у зв'язку з усуненням «надмірностей».

1. Грицай М. О., Ігнатів О. Н., Ігнаткін І. О., Лебедєв Г. О. Нариси історії архітектури Української РСР. Київ : Державне видавництво літератури з будівництва і архітектури УРСР, 1962 р. 350 с. 2. Всеобщая история архитектуры в 12 томах. Архитектура СССР / ред. Баранов Н. В. и др. Москва : Стройиздат, 1975. Том 12. Книга 1. 755 с. 3. Історія української архітектури / Ю. С. Асєєв та ін. ; за ред. В. І. Тимофійєнка. К. : Техніка, 2003. 472 с. 4. Советская архитектура : ежегодник / Академия архитектуры СССР, Институт теории и истории архитектуры, Отдел архитектурных справочников, Музей Академии архитектуры СССР. Москва : Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре, 1953. Вып. II. 190 с. 5. Акопян Э. С. Центральный стадион страны как элемент репрезентации власти в истории советской архитектуры 1920–1950-х годов. *Социология власти*. 2018. № 2. Том 30. С. 141–166. 6. Шруб К. Тайны Днепра: забытый патриарх архитектуры. URL: <https://gorod.dp.ua/news/137429> (дата звернення: 12.02.2022). 7. Гулько Я. Невідомий Тернопіль. Тернопіль, 2015. 272 с. 8. Гандзюк Р., Головатий М., Федунків З. Звід пам'яток Івано-Франківської області. Івано-Франківськ. Історико-архітектурний нарис. Видавництво «Лілея-НВ», Івано-Франківськ, 2014.

## REFERENCES:

1. Hrytsai M. O., Ihnatov O. N., Ihnatkin I. O., Lebediev H. O. *Narysy istorii arkhitektury Ukrainskoi RSR*. Kyiv : Derzhavne vydavnytstvo literatury z budivnytstva i arkhitektury URSR, 1962 r. 350 s. 2. *Vseobschaya istoriya arhitekturyi v 12 tomah*. Arhitektura SSSR / red. Baranov N. V. i dr. Moskva : Stroyizdat, 1975. Tom 12. Kniga 1. 755 s. 3. *Istoriia ukrainskoi arkhitektury / Yu. S. Asieiev ta in. ; za red. V. I. Tymofiiienka. K. : Tekhnika, 2003. 472 s.* 4. *Sovetskaya arhitektura : ejegodnik / Akademiya arhitekturyi SSSR, Institut teorii i istorii arhitekturyi, Otdel arhitekturnyih spravochnikov, Muzey Akademii arhitekturyi SSSR. Moskva : Gosudarstvennoe izdatelstvo literatury po stroitelstvu i arhitekture, 1953. Vyip. II. 190 s.* 5. *Akopyan E. S. Tsentralnyi stadion stranyi kak element reprezentatsii vlasti v istorii sovetskoy arhitekturyi 1920–1950-h godov. Sotsiologiya vlasti. 2018. № 2. Tom 30. S. 141–166.* 6. *Shrub K. Tayny Dnepra: zabytyi patriarh arhitektury. URL:*

<https://gorod.dp.ua/news/137429> (data zvernennia: 12.02.2022). **7.** Hulko Ya. Nevidomyi Ternopil. Ternopil, 2015. 272 s. **8.** Handziuk R., Holovatyi M., Fedunkiv Z. Zvid pamiatok Ivano-Frankivskoi oblasti. Ivano-Frankivsk. Istoryko-arkhitekturnyi narys. Vydavnytstvo «Lileia-NV», Ivano-Frankivsk, 2014.

---



**Rychkov P. A., Doctor of Architecture, Professor** (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

### **SPORTS BUILDINGS ARCHITECTURAL IMAGE OF UKRAINIAN CITIES IN 1940–1950S**

**The article is devoted to the study of sports buildings – stadiums, swimming pools, water stations, etc. in the cities of Ukraine 1940–1950s. These buildings, usually reconstructed in accordance with modern needs, are still actively used for their functional purpose and continue to play an important role in the urban structure.**

**Usually, sports buildings were not included in the main ensemble of the central square, but were located nearby or created a new representative urban accent. The architectural objects of the 1940s and 1950s followed the classicist canon in the stylistic design of the facades. The stadium and swimming pool in Kyiv, the water station in Dnipro and other buildings were built from the large architectural objects of sports purpose in the cities of Ukraine in the Soviet neoclassicism style.**

**In general, in the cities of Ukraine central and eastern regions in the years under study, sports buildings were built more actively than in the western region. In the cities of Western Ukraine in the 1940–1950s, existing stadiums were mostly reconstructed and small sports facilities were built as part of landscaping – boat stations, diving towers, outdoor swimming pools, and sports grounds. The construction and reconstruction of large sports buildings in the cities of Western Ukraine began a little later – in the 1960s, respectively, they are characterized by other stylistic approaches and concise architectural solutions.**

**Keywords:** architecture of 1940–1950s; architecture of socialist realism; sports buildings; stadiums; public buildings; cities of Ukraine.

---

**Ричков П. А., д.арх., професор, Потапчук І. В., доцент** (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, p.a.rychkov@nuwm.edu.ua, i.v.potapchuk@nuwm.edu.ua)

## **РОЛЬ ОЗЕЛЕНЕННЯ У ФОРМУВАННІ МІСТОБУДІВНИХ АНСАМБЛІВ УКРАЇНИ 1940–1950-х рр.**



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

**Статтю присвячено дослідженню підходів щодо створення та відновлення зелених насаджень загального користування у містах України повоєнних років. Більшість існуючих парків, скверів, садів були закладені або впорядковані у безпосередньо повоєнні роки, відповідно до нових генеральних планів населених пунктів, розроблених проєктним інститутом «Діпромiст» після Другої світової війни. В статті аналізуються особливості заходів озеленення, передбачених генеральними планами міст досліджуваних років. Встановлюється роль зелених насаджень у формуванні містобудівних ансамблів.**

**На прикладі Києва, Харкова, Львова, Тернополя, Рівного та інших міст-обласних центрів визначається специфіка влаштування парків, садів, бульварів, скверів тощо в умовах містобудівних перетворень та реконструкції 1940–1950-х рр. Відповідно до перспективного плану розвитку зелених зон усіх міст та селищ України, з 1955 р. при створенні нових генеральних планів передбачалося збільшення площ зелених насаджень. Заходи з озеленення, окрім оздоровлення міста та створення місць відпочинку, опосередковано також мали на меті соціалістичну пропаганду, адже нестача зелених насаджень у містобудівній структурі часто трактувалася як негативний наслідок колишнього «буржуазного» ладу.**

**В умовах збереженої містобудівної структури активно розгорталися процеси відновлення та впорядкування історичних парків, садів тощо, а на вільних територіях, в тому числі тих, де забудова була зруйнована в роки Другої світової війни, передбачалося створення нових зелених насаджень. В центральних частинах міст, як правило, в безпосередній близькості до ансамблів нових загальноміських центрів, реконструювалися парки культури та відпочинку. Ансамблі центрів також активно**

**озеленювалися, на площах влаштовувалися бульвари, сквери. Крім того, створювалися зелені зони в комплексі з приміською територією.**

**Ключові слова:** озеленення; система зелених насаджень; містобудівний розвиток; генеральний план; містобудування 1940–1950-х рр.; радянське містобудування; міста України.



**Постановка проблеми.** Сьогодні, у зв'язку з ростом міст, питання озеленення урбанізованих територій набуває особливої актуальності. Загальновідомо, що озеленення формує сприятливий мікроклімат міста. Часто в процесі активної забудови невеликі за площею зелені насадження зменшуються або зникають, особливо в центральних міських частинах. Окрім того, багато парків та інших зелених насаджень потребують впорядкування. Більшість існуючих парків, скверів, садів у містах України були закладені або впорядковані у повоєнні роки (кінець 1940–1950-х рр.). Їх створення зазвичай передбачалося генеральними планами населених пунктів, розробленими у роки повоєнної відбудови, оскільки більшість міст зазнали руйнувань під час Другої світової війни і потребували реконструкції. Зазвичай у містах – обласних центрах України з часів реконструкції у названий період не відбувалося докорінних містобудівних змін в центральних частинах. З огляду на перелічені вище фактори, актуалізується необхідність у дослідженні озеленення як важливої складової формування містобудівних ансамблів України повоєнних років.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Роль озеленення в контексті формування містобудівних ансамблів України повоєнних років не була предметом окремого наукового дослідження. Наявні публікації висвітлюють питання радянського містобудування досліджуваного періоду та реконструкцію міст у повоєнні роки в цілому [1; 2] та на теренах України зокрема [3; 4].

Важливу групу джерел становлять праці, присвячені основним принципам та державним нормам щодо озеленення міст, а також розгляду даного питання в контексті теорії та історії містобудування [5; 6; 7].

Окремі аспекти щодо озеленення деяких міст-обласних центрів у повоєнні роки висвітлені у статтях Б. Посацького [8], О. Михайлишин [9], І. Потапчук [10] та інших сучасних дослідників.



**Стаття має на меті** встановити специфіку підходів щодо озеленення міст України повоєнної доби та роль зелених насаджень у контексті формування містобудівних ансамблів досліджуваних років.

**Виклад основного матеріалу.** У безпосередньо повоєнні роки норми озеленення міст ще не були чітко встановлені. Так, у першій половині 1950-х рр., коли активно розгорталися процеси відбудови після Другої світової війни, зелені насадження загального користування в різних містах проектувалися в межах від 8 до 27 кв. м на одного мешканця. Парки та сади займали 75–80% від площі зелених насаджень загального користування, а бульвари та сквери – 20–25% [5, С. 22].

Однією з важливих задач повоєнного радянського містобудування стало «генерування комплексу емоцій всезагального духовного благополуччя» [1, С. 25]. Для його досягнення передбачалося як спорудженням репрезентативних центральних площ з монументальною забудовою, так і заходи з озеленення міст. Дані заходи, очевидно, окрім оздоровлення міста та створення місць відпочинку, мали на меті певну соціалістичну пропаганду, адже нестача озеленення у містобудівній структурі часто трактувалася як негативний наслідок колишнього «буржуазного» ладу [4, С. 44].

Генеральні плани міст 1945–1950-х рр., які зазвичай розроблялися проєктним інститутом «Діпромiст» (Київ) [3, С. 421], серед ряду заходів передбачали впорядкування існуючих на той момент парків, скверів, набережних зон тощо, а також створення нових зелених насаджень. Насамперед увага приділялася зеленим насадженням загального користування, розташованих в центральних частинах міст.

Під час реконструкції існуючих та влаштуванні нових парків відбувалося створення пейзажних композицій, розміщення гідротехнічних споруд та малих архітектурних форм, а також підбір порід дерев. Функціональне зонування парків культури та відпочинку передбачало виділення таких зон, як масово-видовищна, фізкультурна, дитячий сектор, мальовничі місця відпочинку тощо [11, С. 143].

В 1955 р. було затверджено розроблений «Діпромiстом» перспективний план розвитку зелених зон усіх міст та селищ України. При створенні нових генеральних планів, відповідно, передбачалося збільшення площ зелених насаджень [11, С. 136].

Серед заходів, передбачених генеральним планом *Києва* 1949 р. (архітектори – О. Власов, І. Малозьомов, Б. Приймак, В. Поліщук, інженер – І. Козлов) [3, С. 423], планувався комплекс заходів з озеленення міста. Відновлювалися насадження дерев на бульварі Шевченка, влаштовувався сквер на вул. Велика Васильківська (на місці колишнього ринку).

На схилах Дніпра створювалася мережа алей, а окремі зелені масиви об'єднувалися в єдиний парк культури та відпочинку. Крім того, нові парки та сквери з'являлися в усіх районах Києва [11, С. 137]. Смугу придніпровських парків з півдня замкнув Ботанічний сад імені М. М. Гришка НАН України, закладений у 1947 р. Тоді ж розпочалася підготовка до будівництва гідропарку на Трухановому острові (рис. 1), Передмостовій слобідці та прилеглих островах [2, С. 312].

Пропозиції щодо розв'язання проблем озеленення *Харкова* було розроблено ще у довоєнному генеральному плані (1936 р). У 1948 р. було створено новий генеральний план міста, згідно з яким і відбувався подальший розвиток системи зелених насаджень [3, С. 421–422]. Так, в центральній частині міста у повоєнні роки здійснювалася реконструкція парку ім. М. Горького [12], ботанічного саду ХНУ ім. В. Н. Каразіна [13] та міського саду ім. Т. Шевченка, розташованого біля площі Свободи.



Рис. 1. Гідропарк на Трухановому острові у Києві. Загальний вигляд у 1960-х рр. та проєкт планування 1945 р.

(архітектори А. Власов, С. Барзилович та ін.)

Джерела ілюстрацій: <http://starkiev.com>; [2, С. 311]

Значних руйнувань під час Другої світової війни зазнав Тернопіль. Відбудова міста розпочалася згідно зі схемою розпланування, створеною у 1945 р. інститутом «Діпромiст» (архітектори – Н. Панчук та В. Новиков), та продовжувалася відповідно до генерального плану 1954 р. Серед заходів з озеленення генплан передбачав створення скверів, бульварів. Вдвож осі Театральної площі, нового архітектурного осередку центру Тернополя, було влаштовано бульвар. До центру примикає також зона відпочинку – парк ім. Т. Шевченка та набережна (рис. 2) [11, С. 140].

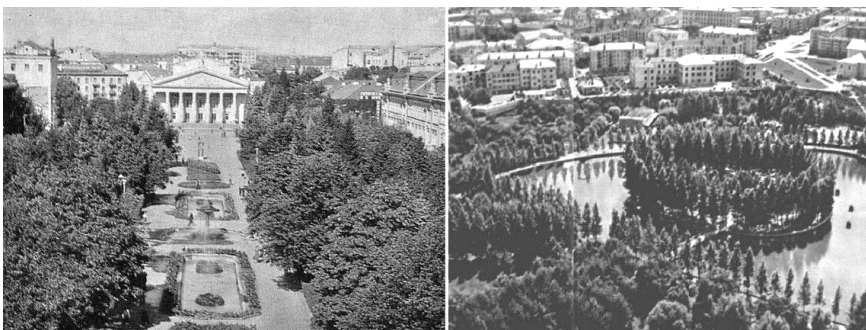


Рис. 2. Бульвар на Театральній площі в Тернополі (загальний вигляд, 1982 р.) та острів Чайка на Тернопільському ставі

Джерела ілюстрацій: листівка 1982 р., фото В. Болясного;  
<https://moemisto.ua/te/blog/stezhkami-starogo-tarnopolya-yak-viglyadali-vulitsi-mista-na-pochatku-hh-stolittya-216.html>

У Рівному згідно з генеральним планом 1945 р. передбачалося створення центрального парку зі спортивними спорудами в районі колишнього замку князів Любомирських [9, С. 56] (проект не був втілений). Також планувалося влаштування інших парків та скверів, у тому числі на місці кладовищ, і впорядкування існуючих, наприклад парку ім. Т. Г. Шевченка (рис. 3). З 1955 р. у Рівному почала створюватися розвинена зелена зона в комплексі з приміською територією. Планувалося збільшення площі зелених насаджень, в основному, на вже забудованій території. Протягом 1945–1963 років площа зелених насаджень загального користування міста була доведена до 46,5 га [14, С. 15].



Національний  
університет  
водного господарства  
та природокористування



Рис. 3. Фонтани у парку ім. Т. Шевченка у Рівному  
Джерело ілюстрації: листівка 1968 р. Фото І. Кропивницького

У деяких містах, в основному зосереджених на теренах Західної України, у зв'язку з відсутністю значних руйнувань під час Другої світової війни, планувальна структура центрів зберігала свій вигляд, а вулична мережа залишалася незмінною. Згідно з новими генеральними планами, в таких містах як *Львів, Чернівці, Ужгород, Івано-Франківськ*, основна увага зосереджувалася на озелененні території, встановленні малих архітектурних форм та інших заходів з благоустрою. Так, наприклад, в Івано-Франківську на місці зруйнованої в роки війни забудови в центральному районі міста було влаштовано бульвар.

У Львові на початку 1950-х рр. відбувалося впорядкування старих парків, було збудовано вхідну арку Стрийського парку, також встановлювалися малі архітектурні форми у міських скверах. У 1953 р. відбулося відкриття парку культури та відпочинку ім. Богдана Хмельницького. Згідно з проєктом передбачалося створення головної алеї від вул. Стрийської до вул. Вітовського, на якій повинні були розміститися фонтани, водні каскади, монументальні сходи тощо (проєкт здійснено не в повному обсязі) [8, С. 159].

**Висновки.** В процесі дослідження з'ясовано, що заходи з озеленення відповідно до генеральних планів повоєнних років передбачалися тою чи іншою мірою в усіх містах України. На вільних територіях, в тому числі тих, де забудова була зруйнована в роки

Другої світової війни, передбачалося створення нових зелених насаджень (Київ, Тернопіль, Івано-Франківськ та ін.).

В умовах збереженої містобудівної структури активно розгорталися процеси відновлення та впорядкування історичних парків, садів тощо (Київ, Харків, Львів, Рівне та ін. міста). В центральних частинах міст, як правило, в безпосередній близькості до ансамблів нових загальноміських центрів, реконструювалися парки культури та відпочинку, схема функціонального зонування яких передбачала створення різнохарактерних просторів для дозвілля населення.

Ансамблі центрів також активно озеленювалися: на площах влаштовувалися бульвари, сквери. Крім того, створювалися зелені зони в комплексі з приміською територією.

1. Косенкова Ю. Л. Советский период 1940-х – первой половины 1950-х годов: от творческих поисков к практике строительства : автореф. дис. ... д-ра архитектуры : 18.00.01. Москва, 2000. 50 с.
2. Всеобщая история архитектуры : в 12 т. *Архитектура СССР* / ред. Баранов Н. В. и др. Москва : Стройиздат, 1975. Том 12. Книга 1. 755 с.
3. Історія української архітектури / Ю. С. Асєєв та ін. ; за ред. В. І. Тимофійєнка. К. : Техніка, 2003. 472 с.
4. Рудницький А. М. Розвиток міст західних областей УРСР та їх соціалістична реконструкція. Львів, 1971. 55 с.
5. Озеленение советских городов : пособие по проектированию / глав. ред. В. Н. Семенов. Академия архитектуры СССР, Научно-исследовательский институт градостроительства. Москва : Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре, 1954. 186 с.
6. Гостев В. Ф., Юскевич Н. Н. Проектирование садов и парков. М. : Стройиздат, 1991. 340 с.
7. Коваленко М. Г. Функції міських зелених насаджень та їх нормування. *Містобудування та територіальне планування*. 2015. Вип. 55. С. 194–201.
8. Посацький Б. Еволюція архітектурного образу центрів міст Західної України (На тлі культурних тенденцій 1945–1997 років). Львів, 2001. *Праці Комісії архітектури та містобудування* : записки наук. т-ва ім. Т. Шевченка. Т. 241. С. 154–178.
9. Михайлишин О. Л. Архітектурно-просторовий розвиток м. Рівне у 1950–1970-х рр. *Архітектурна спадщина Волині*. Рівне, 2016. Вип. 5. С. 52–66.
10. Потапчук І. В., Бичковська Л. С. Витоки та особливості формування водно-зеленого діаметру міста Рівне і його приміської зони. *Архітектурний вісник КНУБА*. К. : КНУБА, 2018. Вип. 16. С. 270–280.
11. Грицай М. О., Ігнатів О. Н., Ігнаткін І. О., Лебедев Г. О. Нариси історії архітектури Української РСР. Київ : Державне видавництво літератури з будівництва і архітектури УРСР, 1962. 350 с.
12. Шовчко В. Центральний парк ім. Максима Горького в Харькове. URL:

<https://zabytki.in.ua/ru/261/tsentralnyi-park-maksima-gorkogo> (дата звернення: 12.02.2022). **13.** Алехин А. А. Ботанический сад Харьковского национального университета имени В.Н. Каразина. *История и современность*. URL: <https://www.garden.kharkov.ua/site/index.html#1> (дата звернення: 12.02.2022). **14.** Кузьмич О. И. Ландшафтная организация территории города Ровно и его пригородной зоны. *Строительство и архитектура*. 1979. № 7. С. 15–19.




Національний університет

## REFERENCES:

1. Kosenkova Yu. L. Sovetskiy period 1940-h – pervoy poloviny 1950-h godov: ot tvorcheskikh poiskov k praktike stroitelstva : aftoref. dis. ... d-ra arhitektury : 18.00.01. Moskva, 2000. 50 s.
2. Vseobschaya istoriya arhitektury : v 12 t. *Arhitektura SSSR* / red. Baranov N. V. i dr. Moskva : Stroyizdat, 1975. Tom 12. Kniga 1. 755 s.
3. Istoriia ukrainskoi arkhitektury / Yu. S. Asieiev ta in. ; za red. V. I. Tymofiiienka. K. : Tekhnika, 2003. 472 s.
4. Rudnytskyi A. M. Rozvytok mist zakhidnykh oblastei URSR ta yikh sotsialistychna rekonstruktsiia. Lviv, 1971. 55 s.
5. Ozelenenie sovetskih gorodov : posobie po proektirovaniyu / glav. red. V. N. Semenov. Akademiya arhitekturyi SSSR, Nauchno-issledovatel'skiy institut gradostroitelstva. Moskva : Gosudarstvennoe izdatel'stvo literatury po stroitelstvu i arhitekture, 1954. 186 s.
6. Gostev V. F., Yuskevich N. N. Proektirovanie sadov i parkov. M. : Stroyizdat, 1991. 340 s.
7. Kovalenko M. H. Funktsii miskykh zelenykh nasadzhzen ta yikh normuvannia. *Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia*. 2015. Vyp. 55. S. 194–201.
8. Posatskyi B. Evoliutsiia arkhitekturnoho obrazu tsestriv mist Zakhidnoi Ukrainy (Na tli kulturnykh tendentsii 1945–1997 rokiv). Lviv, 2001. *Pratsi Komisii arkhitektury ta mistobuduvannia* : zapysky nauk. t-va im. T. Shevchenka. T. 241. S. 154–178.
9. Mykhailyshyn O. L. Arkhitekturno-prostorovyi rozvytok m. Rivne u 1950–1970-kh rr. *Arkhitekturna spadshchyna Volyni*. Rivne, 2016. Vyp. 5. S. 52–66.
10. Potapchuk I. V., Bychkovska L. S. Vytoky ta osoblyvosti formuvannia vodnozelenoho diametru mista Rivne i yoho prymiskoi zony. *Arkhitekturnyi visnyk KNUBA*. K. : KNUBA, 2018. Vyp. 16. S. 270–280.
11. Hrytsai M. O., Ihnatov O. N., Ihnatkin I. O., Lebediev H. O. Narysy istorii arkhitektury Ukrainskoi RSR. Kyiv : Derzhavne vydavnytstvo literatury z budivnytstva i arkhitektury URSR, 1962. 350 s.
12. Shovchko V. Tsentralnyi park im. Maksima Gorkogo v Harkove. URL: <https://zabytki.in.ua/ru/261/tsentralnyi-park-maksima-gorkogo> (data zvernennia: 12.02.2022).
13. Alehin A. A. Botanicheskiy sad Harkovskogo natsionalnogo universiteta imeni V.N. Karazina. *Istoriya i sovremennost*. URL: <https://www.garden.kharkov.ua/site/index.html#1> (data zvernennia: 12.02.2022).
14. Kuzmich O. I. Landshaftnaya organizatsiya territorii goroda Rovno i ego prigorodnoy zonyi. *Stroitelstvo i arhitektura*. 1979. № 7. S. 15–19.

**Rychkov P. A., Doctor of Architecture, Professor, Potapchuk I. V.,  
Candidate of Architecture (Ph.D.), Associate Professor (National  
University of Water and Environmental Engineering, Rivne)**

## **ROLE OF GREENING IN THE FORMATION OF URBAN ENSEMBLES OF UKRAINE IN 1940–1950s**



**The article is devoted to the study of approaches to the public green spaces creation and restoration in the cities of Ukraine in the postwar years. Most of the existing parks, squares, gardens, etc. were laid out or put in order in the postwar years, according to the new master plans of settlements developed by the «Dipromist» Design Institute after the World War II. The article analyzes the features of landscaping measures provided by the master plans of the cities of the studied years. The role of greenery in the urban ensembles formation is established.**

**On the example of Kyiv, Kharkiv, Lviv, Ternopil, Rivne and other regional cities, the specifics of creating parks, gardens, boulevards, squares, etc. in the conditions of urban transformation and reconstruction of 1940–1950 are determined. According to the long-term plan for green areas of all cities and settlements of Ukraine, since 1955 the creation of new master plans provided for an increase in the area of greenery.**

**In the conditions of the preserved urban structure, the processes of restoration and arrangement of historical parks, gardens, etc. were actively carried out, and in the free territories, including those where buildings were destroyed during the World War II, new greenery was planned. In the central parts of the cities parks of culture and recreation were reconstructed. Ensembles of the centers were also actively planted with greenery, boulevards and squares were arranged in the squares. In addition, green zones were created in the complex with the suburban area.**

**Keywords:** landscaping; system of green plantings; urban development; master plan; urban planning of 1940–1950s; Soviet urban planning; cities of Ukraine.

## ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА

УДК 621.182.4:696.42+697.43 <https://doi.org/10.31713/vt1202214>

**Кочмарський В. З., к.ф.-м.н., професор, Костюк О. П., к.т.н., доцент, Тимейчук О. Ю., к.т.н., доцент** (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, v.z.kochmarskii@nuwm.edu.ua)



водного господарства  
та природокористування

### ПЕРЕПАЛ ТА ЗНИЖЕННЯ ККД ВОДОГРІЙНИХ КОТЛІВ ВНАСЛІДОК ВІДКЛАДЕНЬ

Розглядаються ріст температури димових газів, зниження ККД, перевитрата палива у водогрійних котлах внаслідок утворення на трубних системах відкладень. Аналіз ведеться для режиму роботи котла, який характеризується сталою подачею нагрітої води заданої температури та витрати. Показано, що відносна зміна ККД котла виражається через відносну зміну температури топкових газів та відносну зміну їх витрати. Для неперервного контролю за станом витрати палива достатньо вимірювати температуру топкових газів, їх витрату та температуру повітря чи газу на вході в топку котла. Отримані вирази для зміни ККД та величини перепаду дають можливість обґрунтувати час очистки котла від відкладень. Якщо ж витрата палива (природного газу) обліковується, то отримані вирази дозволяють визначити додаткові викиди димових газів та оцінити шкоду довкіллю, яка цим завдається, а також оперативно визначити ККД котла в процесі експлуатації.

**Ключові слова:** водогрійні котли; трубні системи; відкладення; температура топкових газів; витрата димових газів; час очистки.

Забруднення трубної системи (ТС) котлів виникає навіть при штатній роботі водопідготовки [1. С. 76] і призводить до зниження відводу теплоносієм теплоти згоряння з котла. Для парового котла підвищений тепловий опір ТС призводить до зниження перегріву пари, а для водогрійного при сталій витраті – до зниження температури нагріву мережевої води. Внаслідок підвищення температури димових газів збільшується частка теплоти згоряння, яка видаляється з топки у довкілля. Якщо котел працює в режимі сталої подачі теплоти споживачу, то для компенсації втрат теплоти з димовими газами необхідно додатково спалювати паливо, що



призводить до збільшення витрати димових газів. Отже, про стан ТС котла можна судити по температурі вихідних газів [1, С. 78] та їх витраті. Вимірювання температури вихідних газів забезпечується штатним термометром, а для фіксації витрати при потребі необхідно встановити витратомір.

**Мета роботи:** встановлення кількісних залежностей між температурою топкових газів, їх витратою, станом забрудненості котла, зниженням його ККД та перевитратою палива.

### 1. Розрахунок середньої температури газів у топці котла залежно від стану забруднення ТС

В подальшому будемо розглядати водогрійні котли, що забезпечують споживача теплом з заданими витратою нагрітої води та температурним графіком. В такому випадку з рівняння теплопередачі приходимо до співвідношення,

$$\ln\left(\frac{t_{ma}}{t_{mi}}\right) = \frac{K_3}{K_0} \cdot \ln\left(\frac{t_{ma}^0}{t_{mi}^0}\right), \quad (1)$$

де  $K_0$ ,  $K_3$  – коефіцієнти теплопередачі (КТП) чистого, або забрудненого котлів;  $t_{ma} = t_{cr} - t_{b1}$ ;  $t_{mi} = t_{cr} - t_{b2}$ ;  $t_{b1}$ ,  $t_{b2}$  – температури води на вході та виході з котла; ( $^{\circ}\text{C}$ ), ( $X^0$ ) – позначає величини, що відноситься до чистого котла (чи на початку спостережень);  $t_{cr}$  – середня температура газів в топці котла.

Приймемо, що відкладення не змінюють **площі поверхні теплопередачі ТС**. Крім цього вважаємо, що режим роботи котла стаціонарний, а температура нагріву води в чистому та забрудненому котлах однакова. За таких умов отримуємо з рівняння (1) вираз для середньої температури газів у котлі  $t_{cr}$ ,

$$t_{cr} = \left[ t_1 - t_2 \cdot \left( \frac{t_{ma}^0}{t_{mi}^0} \right)^{\frac{K_3}{K_0}} \right] \cdot \left[ 1 - \left( \frac{t_{ma}^0}{t_{mi}^0} \right)^{\frac{K_3}{K_0}} \right]^{-1}. \quad (2)$$

Щоб отримати явну залежність температури вихідних газів від динаміки забруднення котла, скористаємося виразом для КТП брудного котла з роботи [1, С. 78]. Тоді (2) прийме вигляд

$$t_{cr}(T) = \left[ t_1 - t_2 \cdot \left( \frac{t_{ma}^0}{t_{mi}^0} \right)^{\frac{1}{1+K_0 \cdot \alpha \cdot T}} \right] \cdot \left[ 1 - \left( \frac{t_{ma}^0}{t_{mi}^0} \right)^{\frac{1}{1+K_0 \cdot \alpha \cdot T}} \right]^{-1}. \quad (3)$$

Залежність (3) порівнювалася з даними вимірювання температури вихідних газів жаротрубного водогрійного котла впродовж 100 днів від початку опалювального сезону. Перед пуском

котельні ТС котлів були очищені. Початкова температура вихідних газів була  $\approx 140^\circ\text{C}$ . Вимірювання виконувалися не менше 3-х раз впродовж дня, а пізніше усереднювалися. В результаті була отримана залежність температури вихідних газів від номера десятиденки, яка представлена на рис. 1. Отриману залежність

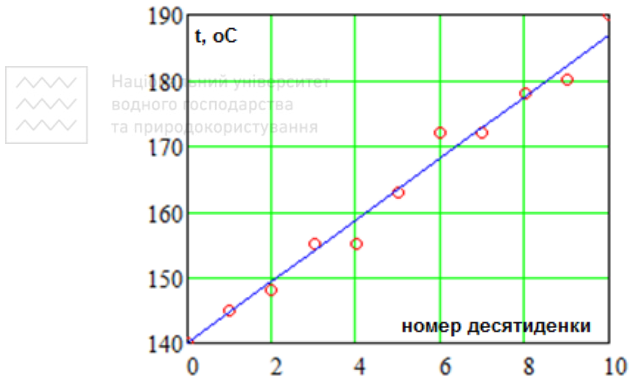


Рис. 1. Залежність температури вихідних газів від номеру десятиденки. За 100 днів ( $n=10$ ) температура зростає на  $50^\circ\text{C}$ .

Кружки – вимірювання, лінія апроксимація по МНК,  $Y(n) = 140 + 4.70 \cdot n$

залежністю, яка відповідає рис. 1 і справедлива на початковому етапі росту відкладень [3, С. 142], тобто приймаємо

$$R_i(T) = \alpha \cdot T. \quad (4)$$

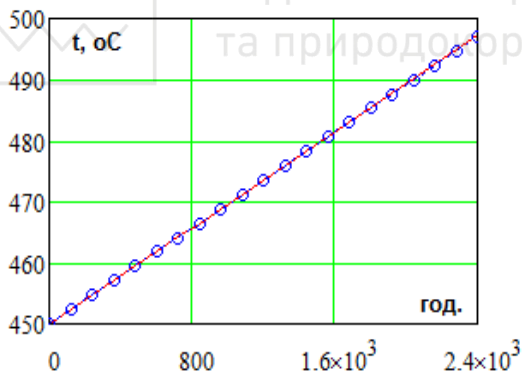


Рис. 2. Залежність температури газів в котлі від часу його експлуатації (Кружки відповідають апроксимації  $Y(T) = 450 + 1.96 \cdot 10^{-2} \cdot T$ , а лінія розрахунок за (3))

апроксимували за МНК лінійною функцією. Така залежність від часу спостереження свідчить про початковий етап формування відкладень. В подальшому ця залежність виходила на насичення, що вказувало на зміну умов формування відкладень, зв'язаних з включенням ерозійних процесів [2, С. 64].

У формулі (3) прийнято, що закон зміни термічного опору з часом дається лінійною

Отже, порівнюючи дослідні дані та розрахунок за (3) з врахуванням (4), визначаємо параметр  $\alpha$ , а звідси і динаміку зменшення КТП. Для нашого випадку за умови, що  $t_{v1} = 70^\circ\text{C}$ ,  $t_{v2} = 90^\circ\text{C}$  коефіцієнт  $\alpha = 5.82 \cdot 10^{-8} (\text{м}^2 \cdot \text{К}) / (\text{Вт} \cdot \text{год})$ .

**Зауважимо**, що для збіжності розрахунків за (3) та інтерполяційної залежності (рис. 1) прийнято, що температура димових газів на  $\Delta t = 310^\circ\text{C}$

менша від середньої температури газів в топці котла, тобто температура топкових газів початок досліджень  $t_{cr}=450^{\circ}\text{C}$ . В період досліджень режимні параметри котла були такими: КТП чистого котла  $K_o = 2200\text{Вт}/(\text{K}\cdot\text{м}^2)$ , теплова потужність  $Q_t = 3\text{МВт}$ . Результати розрахунків за (3) та дані рис. 1 порівнюються на рис. 2. Бачимо добру збіжність розрахунків та даних спостереження, що вказує на правильність припущення (4) та про стабільність теплового навантаження і температури води на виході з котла, на підставі яких отримано (2).

Використовуючи формулу (10) з [1, С. 77] та (3) з даної роботи, нами розраховано динаміку зміни КТП котла. Результат показано на рис. 3. Бачимо що за опалювальний період КТП котла знизився всього на  $\approx 10\%$ , що свідчить про хорошу роботу водопідготовки та грамотну експлуатацію котла.

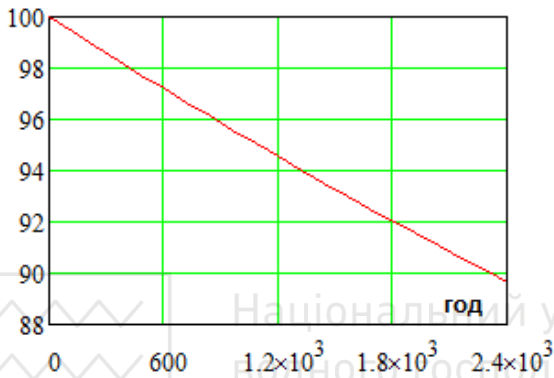


Рис. 3. Залежність відношення КТП  $100\cdot K_z/K_o$ , % забрудненого та чистого котлів від часу експлуатації

Для розрахунку динаміки росту відкладень на ТС котла необхідно визначитися з коефіцієнтом теплопровідності  $\lambda$  відкладень. Відповідно до роботи [4, С. 141] нами прийнято, що  $\lambda \approx 3.8$  Вт/(м·К). Результат розрахунку товщини відкладень в процесі експлуатації котла показано на рис. 4. Бачимо, що за сезон товщина відкладень

виросла до 0.2 мм, що на перший погляд здається не багато і зважаючи на це навряд чи буде прийнято позитивне рішення щодо очистки котла.

## 2. Структура ККД забрудненого котла

Вважаємо, що котел подає в мережу воду сталої температури та витрати. Температуру зворотної води, що приходить з мережі позначимо  $t_{зв}^{\circ}\text{C}$ , а температуру вихідної  $t_{в2}^{\circ}\text{C}$ . За таких умов рівняння теплового балансу котла має вигляд

$$Q_k = Q_k^0 + \Delta Q_k = G_m \cdot c_v \cdot (t_{в2} - t_{зв}) + Q_{вт}. \quad (5)$$

Приймаємо, що – потужність втрат тепла  $Q_{вт}$  **визначається лише димовими газами**, тобто нехтуємо іншими втратами, зокрема, через

поверхню котла, з водою продувки та з твердими відходами. В такому випадку теплову потужність втрат представимо як

$$Q_{BT} = G_T \cdot c_T \cdot (t_{BT} - t_{OT}); \quad (6)$$

де  $G_T$ ,  $c_T$  – масова витрата газів, кг/с,  $c_T$  – їх теплоємність, кДж/(кг·К);  $t_{BT}$  – температура газів на виході з котла;  $t_{OT}$  – початкова температура газів, рівна, наприклад, температурі повітря та палива на вході у котел. Тепло  $Q_M$ , що подається від котла в мережу запишемо у вигляді

$$Q_M = G_M \cdot c_B \cdot (t_M - t_{3B}); \quad (7)$$

$G_M$  – масова витрата мережевої води через котел;  $c_B$  – питома теплоємність води.

Рівняння (5) перетворимо, прийнявши до уваги, що ККД котла за означенням рівний  $\eta = Q_M/Q_K$ ,

$$\eta = 1 - \frac{Q_{BT}}{Q_K} = \frac{G_M c_B (t_M - t_{3B})}{Q_K} \quad (8)$$

За умовами роботи котла,  $Q_M = \text{const}$ , тобто

$$\eta \cdot Q_K = \text{const}, \text{ отже } \eta = \frac{\text{const}}{Q_K}.$$

$$Q_K = V \cdot Q_{нг}, \quad (9)$$

$V$ ,  $Q_{нг}$  – швидкість згоряння палива, кг(м<sup>3</sup>)/с, та нижча теплота згоряння палива, для газу, МДж/кг(м<sup>3</sup>).

З (9) випливає, що при сталій подачі тепла в мережу **ККД котла обернено**

**пропорційний** до теплоти, що виділяється при спалювання палива. З другої сторони, при відкладеннях на ТС котла зменшується його коефіцієнт теплопередачі і для підтримання сталості  $Q_M$ , необхідно підвищувати температуру в топці котла. Ця ситуація відображається рівнянням теплопередачі

$$Q_M = S \cdot K_o \cdot \Delta t_{ln}^0 = S \cdot K \cdot \Delta t_{ln}; \quad (10)$$

де  $S$  – площа теплопередачі (ТС котла);  $K_o$ ,  $K$  – коефіцієнти теплопередачі чистої ТС та забрудненої, відповідно;  $\Delta t_{ln}$  – логарифмічна температура теплопередачі. При  $S = \text{const}$  з рівняння (10) приходимо до (1).

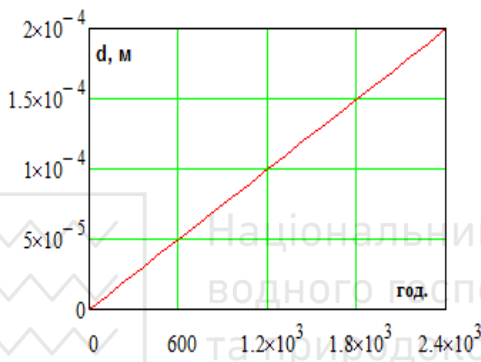


Рис. 4. Залежність товщини відкладень  $d$ , м на ТС котла від часу експлуатації

### 3. Співвідношення між перепалом та ККД котла

Розглянемо витрату димових газів. Позначимо її для забрудненого котла

$$G_r = G_r^o + \Delta G_r \text{ та приймемо, що } t_{or} = t_{or}^o, \quad (11)$$

де  $G_r^o$ ,  $\Delta G_r$  – витрата димових газів з чистого котла та їх приріст для забрудненого;  $t_{or}^o$  – початкова температура топкових газів чистого

котла.

У виразі (11) приймається, що початкова температура газів (повітря) при подачі в котел однакова як для чистого, так і забрудненого котла.

Додаткова теплота, яку повинен генерувати забруднений котел для підтримки сталої подачі тепла споживачам дається виразом

$$\Delta Q_k = Q_k - Q_k^o = G_r^o \cdot C_r \cdot (t_r - t_r^o) + \Delta G_r \cdot C_r (t_r - t_{or}). \quad (12)$$

Член  $G_r^o \cdot C_r \cdot (t_r - t_r^o)$  – представляє додаткове тепло при незмінній витраті димових газів, але завдяки збільшенню їх температури;

- другий член у правій частині (12)  $\Delta G_r \cdot C_r (t_r - t_{or})$  – рівний збільшенню теплоти втрат завдяки росту масової витрати димових газів внаслідок перепалу.

За означенням відносна зміна ККД котла представляється як,

$$\varepsilon_\eta = \frac{\eta^o - \eta}{\eta^o} = \frac{\Delta \eta}{\eta^o} = \left( \frac{Q_k - Q_k^o}{Q_k^o} \right) \cdot \frac{Q_k^o}{Q_k} = \left( \frac{Q_k - Q_k^o}{Q_k} \right) = \frac{\Delta Q_k}{Q_k}. \quad (13)$$

Підставивши (12) в (13) та врахувавши, що  $Q_k = G_r \cdot c_r \cdot (t_r - t_{or})$ , отримуємо вираз для відносної зміни ККД  $\varepsilon_\eta$ , який виражається через вимірювані величини

$$\varepsilon_\eta = \frac{\Delta Q_k}{Q_k} = \frac{G_r^o \cdot (t_r - t_{or}^o)}{G_r \cdot (t_r - t_{or})} + \frac{\Delta G_r}{G_r} = \frac{G_r^o}{G_r} \cdot \left( \frac{\Delta t_r}{t_r - t_{or}} + \frac{\Delta G_r}{G_r} \right). \quad (13a)$$

Таким чином, з (13a) випливає, що вимірюючи витрату вихідних газів з котла  $G_r$ , їх температуру  $t_r$  та температуру повітря на вході в котел  $t_{or}$  можемо за формулою (13a) розраховувати відносне зменшення ККД котла, а за виразом (12) розраховувати перевитрату тепла, що генерується забрудненим котлом та неперервно стежити за перепалом. Спростимо вираз (13a), скориставшись тим, що

$$\frac{\Delta t_r}{t_r - t_{or}} \text{ з похибкою меншою ніж } 0.01 \text{ представляється як } \frac{\Delta t_r}{t_r^o - t_{or}},$$

аналогічно з тією ж похибкою

$$\frac{\Delta G_r}{G_r} \approx \frac{\Delta G_r}{G_r^0} \text{ тому } \varepsilon_\eta = \frac{\Delta Q_k}{Q_k} \approx \frac{\Delta t_r}{t_r^0 - t_{or}} + \frac{\Delta G_r}{G_r^0}. \quad (14)$$

Бачимо, що відносна зміна ККД котла, а звідси і перепад визначаються двома чинниками, відносним ростом температури газів у котлі та приростом масової витрати газів внаслідок перепаду. Оскільки  $\Delta Q_k = \Delta B \cdot Q_{н.г} \cdot \varepsilon_\eta$ , то отримуємо, що



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

$$\Delta B = \varepsilon_\eta \cdot B_0 = B_0 \cdot \left( \frac{\Delta t_r}{t_r^0 - t_{or}} + \frac{\Delta G_r}{G_r^0} \right), \quad \eta = \eta_0 \cdot (1 - \varepsilon_\eta). \quad (15)$$

Отже, для моніторингу параметрів роботи котла та перепаду внаслідок забруднення ТС потрібно вимірювати в неперервному режимі всього два параметри:

**$G_r$  та  $t_r$ .**

Для цього за умови сталої подачі тепла споживачам (стала витрата і температура води на виході з котла) слід змонтувати на вході в димову трубу витратомір димових газів (якщо такий не передбачений постачальником котла) та два термометри для вимірювання температури газів (повітря) на вході у топку та всередині котла. Ці вимірювання дають інформацію про перепад та ККД котла. Якщо знехтувати вимірюваннями витрати газів, то з (15) бачимо, що при цьому величина  $\Delta B$  буде зменшена приблизно на 50%.

Якщо штатними КВП контролюється витрата природного газу (для газових котлів завжди), то з (15) можна визначити величину додаткових викидів димових газів  $\Delta G_r$  та зміну ККД котла в процесі експлуатації.

$$\Delta G_r = G_0 \cdot \left( \frac{\Delta B}{B_0} - \frac{\Delta t_r}{t_r^0 - t_{or}} \right), \quad \eta = \eta_0 \cdot \left( 1 - \frac{\Delta B}{B_0} \right). \quad (16)$$

Перша величина в (16) дозволяє оцінити шкоду довкіллю, що завдається спалюванням додаткового палива, а друга дає безпосередню інформацію про поточну ефективність роботи котла.

#### **4. Розрахунок перепаду**

Розглянемо зміну режимних параметрів котла, що досліджувався нами. В цьому випадку температура топкових газів у котлі була  $450^\circ\text{C}$ , а температура повітря та газу на вході в котел  $t_{or} \approx 60^\circ\text{C}$ . Приріст температури топкових газів відповідно до (3) та інтерполяційної залежності  $Y(T)$ , див. рис. 2, дається виразом

$$\Delta t_r(T) = t_r(T) - t_r^0 = 1.96 \cdot 10^{-2} \cdot T, \text{ К/год.} \quad (17)$$

Приймаючи для чистого котла потужністю 3 МВт швидкість спалювання палива (природного газу)  $V_0 = 324 \text{ м}^3/\text{год}$  та середнє за сезон  $\Delta G_r/G_r^0 \approx 0.05$ , отримуємо для залежності швидкості перепалу від часу

$$\Delta V(T) = 0.024 \cdot T \text{ м}^3/\text{год}, \text{ відповідно за сезон } \Delta V(2400) \approx 57 \text{ м}^3/\text{год}.$$

Величина перепалу за час  $T = 2400$  год.

$$\Delta V = \int_0^{2400} \Delta V(T) dT = 68280 \text{ м}^3. \quad (18)$$

За формулою (14) оцінимо величину ККД нашого котла за умови, що  $\eta_0 = 0.92$ . Оскільки  $\Delta V/V_0 = 0.088$ , то  $\eta(2400) = 0.84$  тобто ККД котла в кінці сезону знизився внаслідок відкладень на 8.0%.

Отже, навіть, при мінімальному забрудненні ТС жаротрубний газовий котел потужністю 3 МВт за опалювальний період перевитрачає  $\approx 68280 \text{ м}^3$  палива, що становить  $\approx 8\%$  річного споживання чистим котлом. Якщо прийняти вартість природного газу  $2.5 \text{ грн}/\text{м}^3$ , то перевитрата коштів становитиме 170 тис. грн. Очистка такого котла виконується за добу і коштує біля 60–70 тис. грн. Якщо очистку проводити в літній період, то прибуток завдяки одній очистці за опалювальний період становитиме  $\approx 100$  тис. грн.

Таким чином, очистка ТС газових котлів навіть при штатній роботі водопідготовки і позірні малих відкладеннях ( $\delta \approx 0.2 \text{ мм}$ ) є економічно доцільною.

### Висновок

Поточне вимірювання режимних параметрів котла, а саме: витрати димових газів –  $G_r$ , температури топкових газів –  $t_r$  та температури газів на вході в топку –  $t_{or}$  дозволяє повністю контролювати роботу котла та обґрунтувати час його чищення.


Завівши ці дані на контролер та запрограмувавши його відповідним чином, час виведення котлів на очистку визначатиметься автоматично, що дасть можливість зекономити за опалювальний період до 8% палива.

Оцінка зменшення ККД та величина перепалу для жаротрубного котла потужністю 3 МВт становить, відповідно 12% та  $68280 \text{ м}^3$  природного газу за опалювальний період.

Якщо ж штатними КВП контролюється витрата палива (природного газу), то з (16) можна оцінити шкоду довіллю, що

завдається перепалом та оперативно контролювати ефективність роботи котла.

Зауважимо, що середня товщина відкладень на ТС при цьому невелика і становить  $\approx 0.2$  мм за опалювальний період.



1. Кочмарський В. З., Костюк О. П., Тимейчук О. Ю. Відкладення у водогрійних котлах та їх наслідки. *Вісник НУВГП. Сер. Технічні науки*. Рівне : НУВГП, 2021. Вип. 3(95). С. 75–84. 2. Кочмарський В. З. Стабільність охолодної води щодо відкладень  $\text{CaCO}_3$  та вплив режиму потоку на швидкість їх формування. *Енергетика і електрифікація*. 2020. № 7–8. С. 61–66. 3. Kochmarskii V. Z., Melnyk V. O. Formation of calcium carbonate from model solutions. *Theoretical and experimental investigations : scientific development and achievements*. Wenlock Road, London, UKN 17GU, 2018. Vup. 4, Pp. 138–155. ISBN 978-1-9993071-0-3. 4. Ермаков В. С., Ходырев В. Л. Исследование динамики загрязнения трубок конденсаторов паровых турбин. *Электрические станции*. 1983. № 1. С. 21–25. 5. Крючков Е. Н., Назаренко А. Н. К вопросу о теплопроводности отложений на поверхностях теплообмена и в трубопроводах металлургических агрегатов. *Труды Запорожской государственной инженерной академии. Металлургия*. 2001. Вып. 4. С. 140–142.

## REFERENCES:

1. Kochmarskyi V. Z., Kostiuk O. P., Tymeichuk O. Yu. Vidkladennia u vodohriinykh kotlakh ta yikh naslidky. *Visnyk NUVHP. Ser. Tekhnichni nauky*. Rivne : NUVHP, 2021. Vyp. 3(95). S. 75–84. 2. Kochmarskyi V. Z. Stabilnist okholodnoi vody shchodo vidkladen  $\text{CaCO}_3$  ta vplyv rezhymu potoku na shvydkist yikh formuvannia. *Enerhetyka i elektryfikatsiia*. 2020. № 7–8. S. 61–66. 3. Kochmarskii V. Z., Melnyk V. O. Formation of calcium carbonate from model solutions. *Theoretical and experimental investigations : scientific development and achievements*. Wenlock Road, London, UKN 17GU, 2018. Vup. 4, Pp. 138 –155. ISBN 978-1-9993071-0-3. 4. Ermakov V. S., Hodyirev V. L. Issledovanie dinamiki zagryazneniya trubok kondensatorov parovih turbin. *Elektricheskie stantsii*. 1983. № 1. S. 21–25. 5. Kryuchkov E. N., Nazarenko A. N. K voprosu o teploprovodnosti otlojeniy na poverhnostyah teploobmena i v truboprovodah metallurgicheskikh agregatov. *Trudyi Zaporozhskoy gosudarstvennoy injenernoy akademii. Metallurgiya*. 2001. Vyip. 4. S. 140–142.

---



**Kochmarskyi V. Z., Candidate of Physical and Mathematical Sciences (Ph.D.), Professor, Kostiuk O. P., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor, Tymeichuk O. Yu., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor** (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

## **BURNING AND REDUCTION OF EFFICIENCY OF WATER HEATING BOILERS DUE TO DEPOSITS**



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

The change of operating parameters of hot water boilers due to the formation of deposits on their pipe systems (PS) is considered. As a result, the heat transfer coefficient (HTC) from flue gases to water is reduced, which leads to a decrease in its heating temperature. To ensure the stability of heat and temperature supply, it is necessary to increase the temperature pressure to overcome the thermal resistance of deposits. The increase in temperature pressure is achieved by burning additional fuel, i.e. overburning. Excess heat from the burn is released along with the flue gases into the atmosphere. Therefore, deposition is the cause of overburning, reduced boiler efficiency and additional air pollution. Decreased efficiency and overburning are expressed due to the relative increase in flue gas temperature and consumption.

Based on the data obtained by measuring the dynamics of the flue gas temperature growth of 3 MW hot water boiler during the heating period, the theoretical relations between for the flue gas temperature and the thermal resistance of deposits were parameterized. It allowed obtaining the law of growth over time the thickness of the deposits, their temperature resistance and reduction of HTS.

By measuring these parameters, you can quickly control the overburning and efficiency of boilers and thus justify the need to stop them for cleaning. The obtained relationships between the increase in temperature and flue gas consumption and overburning are used to analyze data on the mentioned boiler. It is shown that during the heating period lasting 2400 hours, even with regular water treatment on the PS deposits with an average thickness of 0.2 mm are formed, efficiency is reduced by 10%, and burnout reaches about 70 thousand

**m<sup>3</sup> of natural gas, which is about 8% of gas consumption heating period.**

**If the fuel consumption (natural gas) is taken into account, the obtained expressions allow to determine additional flue gas emissions and assess the damage to the environment caused by overburning, as well as to quickly determine the efficiency of the boiler during operation.**

**Keywords:** hot water boilers; pipe systems; deposits; flue gas temperature; flue gas consumption; cleaning time.

---



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

## ГЕОДЕЗІЯ ТА ЗЕМЛЕУСТРІЙ

УДК 332.54:332.144

<https://doi.org/10.31713/vt1202215>

**Бухальська Т. В., к.т.н. доцент, Янчук О. Є., к.т.н. доцент,  
Трохимець С. М., ст. викладач** (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)



Національний університет  
водного господарства

### та **ПЛАНУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНОГО ВИКОРИСТАННЯ ПОРУШЕНИХ ЗЕМЕЛЬ УНАСЛІДОК НЕЗАКОННОГО ВИДОБУВАННЯ БУРШТИНУ**

У статті розглянуто планування раціонального використання порушених земель унаслідок незаконного видобування бурштину на території Каноницької об'єднаної територіальної сільської громади Вараського району Рівненської області на основі системного підходу. Для моделювання перспективного оптимального використання порушених земель використано поєднання методу аналізу ієрархій та методу нечітких множин. На основі системного підходу, з урахуванням соціально-економічних, екологічних та просторових факторів, обґрунтовано та визначено перспективний вид використання порушених земель на прикладі трьох земельних ділянок у межах Каноницького старостинського округу.

**Ключові слова:** порушені землі; використання земель; планування території; перспективне планування.

**Вступ.** Через незаконне видобування бурштину виникають значні площі порушених земель. За даними Рівненського обласного управління лісового та мисливського господарства станом на 01.07.2020 року у держлісфонді обліковується 5661,1 га пошкоджених земель внаслідок незаконного видобування бурштину. Пошкоджені землі є на території Березнівського, Володимирецького, Клесівського, Дубровицького, Зарічненського, Осківського, Рокитнівського держлісгоспів, Рівненського природного заповідника та ДП СЛАП «Рокитнівський держспецлісгосп» [1]. Насправді ці площі є набагато більшими і несуть за собою негативний вплив не тільки на стан земельних ресурсів, а й на подальший сталий розвиток території їх поширення.

За таких умов постає завдання детального аналізу наслідків незаконного видобування бурштину на стан земельних ресурсів та

можливості подальшого ефективного використання цих порушених земель. Наразі не існує єдиної концепції планування і подальшого використання порушених земель та розвитку територій, що зазнали деградації внаслідок незаконного видобування бурштину.

**Аналіз досліджень.** Вплив антропогенної діяльності, що пов'язана з незаконним видобуванням бурштину, на навколишнє середовище висвітлено у працях таких вчених, як Надточій П. П., Тимочко Т. В., Мислива Т. М., Слободян О., Філіпович В. Є., Яковлев Є. О., Корнієнко В. Я. та інші. Проблемами планування рекультивації порушених земель та її впровадження займаються вітчизняні та зарубіжні вчені: Бекаревич М. Є., Геник Я. В., Демидов О. А., Масюк М. Т., Панас Р. М., Печенюк В. І., Фурдичко О. І., Чабан І. П., Ibarra J. M., Pavloudakis F., Gough L. P. та інші.

Методичні засади планування раціонального використання порушених земель детально висвітлено у працях Міхно П. Б. [2; 3]. У своїй роботі автор вказує на важливість встановлення факторів, що впливають на стан порушених земель та обумовлюють вибір виду та напряму їх подальшого використання. Особливу увагу приділено вибору методів прийняття рішень в умовах невизначеності для обґрунтування раціонального виду та напряму подальшого використання порушених земель. Автор для розроблення методики планування раціонального використання порушених земель використовує системний аналіз, а саме поєднання методу аналізу ієрархій та методу нечітких множин.

Метод аналізу ієрархій (МАІ) базується на попарному порівнянні альтернатив. Призначення методу полягає у підтримці прийняття багатокритеріальних рішень на основі розрахунку їх відносної важливості [4].

Специфіка застосування МАІ при вирішенні складних завдань управління земельними ресурсами досліджується у роботах Черняги П. Г., Мельничука О. Ю., Лагоднюка О. А. та ін., присвячених проблемам оптимізації використання земель, окремих землекористувань, територій населених пунктів, моделювання небезпечних фізико-географічних процесів, вдосконалення оцінки земель тощо [5; 6].

У роботі [2] автор розробив модель планування раціонального використання відпрацьованих земель на основі методу аналізу ієрархій, призначену для визначення інтегральних показників вибору виду використання відпрацьованої земельної ділянки та цільового призначення рекультивації із застосуванням нечітких оцінок і пріоритетів факторів для врахування локальних умов.

**Постановка завдання.** Обґрунтувати перспективні напрями раціонального використання порушених земель унаслідок незаконного видобування бурштину на основі системного підходу.

Предметом дослідження є земельні ділянки, на яких були виявлені порушені землі унаслідок незаконного видобування бурштину на території Каноницької об'єднаної територіальної сільської громади Вараського району Рівненської області.

**Виклад основного матеріалу.** Планування раціонального використання порушених земель унаслідок незаконного видобування бурштину виконано для трьох земельних ділянок, які були визначені на основі проведеної інвентаризації земель на території Каноницької об'єднаної територіальної сільської громади Вараського району Рівненської області загальною площею 11,5825 га [7] (табл. 1).

Таблиця 1

Експлікація порушених земель на земельних ділянках державної власності на території Каноницької об'єднаної територіальної сільської громади Вараського району

№ д-ки	Назва угіддя	Площа, га	з них, га	
			землі, придатні для подальшого використання у сільському господарстві	порушені землі, внаслідок несанкціонованого видобування бурштину
1	рілля	6,2635	5,1234	1,1401
2	рілля	23,8316	18,0008	5,8308
3	рілля	79,8648	75,2532	4,6116
<b>Всього</b>		<b>109,9599</b>	<b>98,3774</b>	<b>11,5825</b>

Ці землі є непридатними для подальшого використання у сільському господарстві та не можуть надалі використовуватись за цільовим призначенням. Для подальшого їх ефективного використання необхідно провести комплекс заходів спрямованих на відновлення ґрунтового покриву, виконати рекультивацію порушених земель.

Земельна ділянка № 1 розміщується на півдні від населеного пункту Дубівка і має площу 6,2635 га, з яких порушені землі складають 1,1401 га. Ділянка № 2 межує з ділянкою № 1 і розміщується на півдні села Дубівка біля лісу. Загальна площа ділянки – 23,8316 га, з яких порушені землі – 5,8308 га. Земельна ділянка № 3 розміщується на північному-сході від с. Каноничі

поблизу ставу та має площу – 79,8648 га, з них порушених земель – 4,6116 га (рис. 1).



Рис. 1. Ситуаційна схема порушених земельних ділянок унаслідок незаконного видобування бурштину

Для планування раціонального використання порушених земельних ділянок унаслідок незаконного видобування бурштину на території Каноницької об'єднаної територіальної сільської громади розроблено оптимізаційну ієрархічну модель факторів планування раціонального використання порушених земель унаслідок незаконного видобування бурштину (рис. 2). Ця модель розроблена на основі базової ієрархічної моделі факторів планування раціонального використання відпрацьованих земель, яку наведено у роботі Міхно П. Б. [2], з урахуванням характеру порушених земель та локальних особливостей території.

На рівнях моделі здійснюється [2]:

- порівняльна оцінка заходів землеустрою і управління земельними ресурсами (рівень 2);
- порівняльна оцінка цільового призначення рекультивації за категоріями рекультивованих земель (рівень 3);
- порівняльна оцінка видів використання відпрацьованих земель за групами рекультивованих угідь (рівень 4);
- порівняльна оцінка параметрів відпрацьованих земель, які обумовлюють вибір виду їх використання (рівень 5).

Оптимізаційна модель факторів планування раціонального використання порушених земель унаслідок незаконного видобування бурштину на території Каноницької об'єднаної територіальної сільської громади структурує та детально описує всі процеси, які впливають на визначені порушені ділянки з урахуванням місцевих особливостей. На другому рівні ієрархічної моделі розташовані заходи землеустрою, необхідні для утворення та використання рекультивованих земель: технічні, організаційно-правові, соціально-економічні, естетичні та екологічні. Третій рівень включає у себе категорії земель за цільовим призначення, до яких

можуть належати рекультивовані землі залежно від напрямку рекультивації. Четвертий рівень включає види угідь: сільськогосподарські землі, ліси та інші лісовкриті землі, землі під забудовою, болота, землі під водами. Параметри порушених земель, які обумовлюють вибір виду їх використання знаходяться на п'ятому рівні (ґрунти, рельєф, планувальні параметри, дорожня інфраструктура).



Рис. 2. Оптимізаційна ієрархічна модель факторів планування раціонального використання порушених земель унаслідок незаконного видобування бурштину на території Каноницької об'єднаної територіальної сільської громади

Для визначення найефективнішого використання порушених земель унаслідок незаконного видобування бурштину на території

Каноницької об'єднаної територіальної сільської громади проведено обрахунки локальних та глобальних пріоритетів для кожної земельної ділянки. З цією метою складено матриці попарних порівнянь, обраховано власний вектор локальних пріоритетів для кожної з ділянок.

Розрахунок вектора локальних пріоритетів факторів на певному ієрархічному рівні  $r$  визначається нормованими значеннями середнього геометричного  $b_{ir}$  попарних порівнянь за рядками  $i$  кожної матриці:

$$\omega_i = \frac{b_{ir}}{B}, \quad (1)$$

де  $\omega_i$  – локальні пріоритети;

$$b_{ir} = \sqrt[n]{\prod_{k=1}^n a_{ik}}, \quad B = \sum_{i=1}^n b_{ir}. \quad (2)$$

Вплив кожного фактора на суміжний вищий рівень моделі  $r - 1$  (його глобальний пріоритет) визначається нормованим на відповідному рівні  $r$  середнім геометричним його локальних пріоритетів відносно усіх факторів суміжного вищого рівня  $r - 1$ , що є модифікацією традиційного алгоритму МАІ [2].

Оцінку однорідності суджень експертів виконано на основі критеріїв узгодженості МАІ (індекс узгодженості  $IU$  та відношення узгодженості  $VU$ ). Узгодженість матриць попарних порівнянь задовільна, показники  $IU$  та  $VU$  знаходяться у межах норми ( $\leq 0,10$ ).

На основі матриць власних векторів локальних пріоритетів розраховано глобальні пріоритети груп для кожної з ділянок (табл. 2).

Для вибору виду використання земельної ділянки, на якій знаходяться порушені землі, використано інтегральний показник  $K_i$

$$K_i = p_i \cdot \sum_{j=1}^n (\omega_j \cdot f_{kj}(x_k)), \quad (3)$$

де  $p_i$  – глобальний пріоритет групи рекультивованих угідь;

$\omega_j$  – локальний пріоритет  $k$ -го параметра земельної ділянки, яка містить порушені землі, значення якого отримано за алгоритмом МАІ;

$f_{kj}(x_k)$  – визначена за функцією належності нечітка оцінка земельної ділянки, яка містить порушені землі, за  $k$ -м параметром для  $j$ -го виду рекультивованих угідь.



Раціональною є та група рекультивованих угідь, щодо якої значення критерію  $K_i$  найбільше [2].

Виконаємо розрахунки для земельної ділянки № 1, яка розміщується на півдні від населеного пункту Дубівка площею 6,2635 га, з яких порушені землі складають 1,1401 га (табл. 3).

Таблиця 2

Глобальні пріоритети елементів систем використання порушених земель унаслідок незаконного видобування бурштину на території Каноницької об'єднаної територіальної сільської громади

Рівні	Назва рівня	Глобальні пріоритети		
		Зем. діл. № 1	Зем. діл. № 2	Зем. діл. № 3
II	<i>Заходи землеустрою</i>	1		
	2.1. Технічні	0,19	0,20	0,21
	2.2. Організаційно-правові	0,22	0,23	0,22
	2.3. Соціально-економічні	0,12	0,09	0,26
	2.4. Естетичні	0,15	0,12	0,17
	2.5. Екологічні	0,32	0,36	0,14
III	<i>Категорії земель за цільовим призначенням</i>	1		
	3.1. Сільськогосподарського призначення	0,28	0,27	0,27
	3.2. Житлової та громадської забудови	0,18	0,18	0,25
	3.3. Лісогосподарського призначення	0,21	0,21	0,19
	3.4. Водного фонду	0,20	0,20	0,16
	3.5. Землі промисловості, транспорту, зв'язку, енергетики, оборони та іншого призначення	0,13	0,14	0,13
IV	<i>Види угідь</i>	1		
	4.1. Сільськогосподарські землі	0,14	0,30	0,33
	4.2. Ліси та інші лісовкриті площі	0,62	0,32	0,18
	4.3. Землі під забудовою	0,10	0,17	0,31
	4.4. Болота	0,08	0,15	0,12
	4.5. Землі під водами	0,06	0,06	0,06
V	<i>Фактори впливу</i>	1		
	5.1. Ґрунти	0,10	0,42	0,37
	5.2. Рельєф	0,49	0,26	0,23
	5.3. Планувальні параметри	0,24	0,17	0,26
	5.4. Дорожня інфраструктура	0,17	0,15	0,14

Таблиця 3

Результати розрахунку інтегрального показника вибору угідь  $K$  для земельної ділянки № 1

Параметри відпрацьованої земельної ділянки	Сільсько-господарські землі		Ліси та інші лісовкриті землі		Землі під забудовою		Болота		Землі під водами	
	$\omega_i$	$f_{kj}(x_k)$	$\omega_i$	$f_{kj}(x_k)$	$\omega_i$	$f_{kj}(x_k)$	$\omega_i$	$f_{kj}(x_k)$	$\omega_i$	$f_{kj}(x_k)$
Ґрунти	0,08	0,5	0,08	1	0,13	0,5	0,11	0,10	0,23	0,10
Рельєф	0,50	1	0,50	1	0,44	0,1	0,56	1	0,31	1
Планувальні параметри	0,25	1	0,25	1	0,18	0,75	0,22	1	0,23	1
Дорожня інфраструктура	0,17	0,74	0,17	0,74	0,25	0,74	0,11	0,74	0,23	0,74
$\Sigma(\omega_i f_{kj}(x_k))$	0,92		0,96		0,83		0,87		0,73	
Глобальний пріоритет групи угідь $p$ ,	0,14		0,62		0,15		0,08		0,06	
Критерії $K_j$	0,13		<b>0,59</b>		0,03		0,07		0,04	

За результатами обрахунків для земельної ділянки № 1 найбільший показник  $K=0,59$  мають ліси та інші лісовкриті площі.

Результати розрахунку інтегрального показника вибору угідь  $K$  для земельної ділянки № 2, яка межує з ділянкою № 1 та розміщується на півдні села Дубівка біля лісу, наведено у таблиці 4. Загальна площа ділянки – 23,8316 га, з яких порушені землі – 5,8308 га.

Для земельної ділянки № 2 інтегральний показник вибору угідь є найвищим для групи рекультивованих угідь – сільськогосподарські землі  $K= 0,29$ .

Далі наведено розрахунки для земельної ділянки № 3, що розміщується на північному-сході від с. Каноничі поблизу ставу та має площу – 79,8648 га, з них порушених земель – 4,6116 га (табл. 5).

Отже, згідно розрахунків для земельної ділянки № 3 найбільший коефіцієнт  $K= 0,29$  буде для земель під забудовою.

При плануванні подальшого використання певних земельних ділянок також необхідно враховувати соціально-економічні інтереси адміністративно-територіального утворення, екологічні фактори та існуючий стан земельних ресурсів.

Таблиця 4

 Результати розрахунку інтегрального показника  
 вибору угідь  $K$  для земельної ділянки № 2

Параметри відпрацьованої земельної ділянки	Сільсько- господарські землі		Ліси та інші лісовкриті землі		Землі під забудовою		Болота		Землі під водами	
	$\omega_i$	$f_{kj}(x_k)$	$\omega_i$	$f_{kj}(x_k)$	$\omega_i$	$f_{kj}(x_k)$	$\omega_i$	$f_{kj}(x_k)$	$\omega_i$	$f_{kj}(x_k)$
Ґрунти	0,47	1	0,47	1	0,13	0,10	0,6	1	0,33	1
Рельєф	0,26	1	0,21	1	0,4	0,10	0,2	1	0,27	1
Планувальні параметри	0,16	1	0,16	0,5	0,2	1	0,13	1	0,2	1
Дорожня інфраструктура	0,11	0,74	0,16	0,74	0,27	0,74	0,07	0,74	0,2	0,74
$\Sigma(\omega_i f_{kj}(x_k))$	0,97		0,88		0,45		0,98		0,95	
Глобальний пріоритет групи угідь $p$ ,	0,30		0,31		0,16		0,15		0,06	
Критерії $K_j$	<b>0,29</b>		0,27		0,07		0,15		0,06	

Таблиця 5

 Результати розрахунку інтегрального показника  
 вибору угідь  $K$  для земельної ділянки № 3

Параметри відпрацьованої земельної ділянки	Сільсько- господарські землі		Ліси та інші лісовкриті землі		Землі під забудовою		Болота		Землі під водами	
	$\omega_i$	$f_{kj}(x_k)$	$\omega_i$	$f_{kj}(x_k)$	$\omega_i$	$f_{kj}(x_k)$	$\omega_i$	$f_{kj}(x_k)$	$\omega_i$	$f_{kj}(x_k)$
Ґрунти	0,47	1	0,47	1	0,13	0,5	0,6	0,1	0,31	0,5
Рельєф	0,26	0,5	0,26	1	0,2	1	0,2	1	0,23	1
Планувальні параметри	0,16	0,5	0,16	0,5	0,47	1	0,13	1	0,23	1
Дорожня інфраструктура	0,11	0,74	0,11	0,74	0,2	1	0,07	0,74	0,23	0,74
$\Sigma(\omega_i f_{kj}(x_k))$	0,76		0,89		0,94		0,44		0,79	
Глобальний пріоритет групи угідь $p$ ,	0,33		0,18		0,31		0,12		0,06	
Критерії $K_j$	0,25		0,16		<b>0,29</b>		0,05		0,05	

Всі розглянуті земельні ділянки розміщені на території Каноницького старостинського округу. Сільськогосподарська освоєність території округу становить 59,5%, що є досить високим показником для зони Полісся. Також спостерігається висока розораність сільськогосподарських угідь – 54,19%. Відповідно у структурі сільськогосподарських угідь переважає рілля (1794,87 га).

Показник загальної розораності території складає 32,24%. Лісистість території округу (29,78%) є досить низькою для зони Полісся. Урбанізованість території складає 2,24%, що свідчить про недостатні умови для економічного розвитку території округу.

Отже, для раціонального використання земельних ресурсів та сталого розвитку території Каноницького старостинського округу, необхідно:

– здійснити екологічну оптимізацію угідь, шляхом зменшення розораності території та збільшення стабілізуючих угідь (сінокосів, пасовищ, лісів);

– збільшити площі територій, передбачених для забудови з метою залучення інвестицій, збільшення економічного потенціалу території та покращення умов проживання населення.

На основі виконаних розрахунків, з урахуванням просторового аналізу використання земель Каноницького старостинського округу, визначено оптимальне використання земельних ділянок.

З урахуванням інтегрального показника вибору угідь ( $K=0,59$  ліси та інші лісовкриті площі), стану та виду ґрунтів, місця розташування, рекомендовано земельну ділянку № 1 площею 6,2635 га заліснити. Це дозволить збільшити лісистість території, запобігти розвитку процесів вітрової ерозії.

Для земельної ділянки № 2 інтегральний показник вибору угідь є найвищим для сільськогосподарських земель  $K=0,29$ . Беручи до уваги вид ґрунтів, гідрологічні умови, місце розташування, рекомендовано земельну ділянку № 2 площею 23,8316 га залужити з подальшим використанням у складі сінокосів. Це дозволить зменшити розораність території та збільшити частку екологічностабілізуючих угідь.

Земельна ділянка № 3 розміщується на північному-сході від с. Каноничі поблизу ставу. На півдні ділянка прилягає до автодороги, що з'єднує Каноничі та Володимирець. На заході ділянка обмежена дорогою з твердим покриттям. По ділянці проходить ЛЕП. На основі інтегрального показника вибору угідь ( $K= 0,29$  землі під забудовою),

з врахуванням вигідного місця розташування, доступності до транспортної та енергетичної інфраструктури, рекомендовано земельну ділянку № 3 площею 79,8648 га передбачити до включення у межі населеного пункту с. Каноничі та використовувати для будівництва промислових, виробничих об'єктів, а також житлової та громадської забудови. Дотримання містобудівних, інженерно-геологічних, санітарних, екологічних вимог передбачити при розробленні детального плану території цієї земельної ділянки.

**Висновки.** Застосування системного підходу до вирішення задач планування використання земель та розвитку територій дозволяє врахувати сумісний вплив факторів на стан порушених земель, оцінити перспективні напрямки їх використання за умов невизначеності. На основі системного підходу, з врахуванням соціально-економічних, екологічних та просторових факторів, обґрунтовано та визначено перспективний вид використання порушених земель на прикладі трьох земельних ділянок у межах Каноничького старостинського округу. Результати досліджень можуть бути використанні при розробленні територіально-планувальних документів на регіональному та місцевому рівні, а саме схем землеустрою і техніко-економічних обґрунтувань використання та охорони земель територій громади, комплексного плану просторового розвитку території територіальної громади, генерального плану населеного пункту, детального плану території.

**1.** Рівненське обласне управління лісового та мисливського господарства : вебсайт. URL: <https://rivnelis.gov.ua/news/1211>. (дата звернення: 11.02.2022). **2.** Міхно П. Б. Методичні засади планування раціонального використання порушених земель : автореф. дис. ... канд. тех. наук : 05.24.04. Кременчук, 2017. 21 с. **3.** Міхно П., Хлян Я. Модель оптимізації використання рекультивованих земель. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. 2011. Вип. I(21). С. 241–247. **4.** Саати Т. Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий. Москва, 1993. 278 с. **5.** Черняга П. Г., Мельничук О. Ю., Корнілов Л. В., Німкович Р. С. Землеустрій як система оптимізації землекористування. *Інженерна геодезія*. 2009. Вип. 54. С. 225–231. **6.** Черняга П. Г., Бухальська Т. В., Люсак А. В. Модель оцінки небезпечних фізико-геологічних процесів на сформованих землекористуваннях в населених пунктах. *Містобудування та територіальне планування*. 2009. Вип. 32. С. 470–479. **7.** Технічна документація із землеустрою щодо інвентаризації земель сільськогосподарського призначення державної власності на території Каноничької сільської ради

Володимирецького району Рівненської області. ДНВП «Рівнегеокадастр». Рівне, 2015.

## REFERENCES:

1. Rivnenske oblasne upravlinnia lisovoho ta myslivskoho hospodarstva : vebсайт. URL: <https://rivnelis.gov.ua/news/1211>. (data zvernennia: 11.02.2022).
2. Mikhno P. B. *Metodychni zasady planuvannia ratsionalnoho vykorystannia porushenykh zemel* : avtoref. dys. ... kand. tekh. nauk : 05.24.04. Kremenchuk, 2017. 21 s.
3. Mikhno P., Khlian Ya. Model optymizatsii vykorystannia rekultyvovanykh zemel. *Suchasni dosiahnennia heodezychnoi nauky ta vyrobnytstva*. 2011. Vyp. I(21). S. 241–247.
4. Saati T. L. Prinyatie resheniy. Metod analiza ierarhiy. Moskva, 1993. 278 s.
5. Cherniaha P. H., Melnychuk O. Yu., Kornilov L. V., Nimkovych R. S. Zemleustrii yak systema optymizatsii zemlekorystuvannia. *Inzhenerna heodeziia*. 2009. Vyp. 54. S. 225–231.
6. Cherniaha P. H., Bukhalska T. V., Liusak A. V. Model otsinky nebezpechnykh fizyko-heolohichnykh protsesiv na sformovanykh zemlekorystuvanniakh v naselenykh punktakh. *Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia*. 2009. Vyp. 32. S. 470–479.
7. Tekhnichna dokumentatsiia iz zemleustroiu shchodo inventaryzatsii zemel silskohospodarskoho pryznachennia derzhavnoi vlasnosti na terytorii Kanonytskoi silskoi rady Volodymyretskoho raionu Rivnenskoï oblasti. DNVP «Rivneheokadastr». Rivne, 2015.

---

**Bukhalska T. V., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor; Yanchuk O. Ye., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor, Trokhymets S. M., Senior Lecturer** (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

## PLANNING THE RATIONAL USE OF DISTURBED LANDS AS A RESULT OF ILLEGAL AMBER MINING

The study is devoted to the issue of substantiation the perspective directions the rational use of disturbed lands due to illegal amber mining on the basis of a systematic approach. Large areas of disturbed land are emerging caused by illegal amber mining. There is no single concept of planning and further use of disturbed lands and development these territories.

A combination of the methods of the analytic hierarchy process and fuzzy sets was used to model the perspective optimal use of

disturbed lands. The optimizing hierarchical model of factors for planning the rational use of disturbed lands caused by illegal amber mining in the Kanonytschi united territorial rural community has been formed. The local and global priorities for each land plot based on the built model are determined. The integrated indicator  $K_i$  is calculated for the purpose of to select the type of land use. The perspective type of use the disturbed lands taking into account socio-economic, ecological and spatial factors on the basis of the performed calculations is substantiated and determined on the example of three land plots in the Kanonytschi starostyn district.

The application of a systematic approach to solving the problems of land use planning and territorial development allows to take into account the combined influence of factors on the condition of disturbed lands, to assess promising areas of their use in conditions of uncertainty.

The results of research can be used in the development of spatial planning documents at the regional and local levels, such as land management schemes and feasibility studies for the use and protection of community lands, a comprehensive plan of spatial development of the territorial community, master plan and detailed plan.

**Keywords:** disturbed lands; land use; territorial planning; long-term planning.

## РОЗРОБКА РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН

УДК 622.11:622.02

<https://doi.org/10.31713/vt1202216>

**Шевченко Г. О., д.т.н.** (Інститут геотехнічної механіки ім. М. С. Полякова Національної академії наук України, gashevchenko1@gmail.com), **Маланчук Є. З., д.т.н., Корнієнко В. Я., д.т.н., професор** (Національний університет водного господарства та природокористування, Рівне, e.z.Malanchuk@nuwm.edu.ua, kvja@i.ua), **Чолишкіна В. В., к.т.н., с.н.с. Курілов В. С., інженер** (Інститут геотехнічної механіки ім. М. С. Полякова Національної академії наук України, chel.valenti@gmail.com, papuycv@gmail.com)

### ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОМИСЛОВИХ КОНДИЦІЙ ВМІСТУ МІДІ І ЦІННИХ МЕТАЛІВ У ВІДВАЛАХ БАЗАЛЬТОВИХ КАР'ЄРІВ ВОЛИНИ

Базальтові кар'єри Волині сьогодні виробляють будівельні матеріали. Особливістю хімічного складу базальтових порід є високий вміст міді, заліза, титану та низький вміст сірки. Відходи переробки базальту накопичувалися у відвалах діючих та вироблених кар'єрів тривалий час і ніколи не перероблялися. Дослідження кількісного складу та вмісту хімічних елементів у відвалах шести базальтових кар'єрів показали, що вміст цінних металів у відвальній гірській масі становить: міді – 0,517–2,28%, заліза – від 8–9 до 15–16%, титану – 1,16–1,33%, п'ятиокису ванадію – 0,14–0,37%. Встановлено, що відвали базальтових кар'єрів, які містять мідевмісні породи – базальт, лавобрекчії, туфи, можна віднести до категорії самородно-окислених мідних руд, в яких вміст сульфідних різновидностей міді незначний. Зіставлення вмісту цінних компонентів у відходах кар'єрів з відповідним вмістом та мінеральним складом у перспективних родовищах показує, що сховища відходів базальтових кар'єрів відносяться до техногенних родовищ, які можуть бути джерелом для одержання міді та цінних металів.

**Ключові слова:** базальт; кар'єри; відвальні породи; мідь; залізо; титан.

**Вступ.** Про знахідки самородної міді на Волинському Поліссі відомо починаючи з XVIII століття. Українськими, а раніше

172



польськими геологами, досліджувалися багатокілометрові стратиформні поклади базальтів на Волино-Подільській плиті західного схилу Українського кристалічного щита, які супроводжуються проявами самородної мідної мінералізації [1; 2]. Базальтові родовища розробляються відкритим способом на низці кар'єрів. Наприклад, у Рівненській області на Івано-Долинському родовищі базальтів поблизу м. Костопіль розташовані 4 діючі і 2 вироблених кар'єри.

Середній вміст міді на чотирьох великих рудоносних вузлах (Ратненському, Кухотсько-Вольському Рафалівському, Шепетівському) оцінювався в 1,4% [2]. Основні мідевісні породи такі: базальт – до 1,2% міді, базальтовий туф – до 0,7%, клавостеричні лавобрекчії – до 5% міді [3–5]. Ресурси, наприклад, Рафалівського родовища досягають 25,1–25,8 млн т міді.

Базальтові поклади зараз розробляють відкритим кар'єрним способом. Кар'єри виробляють базальтові блоки, щебінь і гальку, при цьому класи крупності менше 5 мм є некондиційними. Кількість таких класів становить 15; 20; 42 (%) від вихідної сировини при розмірі розвантажувальної щілини дробарки 30; 20; 10 (мм), відповідно. Основна маса некондиційних класів базальту завантажується у відвал, а невелика кількість використовується для отримання мінеральної вати. Також, у відвал в повному обсязі поступають лавобрекчії і туфи. У базальтовому масиві лавобрекчії розташовані шарами товщиною до 1–1,5 м, в загальній масі базальту, а також у відходах, вміст лавобрекчії становить до 20%. Туфи потрапляють у відвал разом із розкривною породою і частково з підшви. Таким чином, у відвалах базальтових кар'єрів протягом десятиліть накопичувалася природна мідевісна сировина.

**Постановка проблеми.** В наукових публікаціях неодноразово зазначалося, що джерелом отримання міді в Україні можуть бути базальтові родовища Волині [1–6]. Проте, сьогодні розробка родовищ стримується питаннями визначення і затвердження промислових ресурсів у Держреєстрі [7; 8], а також значною мірою тим, що поки що не відпрацьована повністю технологія збагачення, починаючи з видобутку і змелення сировини і закінчуючи отриманням катодної міді. Для розробки технології збагачення базальтових родовищ, зокрема відвалів базальтових кар'єрів, насамперед треба визначити вміст цінних металів і в яких саме мінералах вони сконцентровані [9].

**Невирішена раніше частина загальної проблеми.** Відвали базальтових кар'єрів, як діючих, так і вироблених, можуть бути віднесені до техногенних родовищ тільки за умови промислових кондицій цінної сировини. Попередніми дослідженнями визначена наявність у базальтових смугах самородної міді, яку супроводжує окислена мідь, також вказано, що кількість сульфідної міді може виявитися більшою, ніж показують первинні опробування [1; 2]. Окремих досліджень щодо вмісту рудних мінералів у відвалах базальтових кар'єрів, раніше не проводилося.

**Метою роботи є** визначення вмісту металів у відходах базальтових кар'єрів, уточнення типу мідної мінералізації і визначення відповідності вимогам промислової сировини для обґрунтування можливості переробки і комплексного вилучення корисних компонентів.

**Огляд і аналіз літературних джерел.** Великий комплекс робіт з вивчення самородної мідної локалізації на Волинському Поліссі виконано співробітниками українських геологічних експедицій та наукових інститутів, такими як О. Є. Лукін, В. А. Шумлянський, В. Г. Мельничук, К. І. Деревська, В. М. Квасниця, І. В. Квасниця, Я. О. Косовський, В. І. Павлишин, В. О. Матеюк та багато інших.

Питання розробки наукових основ фізичних методів збагачення порід базальтових родовищ досліджувалися Інститутом геотехнічної механіки НАН України разом з Національним університетом водного господарства та природокористування. Цьому питанню присвятили свої праці А. Ф. Булат, В. П. Надутий, З. Р. Маланчук, Є. З. Маланчук, В. Я. Корнієнко, Т. Ю. Гринюк та інші вчені. Була встановлена можливість вилучення міді на стадії рудопідготовки фізичними способами збагачення, такими як подрібнення, відсадження, магнітна і електрична сепарація [4–6]. Доведено, що ці операції підвищують концентрацію міді, проте отримані продукти потребують подальшого збагачення. Питання щодо збагачення сировини відвалів базальтових кар'єрів раніше не піднімалися, хоча цей продукт, по-перше, вже здобутий, по-друге, вже в якійсь мірі подрібнений, а головне – містить материнські мідевмісні породи.

До середини і кінця ХХ століття великі світові родовища самородної міді були майже повністю вироблені. У зв'язку з вичерпанням багатих самородних мідних руд, технології, які використовувалися раніше (гравітаційно-флотаційні), втратили своє

значення і вдосконалювалися в напрямку більш широкого застосування комбінованих флотаційно-гідрометалургійних схем [10].

Відвали базальтових кар'єрів накопичувалися протягом багатьох десятиліть. Гірська маса у відвалах містить материнські породи, але внаслідок атмосферних процесів вони зазнали певних змін. Для процесу утилізації відвалів важливо мати інформацію щодо вмісту міді і мінерального складу сировини.

Відомо, що вміст міді у первинних рудах зазвичай становить 0,6–0,7%, але сьогодні відпрацьовують і бідні родовища з вмістом 0,2–0,4% Cu. Також відомо, що промислові скупчення міді утворюють лише 17–20 мінералів. Вони можуть бути у вигляді сульфідних сполук, окислених мінералів (оксиди, карбонати, силікати міді) і самородної міді.

У світі більше 85% міді отримують з сульфідних мідних руд. Для цих руд практичне значення переважно мають такі мінерали: халькозин  $\text{Cu}_2\text{S}$ , халькопірит  $\text{CuFeS}_2$ , ковелін  $\text{CuS}$ , борніт  $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ . Руда вважається сульфідною, якщо в ній не більше 10% окислених різновидів. Сульфідні руди повсюди збагачують флотацією, для сульфідних руд ця технологія досить відпрацьована і ефективна. Зазвичай, флотоконцентрати містять 20–30% міді, іноді до 40%. Найбідніший концентрат марки КМ7 містить 15% міді (ДСТ 52998-2008). Флотоконцентрат сульфідних руд найчастіше збагачують пірометалургію, отриманий продукт рафінують електролізом.

Змішані руди містять до 50–70% окислених різновидів. Якщо їх менше 30%, то руду флотують як сульфідну, в іншому випадку ці руди збагачують як окислені – флотацією і вилуговуванням, або тільки вилуговуванням.

Окислені руди складаються переважно з карбонатів і силікатів міді, вони можуть включати до 10% сульфідних компонентів. Серед окислених мінералів промислове використання здебільшого мають такі карбонати, як малахіт  $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$  – 57,4% Cu і азурит  $\text{CuCO}_3 \cdot 2\text{Cu}(\text{OH})_2$  – 55,5% Cu, а також, притаманні багатим рудам оксиди, такі як куприт  $\text{Cu}_2\text{O}$  – 88,8% Cu і тенорит  $\text{CuO}$  – 79,89% Cu. Разом з малахітом в сировині зазвичай перебуває легко флотований сульфат міді брошантіт  $\text{Cu}_4\text{SO}_4(\text{OH})_6$  – 56,2% Cu.

Найбільш поширеною є технологія, де окислену руду спочатку сульфадизують, а потім флотують як сульфідну (Е. В. Адамов, [10]). При сульфадизації і флотації окислених руд сульфгідрильними

збирачами вилучення досягає 70%, оксигідрильними збирачами – до 50% (С. І. Мітрофанов, [10]).

Відносно легко флотуються карбонати і оксиди, але практично не вилучаються флотацією силікати міді (хризокола або монтморилонітова глина  $\text{CuSiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  і діоптаз  $\text{CuSiO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), алюмосилікати і фосфати міді, а також мідь, пов'язана з гідроксидами заліза і марганцю [10].

Найбільше вилучення притаманне способу металізації окисленої руди і наступній флотації, але він рентабельний якщо у руді від 3% міді (А. М. Годен, С. І. Мітрофанов), за іншими даними від 1,5% [10]. Для збагачення окислених руд переважно використовують комбіновані флотаційно-гідрометалургійні схеми.

Нижня межа кондицій для сульфідної руди вважається 0,35–0,5%, для окисленої – 0,7–1,0%, але існує багато інформації щодо переробки сировини з вмістом міді 0,2–0,4%. В кожному випадку окремо приймається рішення про промислове використання руди, яке технічно можливе і економічно доцільне [9]. Не рідко це рішення обґрунтоване супутнім вилученням разом з міддю дорогоцінних або рідкісних металів, що компенсує високі витрати на використання складних флотаційних або комбінованих схем.

**Основні результати.** Огляд геологічних досліджень попередніх років вказує на значні коливання вмісту міді на різних ділянках мідної локалізації Волині [1–3]. Базальтові кар'єри, як і їх відвали, розташовані на значній відстані один від одного, тому вміст цінних мінералів і склад порід різних кар'єрів також відрізняється. Для визначення якісних показників гірської маси у відвалах базальтових кар'єрів, за участі держпідприємства «Укрпівденгеологія», проводили дослідження усереднених проб окремих порід відібраних у відвалах різних кар'єрів Івано-Долинського родовища.

Петрографічний аналіз зразків порід показав, що структура базальту дрібно- і тонкозерниста, лавобрекчії мають вигляд зцементованих конгломератів міцніших порід, туф має переважно дрібно- і тонкозернисту структуру. Переважають такі морфологічні типи самородномідної мінералізації: у лавобрекчіях прожилково-вкраплена, у базальтах і прожилково-вкраплена, і розсіяно-вкраплена, у туфах – розсіяно-вкраплена. Розподіл міді в породах нерівномірний. Головними породоутворюючими мінералами є піроксен, плагіоклази. У табл. 1, 2 наведено склад хімічних елементів, який отримано спектральним аналізом методом «просювання» на приладі СТ-1 з приставкою УСВ-10.

Таблиця 1

Вміст хімічних елементів у базальті та лавобрекчії, %

Елементи*	Концентрація елементів, %		
	Базальт Рафалівського кар'єру	Лавобрекчія Рафалівського кар'єру	Базальт кар'єру с. Янова Долина
<i>Cu</i>	<b>0,1&gt;1,0</b>	<b>&gt;&gt;1,0, 1-5</b>	<b>0,03</b>
<i>V</i>	0,01–0,03	0,3	0,05
<i>Ti</i>	<b>0,5–0,7</b>	<b>0,7</b>	<b>&gt;1,0</b>
<i>Fe</i>	<b>4,0</b>	<b>4,0–10,0</b>	<b>15,2</b>
<i>Mn</i>	0,07–0,1	0,1	0,1
<i>Al</i>	<b>10,0</b>	<b>3,0–10,0</b>	<b>3,0</b>
<i>Zn</i>	0,005	0,02	0,015
<i>Ni</i>	0,005	0,005	0,007
<i>Cr</i>	0,01–0,07	0,007	0,003
<i>Co</i>	0,007	0,005	0,003
<i>Sr</i>	0,01	0,0007	0,0007
<i>P</i>	0,1–0,2	0,15	0,1
<i>Ba</i>	0,07	0,05	0,05
<i>Zr</i>	0,01	0,005–0,01	0,015
Ag-6, г/т	5–8	30–50	7,0–9,0

\* *Pb, Sn, Ce, Mo, Li, La* – вміст незначний, має порядок 0,001–0,0001%

Таблиця 2

Вміст хімічних елементів у туфах, %

Елементи*	Концентрація елементів, %			
	Рафалівський кар'єр	Бересто- вельський кар'єр	Кар'єр біля с. Янова Долина	Кар'єр біля річки Цвітоха (Славута)
<i>Cu</i>	<b>0,02–0,1</b>	<b>0,05</b>	<b>&gt;1,0</b>	<b>0,05</b>
<i>V</i>	0,015–0,03	0,1	0,03	0,03
<i>Ti</i>	<b>&gt;1,0</b>	<b>&gt;1,0</b>	<b>0,5</b>	<b>0,7–1,0</b>
<i>Fe</i>	<b>7,0</b>	<b>15,0</b>	<b>7,0</b>	<b>1,0</b>
<i>Mn</i>	0,05–0,1	0,1	0,07	0,07
<i>Al</i>	<b>10,0</b>	<b>20,0</b>	<b>9,0</b>	<b>15,0</b>
<i>Zn</i>	0,01	0,01	0,0007	0,0007
<i>Ni</i>	0,015–0,02	0,003	0,0005	0,014
<i>Ba</i>	0,3–0,5	0,07	>1,0	0,05
<i>Cr</i>	0,03	0,007	0,03	0,02

продовження табл. 2

Co	0,007	0,007	0,006	0,0007
P	0,5-0,7	0,07	0,15	0,05
Zr	0,015-0,02	0,02	0,0005	0,02
Ag-6, г/т	10	10	30	2,0

\* Pb, Sn, Ce, Mo, Li, La, Sr – вміст незначний, має порядок 0,001–0,0001%



Національний університет  
водного господарства  
та природоохорони

На підставі даних табл. 1, 2, розраховано середній вміст елементів у відвальній гірській масі наступним чином.

У відвалах базальтових кар'єрів знаходиться суміш порід – базальту, туфу і лавобрекчії. Породи покрівлі перед початком розробки виводяться за межі кар'єру і у відвали не поступають. В масиві базальту туфу замало, він переважно міститься у покрівлі і підшві родовища. Туф потрапляє у відвал переважно з підшви в невеликій кількості, близько 5%, а лавобрекчія повністю, в кількості 20%. Таким чином в самому масиві базальтів розподіл порід наступний: Б : Л : Т = 75 : 20 : 5 (%), де Б – базальт, Л – лавобрекчія, Т – туф. Під час переробки базальту на щєбінь, у відвал повністю виводяться туф і лавобрекчії, а також некондиційні класи базальту. Їх кількість становить 20% від видобутої маси базальту при розмірі щілини дробарки 20 мм. Враховуючи, що у масиві 75% базальту, то у відвал виводиться  $75 \cdot 0,2 = 15\%$  базальту. Із перерахунку вихідного складу, маємо, що співвідношення порід у відвалі становить Б : Л : Т = 15 : 68 : 17 (%). Це співвідношення використовуємо для подальших розрахунків вмісту металів у відвальній масі.

Вміст міді згідно табл. 1, 2: у базальтах – до 1%, у лавобрекчії від 1 до 5%, для коректної максимальної оцінки приймемо середнє – 3%, у туфі від 0,1 і більше 1%, для оцінки приймаємо 0,55% Cu. Тоді у відвальній масі вміст міді становить по мінімуму  $(15 \cdot 1 + 68 \cdot 1 + 17 \cdot 0,1) / 100 = 0,85\%$ , а при коректній максимальній оцінці  $(15 \cdot 1 + 68 \cdot 3 + 17 \cdot 0,55) / 100 = 2,28\%$ . Таким чином, у відвальних породах вміст міді складає від 0,85 до 2,28% Cu.

Дані спектрального аналізу показують високий вміст заліза і титану у породах. Розрахунок цих елементів зробимо аналогічно розрахунку міді. Тут і далі розглядається залізо загальне. За даними табл. 1, 2, розрахунок можна зробити тільки для Рафалівського кар'єру. У його відходах вміст заліза: Б + Л + Т =  $(15 \cdot 4 + 68 \cdot 10 + 17 \cdot 7) / 100 = 8,6\%$  Fe. Вміст титану: Б + Л + Т =  $(15 \cdot 0,7 + 68 \cdot 0,7 + 17 \cdot 1) / 100 = 0,75\%$  Ti.

Нижче ми уточнимо ці результати із залученням інших методів аналізу.

Кількість ванадію у породах (по табл. 1, 2) вища за фонове значення 0,016% (вміст у землі). Вартість ванадію в п'ять разів вища ніж титану, тому можливість вилучення ванадію з відвалів базальтових кар'єрів дуже приваблива. Сьогодні джерелом ванадію є залізо-титано-ванадієві руди і відходи виробництва титану. Наприклад, приведемо показники руди і концентрату Качканарського ГЗК РФ, єдиного в світі, який виробляє низькотитаністий титано-магнетитовий концентрат для доменної плавки і отримання ванадію. Концентрат має вміст 2,5%  $TiO_2$ , 0,6%  $V_2O_5$  або 0,34 V, а титано-магнетитові руди Качканарського ГЗК містять 14–15% Fe і 0,12–0,14%  $V_2O_5$ , вони збагачуються за традиційною магнітною схемою.

Визначимо кількість ванадію у відвалах базальтових кар'єрів і порівняємо її з рудою Качканарського ГЗК. Найбільше ванадію міститься у лавобрекчії – 0,3% V для Рафалівського кар'єру (табл. 1). Тоді у відвальній масі міститься:  $B + L + T = (15 \cdot 0,03 + 68 \cdot 0,3 + 17 \cdot 0,03) / 100 = 0,21\%$  V або в перерахунку на п'ятиокис ванадію 0,37%  $V_2O_5$ . Врахуємо коливання ванадію в лавобрекчії від 0,3 до 0,1%. Тоді для 0,1% V у лавобрекчії маємо у відвальній масі 0,078% V або 0,14%  $V_2O_5$ . Таким чином, за вмістом п'ятиокису ванадію 0,14 – 0,37%  $V_2O_5$ , відвали базальтових кар'єрів порівняні з промисловою сировиною Качканарського ГЗК.

Також у породах спостерігається підвищена кількість алюмінію і срібла (табл. 1, 2). У публікаціях неодноразово вказувалось на наявність срібла і золота в базальтових породах, поряд з цим вказувалось на помітне коливання їх вмісту, наприклад срібла від 0,01 до 0,37% [1; 12]. Імовірно золото і срібло можуть вилучатися попутно з основними рудоутворюючими елементами, якими є мідь, залізо, титан.

Далі аналіз металевої фракції виконували на підставі рентгенофазового аналізу на вміст оксидів у базальтових породах (табл. 3, 4).

Таблиця 3

Вміст оксидів у базальтах на різних кар'єрах

Оксиди	Село Ходоси, Гудвін, Янова Долина, Мидськ	с. Берестовець, с. Янова Долина (кар'єр № 2)	с. Іванчі, Рафалівське родовище
$Al_2O_3$	14,3	12,79	14,9
$SiO_2$	45,04	47,36	43,2
$CaO$	6,58	9,38	10,2
$SO_3$	0,3	0,2	0,3
$S^*$	0,12	0,08	0,12
$TiO_2$	2,54	2,85	2,2–4,0
$Ti^*$	1,52	1,7	1,3–2,4
$MnO_2$	0,4	0,21	0,4
$Fe_2O_3$	6,03	3,36	5,5
$FeO$	6,46	10,63	13,2–15,3
$Fe^*$	5,0	8,27	10,3–11,9
$CuO$	1,2	0,22	0,3–1,2
$Cu^*$	1,0	0,17	0,24–1,0
$MgO$	8,47	6,19	4,2
$Na_2O$	2,42	2,78	3,0
$K_2O$	0,48	2,05	1,8
$P_2O_5$	0,17	0,57	0,4

\* перерахунок оксидів на хімічні елементи залежно від атомної ваги

Таблиця 4

Вміст оксидів у туфах, % (Рафалівський кар'єр)

Склад	Червоний туф	Сірий туф
$Al_2O_3$	9,03	6,7
$SiO_2$	43,886	43,12
$CaO$	3,04	3,44
$SO_3$	1,775	2,0
$S^*$	0,71	0,8
$TiO_2$	4,388	3,64
$Ti^*$	2,63	2,18
$Fe_2O_3$	34,25	36,0
$Fe^*$	24,0	25,2
$CuO$	0,7	0,06–0,2
$Cu^*$	0,56	до 0,16



продовження табл. 4

$K_2O$	3,49	4,83
$Rb_2O$	2,58	4,66
$SrO$	4,05	4,53
$Y_2O_3$	2,31	1,06
$ZrO_2$	5,215	0,116
$Nb_2O_5$	4,618	1,36

\*перерахунок оксидів на хімічні елементи

За даними табл. 1–4 зауважимо, що серед усіх порід туф найбільш насичений залізом. У відвальних породах внаслідок атмосферних впливів туф з часом набуває червонуватого відтінку і більш рихлу структуру. Тому для подальших розрахунків з табл. 4 беремо червоний туф.

Вміст заліза і міді у лавобрекчії визначався експериментально по залишку після обпалювання при температурі 1400–1500° С. Вихід залишку (недопалку) від вихідної маси для трьох проб склав 14–17%, в середньому 15,5%. В усередненій пробі недопалків вміст заліза склав 93,5%, міді 2,58%. Таким чином, у вихідній пробі лавобрекчії було  $15,5 \cdot 0,935 = 14,49\%$  Fe і  $15,5 \cdot 0,0258 = 0,4\%$  Cu.

З табл.3, 4 бачимо, що вміст оксиду міді складає: в базальтах – до 1,2%, в червоних туфах – до 0,7%. У перерахунку на метал в базальтах – до 1% Cu, в червоних туфах до 0,56% Cu. Для лавобрекчії беремо вміст міді 0,4% (визначено вище по недопалку), тому у відходах:  $B+L+T = (15 \cdot 1 + 68 \cdot 0,4 + 17 \cdot 0,56) / 100 = 0,517\%$  Cu. Порівняємо з отриманим вище розрахунком по таблицях 1 і 2, де одержано, що у відходах 0,85–2,28% Cu. Тоді отримане зараз значення 0,517% Cu – це нижня межа коливань діапазону.

Таким чином, можна стверджувати, що у відходах базальтових кар'єрів вміст міді становить 0,517–2,28% Cu. Діапазон коливань здебільшого викликаний зміною вмісту міді у лавобрекчії від 0,4 до 3%.

Вміст оксидів заліза  $FeO+Fe_2O_3$  в базальтах становить 12,5÷20,8%, в туфах вміст гематиту  $Fe_2O_3$  – 34,25÷36%. В табл. 3, 4 наведено перерахунок оксидів на елементарне залізо (FeO містить 77,78% Fe,  $Fe_2O_3$  – 70% Fe). Вище було зроблено аналіз на залізо тільки для Рафалівського кар'єру. Згідно табл. 3 для чотирьох кар'єрів маємо:  $B+L+T = (15 \cdot 5 + 68 \cdot 14,49 + 17 \cdot 24) / 100 = 14,68\%$  Fe. На кар'єрі № 2 Янової Долини – 15,17% Fe. На Рафалівському кар'єрі

15,48–15,72% Fe – це верхня межа, а попередні розрахунки 8,6% – нижня межа, тобто діапазон  $8,6 \div 15,72\%$ , в середньому 12,1% Fe.


Таким чином, вміст заліза у відвалах може становити від 8–9 до 15–16%, в середньому для Рафалівського кар'єру 12,16% Fe, для інших кар'єрів – 14,68% Fe.

Визначимо вміст титану у відходах. У базальті Рафалівського кар'єру вміст Ti коливається від 1,3 до 2,4%. Цей діапазон включає також показники титану на інших кар'єрах (табл. 3). Тоді по максимуму, для 2,4% Ti, маємо:  $B+L+T=(15 \cdot 2,4+68 \cdot 0,77+17 \cdot 2,63)/100=1,33\%$  Ti, по мінімуму, при 1,3% Ti у базальті, – 1,16%. Вміст титану у відвальній гірській масі становить 1,16–1,33% Ti.

Згідно з дослідженням Надутого В. П., Маланчука Є. З. та інших вчених, базальт, туф і лавобрекчія мають істотні магнітні властивості: залежно від ступеню подрібнення і напруженості магнітного поля вихід магнітного продукту сепарації становить до половини вихідної проби [4–6]. Зважаючи на це, а також на високий вміст заліза і титану, можна стверджувати що в породах міститься певна кількість сильномагнітного магнетиту  $FeO \cdot Fe_2O_3$  та його зростків з іншими мінералами. Насамперед, це титаномagnetит  $FeTiO_3 \cdot Fe_3O_4$  – зростки ільменіту з магнетитом (сам ільменіт – немагнітний). Магнітним є також піротин  $FeS_2$ , але його кількість на фоні гематиту та інших оксидів заліза незначна. Також у породах присутні інші залізовмісні мінерали, такі як вюстит  $FeO$ , лимоніт, гематит, складні оксиди металів  $MeO \cdot Fe_2O_3$ , але вони або слабомагнітні, або не магнітні і практично не вилучаються магнітною сепарацією. Сульфіди міді та заліза також є слабомагнітними, це: пірит  $FeS$ , II ( $Fe_3S_4$ ), III ( $Fe_2S_3$ ), халькопірит  $CuFeS_2$ , борніт  $Cu_5FeS_4$ . Не виявляють магнітні властивості халькозин  $Cu_2S$ , ковелін  $CuS$ , сульфати заліза і міді (солі сірчаної кислоти), інші похідні залізовмісних мінералів, наприклад, сульфід заліза і калію  $KFeS_2$ .

Внаслідок цього, сульфідні руди не збагачують магнітною сепарацією, розділення міді і заліза виконують в металургійному переділі, а при великому вмісті піриту застосовують селективну піритну флотацію. Безперечно, високий вміст заліза, як в сульфідних, так і в окислених мідних рудах ускладнює технологію і вимагає додаткових реагентів і для флотації, і для вилуговування.

За вмістом міді, заліза і титану у відвалах базальтових кар'єрів їх можна віднести до залізо-мідних або мідно-титанових руд. Такі руди є надто рідкісні. Наприклад, Вовківське родовище на Уралі, де в



руді міститься 10–12% Fe, і  $\alpha = 0,7\text{--}0,8\%$  міді. Ця руда переробляється на фабриці Червоноуральського металургійного комбінату. Руда сульфідна, збагачується при двох стадіях змелення і трьох стадіях флотації. Флотаційна технологія забезпечує добрі показники якості: в концентраті  $\beta = 21\text{--}25\%$  Cu, у відвальних хвостах  $\theta = 0,2\text{--}0,3\%$  Cu. При  $\gamma = 100 \cdot (\alpha - \theta) / (\beta - \theta)$  і  $\epsilon = \gamma \cdot \beta / \alpha$ , вилучення міді в концентрат становить  $\epsilon = 58\text{--}76\%$ . Досвід використання магнітної сепарації на цих рудах був негативний. Відзначимо, що флотація в даному випадку виконується для сульфідної руди, як зазначено в [10], на окисленій руді аналогічна схема буде менш результативною.

Ще одна важлива особливість базальтових порід – це низький вміст оксиду сірки  $\text{SO}_3$  і, як наслідок, елементарної сірки (табл. 3, 4). Це вказує на те, що низьким є і вміст сірковмісних мінералів – сульфатів і сульфідів міді і заліза. Для типових сульфідних руд вміст елементарної сірки може становити 20–40%, наприклад для мідно-колчеданних руд співвідношення міді, цинку і сірки становить 1:1:20, а мідно-піритні руди містять сірки до 90–95%. В окислених мідних рудах вміст сірки набагато нижчий. Наприклад, окислена руда Жезказганського родовища Казахстану має показники [13]:  $\text{SiO}_2$  66,82;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  15,45; Cu 0,24;  $\text{Fe}_{\text{общ}}$  3,15,  $\text{Fe}_{\text{ок}}$  2,46;  $S_{\text{общ}}$  1,19,  $S_{\text{сульфид}}$  0,23; CaO 2,7; MgO 1,31; BaO 1,2;  $\text{Na}_2\text{O}$  3,3;  $\text{MnO}_2$  0,05; Pb 0,14; Zn 0,08; C 1,68, (%). Тут загальний вміст сірки 1,19%, в тому числі сульфідної лише 0,23%. Це типова картина для мідних руд в зоні окислення [11]. Із табл. 3, 4 ми бачимо, що вміст сірки в базальтових породах теж близький до 1%. Тобто по цьому показнику породи подібні до окислених мідних руд Жезказгану.

Низький вміст сірки в базальтових породах і одночасно високий вміст заліза показують, що в породах мало заліза у формі сульфідів (піриту) і сульфатів, а переважно вони містять оксиди, складні оксиди і гідроксиди заліза. Також низький вміст сірки однозначно вказує, що базальтові породи слід відносити до окислених руд з самородною мідною мінералізацією.

Для визначення мінералів (в даному випадку тільки рудних мінералів міді) проби порід подрібнювали до крупності мінус 2,5 мм, потім розсіювали на 2–3 класи і в кожному вузькому класі вивчали мінералогічний склад порошоків під бінокулярним мікроскопом. За допомогою оптичної мікроскопії рудні зерна міді можна відрізнити за кольором: самородна мідь – від рожевого до мідно-червоного і

коричневого, малахіт – всі відтінки зеленого, азурит – відтінки блакитного, халькопірит – золотисто-жовтий, пірит – від латунно-жовтого до темно-жовтого. Результати, приведені в табл. 5, показують, що базальтовим породам притаманне самородні і окислені мідні різновиди, сульфідні різновиди, а такі як борніт, брошантит присутні в незначній кількості.

Таблиця 5

Аналіз вузьких класів крупності базальтових порід

Порода	Крупність, мм	Вихід, %	Вміст Cu, %	Мінерали
Базальт	-2,5+1,6	21,91	5,79	Мідь самородна в зростках 10–15% і розкрита 5–7%, Малахіт в зростках 3–4% і розкритий – менше 1%, куприт од. зерна
	-1,6+0,25	56,68	2,14	Мідь самородна в зростках 2–3%, Малахіт в зростках 5–7% і в од зернах, брошантит в зростках, куприт од. зерна
	-0,25	21,41	0,65	Мідь самородна до 1%
Лаво-брекчія	-2,5+0,25	84,06	1,07	Мідь самородна в зростках до 15%, Малахіт 1–2%, куприт 1–2%, борніт і азурит – од. зерна
	-0,25	15,94	2,92	Мідь самородна 2–4%, Малахіт до 40%, борніт 2–3%, азурит од. зерна
Туф	-2,5+0,1	58,8	0,36	Малахіт в зростках до 1%, мідь самородна – поодинокі зростки
	-0,1	41,2	0,77	Малахіт і мідь самородна в одиничних зернах

Тривале зберігання відходів базальтових кар'єрів формує зміну первинних (сульфідних) мінералів внаслідок окислення, вивітрювання, вилуговування атмосферною водою руд і порід. Тому у відвалах кар'єрів мінерали міді і заліза, в тому числі самородна мідь, є більш окисленими, ніж у глибинних материнських породах. Таким чином гірську масу відвалів слід відносити до категорії окислених мідних руд із самородними включеннями і для розробки технології збагачення відвалів слід звернути особливу увагу саме на способи збагачення окислених мідних руд.

Це підтверджують дані табл. 5, де видно, що в усіх класах крупності містяться мінерали міді окислених форм. Більшість з них це карбонати (малахіт), набагато менше оксидів (куприт). Співвідношення самородної міді і, наприклад, малахіту в породах становить від 1:3 до 1:4. Це говорить про те, що при збагаченні слід орієнтуватися на вилучення саме окисленої міді. Переважний вміст карбонатів і оксидів міді в порівнянні з сульфідними різновидами є сприятливим фактором, як для флотації, так і для вилуговування. Проте обидві технології – флотація і вилуговування, ускладнюються наявністю залізистих мінералів і схильністю порід до шламування. Для підвищення ефективності подальшого збагачення одним із важливих завдань є зниження кількості шламів у продуктах змелення.

### Висновки

Встановлено співвідношення основних порід у гірській масі відвалів, а саме: базальт:лавобрекчії:туф = 15:68:17 (%), кількість супутніх порід (пісок і крейда) у відвалах незначна.

На підставі результатів аналізу визначено середній вміст металів у відвальній гірській масі базальтових кар'єрів, який становить:

- міді 0,517 – 2,28% Cu. Діапазон зміни викликаний більшою мірою коливанням вмісту міді в лавобрекчії від 0,4 до 3% Cu;

- заліза від 8–9 до 15–16%. В середньому для Рафалівського кар'єру – 12,16% Fe, для інших кар'єрів – 14,68% Fe.

- Найбільш багаті залізом туфи, які містять 24–25% Fe, на другому місці лавобрекчії – від 4–10, до 14,5%, в базальті 5–11,9% Fe;

- титану у відвальній гірській масі 1,16–1,33% Ti. Вміст титану у базальтах від 0,5–0,7 до 1,5–2,5%, у туфах до 2,18–2,63%;

- вміст п'ятиокису ванадію становить 0,14–0,37% V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, здебільшого ванадій міститься в лавобрекчії – до 0,3% V.

Зіставлення вмісту цінних компонентів у відходах базальтових родовищ із відповідним вмістом і мінеральним складом перспективних родовищ демонструє, що сховища відходів відносяться до техногенних родовищ, і можуть бути джерелом отримання міді, ванадію, титано-залізистих концентратів. За вмістом міді відходи базальтових кар'єрів можна віднести до рядових до 1–2% і бідних 0,2–0,5% родовищ самородно-окисленої міді.

Мікроскопічні дослідження мінерального складу рудної фази у вузьких класах крупності не показали помітну кількість сульфідних

різновидів міді. Для розробки технології збагачення слід орієнтуватися на те, що мідь представлено у вигляді самородної мінералізації і окислених мідних мінералів, переважно у вигляді карбонатів і оксидів міді.

Ефективно залучити накопичені техногенні запаси кар'єрів до розробки дозволить поєднання фізико-технічних і фізико-хімічних способів збагачення. При цьому одним із актуальних завдань є знешламлювання сировини для підвищення ефективності подальших збагачувальних операцій.

**1.** Мідь Волині. *Наукові праці Інституту фундаментальних досліджень* : зб. наук. праць. К. : Логос, 2006. С. 171–178. **2.** Деревская Е. И., Шумлянский В. А. Медные рудопроявления в траппах Вольно-Подольской окраины Восточно-Европейской платформы. *Матер. IV всерос. симпозиума по вулканологии и палеовулканологии*, 22–27 сентября 2009 г., Петропавловск-Камчатский, Р.Ф. Разд. VI. Том 2. С. 744–746. **3.** Malanchuk Z., Malanchuk Ye., Korniyenko V., Ignatyuk I. Examining features of the process of heavy metals distribution in technogenic lacers at hydraulic mining. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. № 1/10 (85). Pp. 45–51. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.92638. **4.** Булат А. Ф., Надутый В. П., Маланчук З. Р. Перспективы комплексной переработки базальтового сырья Волины. *Геотехническая механика* : межвед. сб. науч. тр. ИГТМ НАН Украины. Днепропетровск, 2010. Вип. 85. С. 3–7. **5.** Malanchuk E. Z. The results of studies of the distribution of native copper in rock mass Volhynia (Ukraine). *Fundamental and Applied Studies in the Pacific and Atlantic Ocean Countries* : materials of The 1st International Academic Congress. Tokyo, Japan, 25 october 2014. **6.** Спосіб підготовки мідевмісних базальтів до комплексного збагачення: пат. 42265 UA, МПК E21C 41/00. Заявник і патентоволодар ІГТМ НАН України. № 200901225; Заявл. 05.05.2009; Надрук. 25.06.2009, Бюл. № 2. **7.** Мельничук В. Г., Приходько В. Л. Обґрунтування інвестицій у вивчення та освоєння покладів міді на Волині на прикладі рудопрояву «Жиричі» (Волинь). *Мінералогічний збірник*. 2015. Вип. 2. № 65. С. 4–13. **8.** Вполювати волинську мідь. URL: [kscnet.ru/ivs/conferences/symposium\\_4/abstr...17.pdf](http://kscnet.ru/ivs/conferences/symposium_4/abstr...17.pdf) (дата звернення: 14.02.2022). **9.** Изoitко В. М. Технологическая минералогия и оценка руд. СПб. : Наука, 1997. 532 с. **10.** Абрамов А. А. Технология переработки и обогащения руд цветных металлов. *Рудоподготовка и Cu, Cu-Py, Cu-Fe, Mo, Cu-Mo, Cu-Zn руды*. М. : Изд. МГУ, 2005. Том 3. Книга 1. 575 с. **11.** Смирнов С. С. Зона окисления сульфидных месторождений. М. : Изд. АН СССР, 1955. 335 с. **12.** Квасниця В. М., Квасниця І. В., Косовський Я. О., Бондаренко І. М. Самородне срібло з вендських вулканітів Волині. *Мінерал. журнал*. 2004.,

№ 4. Т. 26. С. 10–18. **13.** Бейсембаев Б. Б., Кунаев А. М., Кенжалиев Б. К. Теория и практика кучного выщелачивания меди. Алмаата : Гылым, 1998. 348 с.

## REFERENCES:

- 1.** Mid Volyni. *Naukovi pratsi Instytutu fundamentalnykh doslidzhen* : zb. nauk. prats. K. : Lohos, 2006. S. 171–178. **2.** Derevskaia E. I., SHumlyanskiy V. A. Mednyie rudoproyavleniya v trappah Volynino-Podolskoy okrainyi Vostochno-Evropeyskoy platformyi. *Mater. IV vseros. simpoziuma po vulkanologii i paleovulkanologii*, 22–27 sentyabrya 2009 g., Petropavlovsk-Kamchatskiy, R.F. Razd. VI. Tom 2. S. 744–746. **3.** Malanchuk Z., Malanchuk Ye., Korniyenko V., Ignatyuk I. Examining features of the process of heavy metals distribution in technogenic lacers at hydraulic mining. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. № 1/10 (85). Pp. 45–51. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.92638. **4.** Bulat A. F., Nadutyiy V. P., Malanchuk Z. R. Perspektiviyi kompleksnoy pererabotki bazaltovogo syiryia Volyni. *Geotekhnicheskaya mehanika* : mejved. sb. nauch. tr. IGTM NAN Ukrainyi. Dnepropetrovsk, 2010. Vip. 85. S. 3–7. **5.** Malanchuk E. Z. The results of studies of the distribution of native copper in rock mass Volhynia (Ukraine). *Fundamental and Applied Studies in the Pacific and Atlantic Ocean Countries* : materials of The 1st International Academic Congress. Tokyo, Japan, 25 october 2014. **6.** Sposib pidhotovky midevmisnykh bazaltiv do kompleksnoho zbahachennia: pat. 42265 UA, MPK E21C 41/00. Zaiavnyk i patentovolodar IHTM NAN Ukrainyi. № 200901225; Zaiavl. 05.05.2009; Nadruk. 25.06.2009, Biul. № 2. **7.** Melnychuk V. H., Prykhodko V. L. Obgruntuvannia investytsii u vyvchennia ta osvoinnna pokladiv midi na Volyni na prykladi rudoproiavu «Zhyrychi» (Volyn). *Mineralohichniy zbirnyk*. 2015. Vyp. 2. № 65. S. 4–13. **8.** Vpoliuvaty volynsku mid. URL: [kscnet.ru/ivs/conferences/symposium\\_4/abstr...17.pdf](http://kscnet.ru/ivs/conferences/symposium_4/abstr...17.pdf) (data zvernennia: 14.02.2022). **9.** Izoitko V. M. Tehnologicheskaya mineralogiya i otsenka rud. SPb. : Nauka, 1997. 532 s. **10.** Abramov A. A. Tehnologiya pererabotki i obogascheniya rud tsvetnyih metallov. *Rudopodgotovka i Cu, Cu-Py, Cu-Fe, Mo, Cu-Mo, Cu-Zn rudyi*. M. : Izd. MGU, 2005. Tom 3. Kniga 1. 575 s. **11.** Smirnov S. S. Zona okisleniya sulfidnyih mestorojdeniy. M. : Izd. AN SSSR, 1955. 335 s. **12.** Kvasnytsia V. M., Kvasnytsia I. V., Kosovskyi Ya. O., Bondarenko I. M. Samorodne sriblo z vendskykh vulkanitiv Volyni. *Mineral. zhurnal*. 2004., № 4. Т. 26. С. 10–18. **13.** Beysembaev B. B., Kunaev A. M., Kenjaliev B. K. Teoriya i praktika kuchnogo vyischelachivaniya medi. Almaata : Gyilyim, 1998. 348 s.

**Shevchenko H. O., Doctor of Engineering** (Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro), **Malanchuk Ye. Z., Doctor of Engineering,** **Korniienko V. Ya., Doctor of Engineering. Professor** (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne), **Cholyshkina V. V., Candidate of Engineering (Ph.D.), Senior Research Fellow,** **Kurilov V. S., Engineer** (Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro)

### **JUSTIFICATION OF INDUSTRIAL CONDITIONS OF COPPER AND VALUABLE METALS CONTENT IN THE DUMPS OF THE BASALT QUARRIES OF VOLYN**

The basalt quarries of Volhynia today produce building materials. A feature of the chemical composition of basalt rocks is the high content of copper, iron, titanium and low sulfur content. Basalt processing waste accumulated in the dumps of existing and developed quarries for a long time and was never processed. Studies of the quantitative composition and content of chemical elements in the dumps of six basalt quarries have shown that the content of valuable metals in the dump rock mass is: copper 0.517 – 2.28%, iron from 8–9 to 15–16%, titanium 1.16 – 1.33% vanadium pentoxide 0.14 – 0.37%. It has been established that the dumps of basalt quarries containing copper-bearing rocks – basalt, lavobreccia, tuff, can be classified as naturally oxidized copper ores in which the content of sulfide minerals is not significant. Comparison of the content of valuable components in quarry waste with the corresponding content and mineral composition in promising deposits shows that the storage of basalt quarry waste belong to technogenic deposits that can be a source for the production of copper and valuable metals.

**Keywords:** basalt; quarries; dump rocks; copper; iron; titanium.



**Почтарьов О. В.,** аспірант, **Калініченко О. В.,** **Калініченко В. О.,** д.т.н.,  
**професор** (Криворізький національний університет),  
**Кучерук М. О.,** асистент (Національний університет водного  
господарства та природокористування, м. Рівне)



Національний університет водного господарства та природокористування  
**ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВІДХИЛЕННЯ СВЕРДЛОВИНИ ВІД  
ПРОЄКТНОГО КОНТУРУ НА ЯКІСТЬ ПОДРІБНЕННЯ РУДИ**

Метою даної роботи є дослідження впливу відхилення свердловини від проєктного контуру на зміну параметрів буровибухових робіт (БВР), особливо величину ЛНО та відстань між кінцями глибоких свердловин. Це призводить до того, що відстань між кінцями сусідніх свердловин може зменшитися або збільшитися. Збільшення відстані між кінцями свердловин призведе до непрогнозованого виходу негабаритних кусків відбитої руди з проблемами, що з цього випливають. Зменшення відстані між кінцями свердловин призведе до додаткового виходу мілкої пилуватої фракції, що також є недоцільним. Для аналізу фактичного стану БВР, а саме проблеми викривлення свердловин при розбурюванні віял глибоких свердловин, було досліджено схеми відбійки руди глибокими свердловинами, пробуреними на ш. «Родіна» ПрАТ «Криворізький залізорудний комбінат» (КЗРК). Виконані дослідження дозволили виявити основні закономірності викривлення глибоких свердловин та встановити їхній вплив на якість подрібнення руди вибухом.

**Ключові слова:** руда; відхилення свердловини; параметри БВР; якість подрібнення.

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** Виконаними дослідженнями встановлено, що при проєктуванні буро-вибухових робіт необхідно визначити оптимальні показники відбійки, які задовольняли б вимогам не тільки до якості подрібнення руди при відбійці, а й вимогам зниження собівартості БВР по блоку.

Отже, початковий процес підземних гірничих робіт, яким є відбійка руди, значним чином впливає на всю технологічну лінійку виробництва залізорудної продукції. Ця лінійка включає як

видобуток руди в шахті, так і її наступну переробку в металургійну продукцію.

**Постановка завдання.** В процесі виконаних досліджень було визначено ключову причину, яка найбільшим чином впливає на якість відбитої руди [1–3]. Якщо виключити людський фактор, який полягає в неякісному розрахунку параметрів БВР, недобурі свердловин або наявності вибухівки низької якості, то залишається головна гірничо-геологічна причина, на яку практично не впливає людський фактор [4; 5].

Такою причиною, на наш погляд, є викривлення свердловин відносно проєктного контуру, іноді з попаданням свердловин в законтурний простір або пусті породи [1; 6; 7].

Таким чином, метою роботи є дослідження впливу відхилення свердловини від проєктного контуру на зміну параметрів буровибухових робіт та встановлення основних закономірностей їх впливу на якість подрібнення руди вибухом.

**Викладення матеріалу та результати.** Для аналізу фактичного стану БВР, а саме проблеми викривлення свердловин при розбурюванні віял глибоких свердловин, було досліджено схеми відбійки руди глибокими свердловинами, які були пробурені згідно проєкту № -2-22 нарізних та очисних робіт у панелі 102–106а осі гор.1387 м у п/поверсі гор.1390/1345 м покладу «Основний-95» (штр. 1–2, орти) ш. «Родіна» ПрАТ «Криворізький залізорудний комбінат» (КЗРК). Такі умови є характерними для родовищ багатих залізних руд Криворізького залізорудного басейну.

Балансовий запас проєктованого блоку становить 117,0 т.т. з вмістом заліза 60,05%.

Корисна копалина в межах ділянки, що проєктується, представлена рудою мартитовою п'ятого залізистого горизонту.

Руда мартитова (PR1Sx5f) синього кольору, тонко-шаруватої текстури, міцністю 5–7 (середня 6) за шкалою професора М. М. Протодьяконова, інтенсивної тріщинуватості,  $K_{стр.} < 0,5$ , надто низької стійкості, брилової окремоті. Руда схильна до утворення вивалів та відшарувань з покрівлі та стінок виробок, особливо тих, що проходяться по простяганню порід. Об'ємна вага складає 3,65 т/м<sup>3</sup>.

Середній вміст заліза в масиві панелі, що проєктується, складає 60,05%.

З лежачого боку розташований масив руди мартитової з середнім вмістом заліза в масиві 59,56%.

Цим проєктом планується застосування віял глибоких свердловин діаметром 110 мм. Прийнята схема буріння масиву забезпечує можливість використання ефективних методів управління дії вибухом, мінімальний динамічний вплив на конструктивні елементи системи розробки.

Для дослідження закономірностей впливу викривлення свердловин на зміну параметрів БВР, особливо величину ЛНО та відстань між кінцями глибоких свердловин, були виконані виміри та обробка результатів викривлення свердловин.

Виконані дослідження дозволили виявити основні закономірності викривлення глибоких свердловин. Так, встановлено, що при бурінні вертикальних віял глибоких свердловин вхрест простягання рудного покладу (рисунок) напрямок викривлення свердловин та величини викривлення від проєктного контуру залежить від кількох основних факторів.

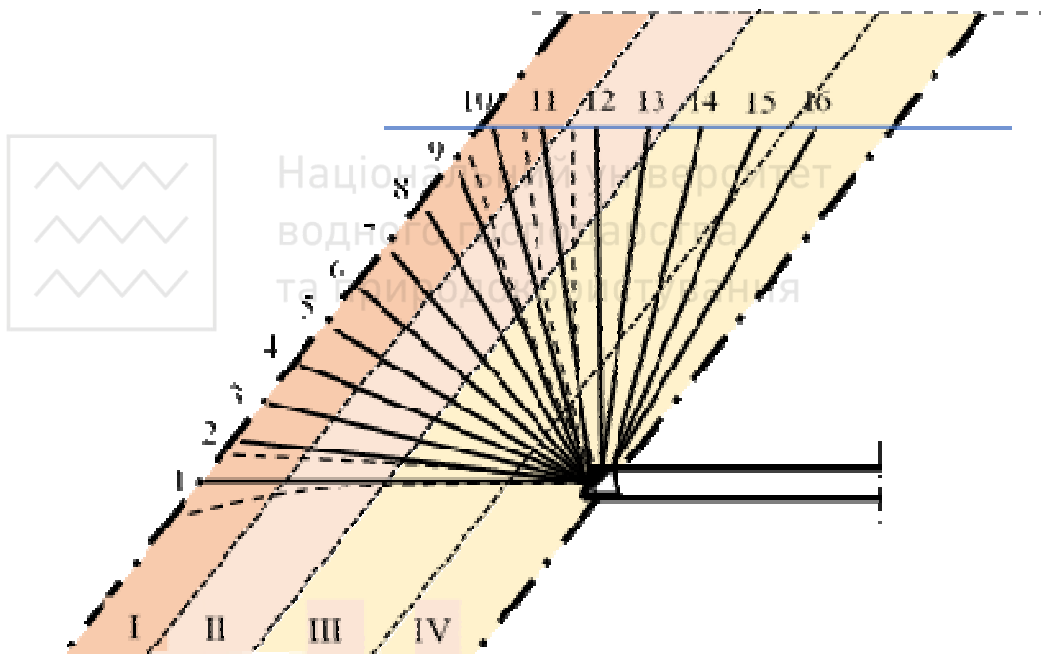


Рисунок. Схема розбурювання рудного покладу вертикальним віялом глибоких свердловин з їх проєктним та прогнозним контуром: 1, 2, 3... – номери свердловин у віялі; I,II,III, IV – шари рудного покладу

Враховуючи отримані результати багатofакторних експериментів, визначено універсальний інтегральний показник величини максимального відхилення свердловин від проєктного контуру  $\Delta l$  в залежності від довжини свердловин та кута перетину буровою коронкою шару руди в покладі:

$$\Delta l = (0,0003l^2 + 0,0049l + 0,1367) \cdot (30,592 \beta - 0,833), \text{ м};$$

де  $\Delta l$  – величина максимального відхилення свердловин від проєктного контуру, м;

$l$  – довжина свердловини у віялі, м;

$\beta$  – кут перетину буровою коронкою шару руди в покладі, град.

Виконані дослідження дозволили встановити, що величина максимального відхилення свердловин від проєктного контуру  $\Delta l$  при відпрацюванні шаруватих покладів багатих залізних руд залежить від довжини свердловини та кута перетину свердловиною шарів руди в покладі. При кутах перетину від  $\beta = 65^\circ$  до  $\beta = 25^\circ$  і довжині свердловини 25–30 м величина максимального відхилення свердловин  $\Delta l$  збільшує відстань між кінцями свердловин на 7%–15%.

При цьому діаметр середнього куска відбитої руди збільшується в абсолютному розмірі з  $D_{cp} = 0,153$  м до  $D_{cp} = 0,18$  м, або в середньому на 16%–18%, а вихід негабаритних кусків руди збільшується з  $B_n = 0,7\%$  до  $B_n = 1,2\%$ , тобто на 0,5% в абсолютному вимірі або на 68%–71% у відносному вимірі.

**Висновки.** Отже, при розрахунку параметрів БВР для зменшення виходу негабаритних кусків руди та діаметра середнього куска відбитої руди відстань між свердловинами доцільно зменшити на величину максимального відхилення свердловин  $\Delta l$  від проєктного контуру, що дозволить зменшити діаметр середнього куска відбитої руди в середньому на 16%–18% та вихід негабаритних кусків руди в середньому на 68%–71% у відносному вимірі.

1. Инструкция по нормированию, прогнозированию и учету показателей извлечения руды из недр при подземной разработке железорудных месторождений / Азарян А. А., Колосов В. А., Моргун А. В., Попов С. О., Ступник Н. И. Кривой Рог : Минерал, 2012. 167 с. 2. Колосов В. А. Повышение качества железорудной продукции и показателей работы шахт на основе совершенствования технологии добычи и переработки : дис. ... д-

ра техн. наук : 05.15.02. Кривой Рог, 2002. 446 с. **3.** Оксанич И. Ф., Миронов П. С. Закономерности дробления горных пород взрывом и прогнозирования гранулометрического состава. М. : Недра, 1982. 166 с. **4.** Капленко Ю. П. Инструкция по выбору параметров БВР при отбойке глубокими скважинами. Кривой Рог : КГРИ, 1977. 52 с. **5.** Терентьев В. И. Управление кусковатостью при поточной технологии добычи руды подземным способом. М. : Наука, 1972. 199 с. **6.** Кутузов Б. Н. Методы ведения взрывных работ. *Разрушение горных пород взрывом*. М. : Горная книга, МГГУ, 2009. Часть 1. 471 с. **7.** Крысин Р. С., Домничев В. Н. Современные взрывчатые вещества местного приготовления. Днепропетровск : Наука и образование, 1998. 140 с.

## REFERENCES:

**1.** Instruktsiya po normirovaniyu, prognozirovaniyu i uchetu pokazateley izvlecheniya rudyi iz nedr pri podzemnoy razrabotke jelezorudnykh mestorojdeniy / Azaryan A. A., Kolosov V. A., Morgun A. V., Popov S. O., Stupnik N. I. Krivoy Rog : Mineral, 2012. 167 s. **2.** Kolosov V. A. Povyishenie kachestva jelezorudnoy produktsii i pokazateley raboty shaht na osnove sovershenstvovaniya tehnologii dobyichi i pererabotki : dis. ... d-ra tehn. nauk : 05.15.02. Krivoy Rog, 2002. 446 s. **3.** Oksanich I. F., Mironov P. S. Zakonomernosti drobleniya gornykh porod vzryivom i prognozirovaniya granulometrcheskogo sostava. M. : Nedra, 1982. 166 s. **4.** Kaplenko Yu. P. Instruktsiya po vyboru parametrov BVR pri otboyke glubokimi skvajinami. Krivoy Rog : KGRI, 1977. 52 s. **5.** Terentev V. I. Upravlenie kuskovatostyu pri potochnoy tehnologii dobyichi rudyi podzemnyim sposobom. M. : Nauka, 1972. 199 s. **6.** Kutuzov B. N. Metody vedeniya vzryivnykh rabot. *Razrushenie gornykh porod vzryivom*. M. : Gornaya kniga, MGGU, 2009. Chast 1. 471 s. **7.** Kryisin R. S., Domnichev V. N. Sovremennyye vzryivchatyye veschestva mestnogo prigotovleniya. Dnepropetrovsk : Nauka i obrazovanie, 1998. 140 s.

---

**Pochtarev A. V., Post-graduate Student, Kalinichenko O. V., Kalinichenko V. O., Doctor of Engineering, Professor** (Kryvyi Rih National University), **Kucheruk M. O., Assistant** (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

## STUDY OF THE INFLUENCE OF WELL DIVISION FROM THE PROJECT CONTOUR ON THE QUALITY OF ORE CRUSHING

**The purpose of this work is to study the effect of borehole**

**deviation from the design contour on the change in the parameters of drilling and blasting operations, especially on the magnitude of the LSS and the distance between the ends of deep wells. This leads to the fact that the distance between the ends of adjacent wells may decrease or increase. An increase in the distance between the ends of the wells will lead to an unpredictable output of oversized pieces of broken ore with subsequent problems arising from this. Reducing the distance between the ends of the wells will lead to an additional output of fine silt fraction, which is also impractical. To analyze the actual state of the drilling and blasting, namely the problem of well deviation during the destruction of deep wells, the schemes of ore breaking by deep wells drilled in the sh. The birthplace of PJSC "Kryvorizkyi zalizorudnyi kombinat" (Kryvyi Rih Iron Ore Plant). The studies carried out made it possible to identify the main patterns of curvature of deep wells and to establish their influence on the quality of ore crushing by explosion.**

***Keywords:* ore; well deviation; drilling and drilling parameters; crushing quality.**

---



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

**Бессараб І. М., аспірант, Подкопаєв Є. С., аспірант (ДВНЗ**  
**«Донецький національний технічний університет», м. Покровськ,**  
**iryna.bessarab@donntu.edu.ua; podkopayev96@gmail.com)**

## **ОЦІНКА СТІЙКОСТІ БІЧНИХ ПОРІД КРУТОГО ВУГІЛЬНОГО ПЛАСТА В МОДЕЛІ ВУГЛЕПОРОДНОГО МАСИВУ З ВИРОБКАМИ**



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

**Визначити умови стійкості бічних порід крутого вугільного пласта в моделі вуглепородного масиву для забезпечення експлуатаційного стану гірничих виробок з урахуванням способу охорони.**

**Для досягнення поставленої мети в роботі виконано аналітичні дослідження з використанням положень класичної механіки і опору матеріалів, в яких покрівля крутого вугільного пласта в моделі вуглепородного масиву з виробками імітувалась у вигляді похилої балки, завантаженої зовнішнім навантаженням та дослідження на моделях із оптичних матеріалів, коли вивчався розподіл дотичних напружень навколо відкотного штреку при різних способах охорони з урахуванням деформаційних особливостей конструкцій, підтримуючих бічні породи.**

**У моделі вуглепородного масиву похила балка, що імітує покрівлю вугільного пласта, розглядалася як основний вантажонесучий елемент. За результатами досліджень визначені умови втрати стійкості вантажонесучого елемента через виникнення згинальних моментів в моделі, яка досліджується. Встановлено вплив жорсткості проміжної опори на величину згинальних моментів в похилій балці. На моделях з оптичних матеріалів встановлений вплив деформаційних характеристик охоронних споруд на розподіл напружень в покрівлі та підшві при різних способах охорони відкотного штреку. Доведено, що для забезпечення умови граничної рівноваги похилої балки, необхідно визначати питання жорсткості проміжних опор з фізико-механічними характеристиками бічних порід. Це дозволить посилити пролітну частину балки по довжині в зоні дії істотних згинальних моментів, що впливають на стійкість вантажонесучого елемента та обмежити його переміщення.**

**Умови стійкості бічних порід у вуглепородному масиві, забезпечуються за рахунок зміни жорсткості охоронних споруд гірничих виробок, що призводить до зниження рівня згинальних моментів при плавному прогині покрівлі.**

**При розробці крутих вугільних пластів, стійкість бічних порід, що визначає експлуатаційний стан виробок і безпеку робіт на виїмковій ділянці вугільної шахти, забезпечується системою піддатливих підтримуючих покрівлю опор, розташованих у виробленому просторі вуглепородного масиву по довжині виїмкової ділянці.**

**Ключові слова:** бічні породи; стійкість; вуглепородний масив; опорний момент; підтримуюча опора; зовнішнє навантаження.

**Вступ.** При експлуатації глибоких вугільних шахт однією з основних проблем є забезпечення стійкості гірничих виробок. Підземні виробки забезпечують підготовку окремих частин шахтного поля і відпрацювання виїмкових ділянок. Незадовільний стан діляничих підготовчих виробок є однією з основних причин зниження безпеки гірничих робіт і ефективності відпрацювання вугільних пластів.

Світовий досвід роботи глибоких шахт показує, що ефективність відпрацювання вугільних пластів значною мірою залежить від способу управління гірничим тиском в очисному вибої і охорони виробок. Водночас при розробці крутих вугільних пластів і традиційному способі управління гірничим тиском повним обваленням покрівлі, кріплення в очисному вибої не здатне протистояти зрушенням товщі, що розшаровується у вуглепородному масиві. Застосовувані способи охорони відкотних штреків ціликами вугілля або кустами з дерев'яних стійок не забезпечують надійного захисту виробок від обвалень бічних порід. Раптовість обвалень бічних порід, що призводить до завалів гірничих виробок, є однією з особливостей експлуатації вугільних шахт на великих глибинах, особливо в умовах крутого залягання вугільних пластів.

В реальних умовах розробки крутих вугільних пластів, після розшарування вуглепородної товщі, небезпека виникнення аварійних ситуацій виходить від обвалень порід покрівлі. Щоб уникнути обвалень бічних порід на виїмкових ділянках вугільної шахти і для забезпечення експлуатаційного стану гірничих виробок, доцільно використовувати охоронні споруди, зміна жорсткості яких



дозволить обмежити переміщення бічних порід у виробленому просторі і звести до мінімуму небезпечні прояви гірничого тиску у вуглепородному масиві.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Аналіз відомих досліджень показує, що прояви гірничого тиску у вуглепородному масиві, що вміщає виробки, залежать від сукупного впливу багатьох чинників, до яких першочергово слід відносити напружений стан бічних порід і їх фізико-механічні властивості [1, С. 58; 2, С. 46; 3, С. 328]. Вважається, що серед основних причин обвалень бічних порід є їх розшарування і вплив згинаючих моментів зависаючої покрівлі над виробленим простором виїмкової дільниці [4, С. 30]. Шаруватість вуглепородного масиву слід розглядати як фактор, що послаблює породу, від якого залежить стійкість гірничих виробок [5, С. 28].

Досвід роботи шахт з крутим заляганням вугільних пластів вказує на те, що невідповідність застосовуваних способів управління гірничим тиском і охорони виробок гірничо-геологічним умовам розроблюваного пласта змінює геомеханічну ситуацію у вуглепородному масиві. Негативні наслідки такої зміни проявляються в тому, що покрівля вугільного пласта, не маючи достатнього підпору у виробленому просторі, руйнується і неконтрольовано переміщується в сторону очисної виробки і відкотного штреку, створюючи аварійні ситуації на виїмковій дільниці [6, С. 72].

Вуглепородний масив як масив осадових гірничих порід має характерну особливість міцнісної анізотропії [7, С. 102]. В умовах крутого залягання вугільних пластів ця властивість проявляється в зміні стійкості бічних порід як в напрямку простягання пласта, так і по висоті поверху [8, С. 7]. Після виїмки вугілля відбувається деформація вуглепородного масиву і зміна напруженого стану бічних порід. Породи покрівлі і підшви розбиваються на блоки і обвалюються [9, С. 12]. Вивчення механізму взаємодії балочної або блокової структури розшарованих порід покрівлі при традиційних способах управління гірничим тиском показує, що без ефективної підтримки нависаючої товщі дбати про експлуатаційний стан виробок на виїмковій дільниці неможливо [4, С. 112; 10, С. 251].

Для успішного вирішення цієї проблеми, необхідно оцінити стійкість бічних порід при різних способах управління гірничим тиском з урахуванням жорсткості підтримуючих опор, які виконують роль охоронних споруд. Облік деформаційних характеристик

охоронних споруд дозволить визначити параметри вантажонесучих конструкцій, при використанні яких можливе обмеження переміщень товщі, яка розшаровується у виробленому просторі вуглепородного масиву.

**Постановка задач досліджень.** Оцінити стійкість бічних порід крутого вугільного пласта на моделі похилої балки, завантаженої зовнішнім навантаженням, та напружений стан вуглепородного масиву при різних способах охорони відкатного штреку, з урахуванням деформаційних властивостей охоронних споруд.

**Матеріали і результати досліджень.** Теоретичні моделі. У цьому дослідженні визначені умови стійкості покрівлі крутого вугільного пласта при дії зовнішнього навантаження. Відповідно до гіпотези балок [3, С. 301] вважаємо, що у вуглепородному масиві, який вміщує виробки, покрівля деформується і руйнується подібно балкам. Окремі породні блоки розшарованої покрівлі, можуть працювати як шарніри [2, С. 112; 11, С. 251].

На рис. 1 представлена схема моделі вуглепородного масиву, який вміщує виробки для визначення стійкості порід покрівлі крутого вугільного пласта на виїмковій дільниці вугільної шахти.

Використовуючи загальну схему вуглепородного масиву з виробками (рис. 1, а), розглянемо покрівлю вугільного пласта у вигляді моделі балки довжиною  $L$  (м) з шарнірними опорами А і В. Вісь  $X$  розташована вздовж осі балки, вісь  $Y$  – перпендикулярно. Балка має кут нахилу  $\alpha$  (град.) і завантажена рівномірно розподіленим навантаженням  $q \left( \frac{H}{M} \right)$  (рис. 1, б). Опорні реакції для модельованої балки визначаються з умов рівноваги [14, С. 260]. Досліджувана система є симетричною. Виходячи з цього, кожна опора сприймає на себе половину активного навантаження балки, а значить

$$R_A = R_B = \frac{q_y L}{2} = \frac{q \cos \alpha L}{2}. \quad (1)$$

Вважаємо  $q_y = q \cos \alpha$ .

Балка має одну силову ділянку  $0 \leq x \leq L$ . Використовуючи відомі вирази [14, С. 192–198], визначимо поперечну силу  $Q$  (Н) і згинаючий момент  $M$  ( $H \cdot m$ )

$$Q(x) = R_A - q_y x = \frac{q_y L}{2} - q_y x. \quad (2)$$

$$M(x) = R_A x - q_y x \frac{x}{2} = q_y x \left( \frac{L}{2} - \frac{x}{2} \right). \quad (3)$$

Вираз (2) є рівнянням прямої лінії і тоді

$$Q_{x=0} = \frac{q_y L}{2} \text{ і } Q_{x=L} = -\frac{q_y L}{2}.$$

Вираз (3) відповідає параболі. Для побудови параболи необхідно знати положення і значення екстремуму [14, С. 262; 15, С. 302]. Положення екстремума отримаємо за умови

$$\frac{dM(x)}{dx} = \frac{q_y L}{2} - q_y x = 0,$$

звідки  $x = \frac{L}{2}$ .

Тоді, максимальне значення згинаючого моменту буде в середині прольоту модельованої балки

$$M(x) = \frac{q_y L^2}{8}.$$

З урахуванням умови (1)

$$M(x) = \frac{qL^2 \cos \alpha}{8}.$$

Значення  $M(x)$  на початку і кінці силової ділянки  $0 \leq x \leq L$  дорівнює

$$M_{x=0} = 0; \quad M_{x=L} = 0.$$

Для того, щоб забезпечити стійкий стан балки, в середині прольоту слід розмістити опору D. Відстань між опорами позначимо через  $l$  (м). Розглянемо покрівлю вугільного пласта у вигляді моделі балки АВ довжиною  $2l$  (м). Балка має кут нахилу  $\alpha$  (град.). В середині прольоту знаходиться опора D, тоді  $AD = DB = l$  (м). Балка завантажена рівномірно розподіленим навантаженням  $q \left( \frac{H}{m} \right)$  (рис. 1, в).

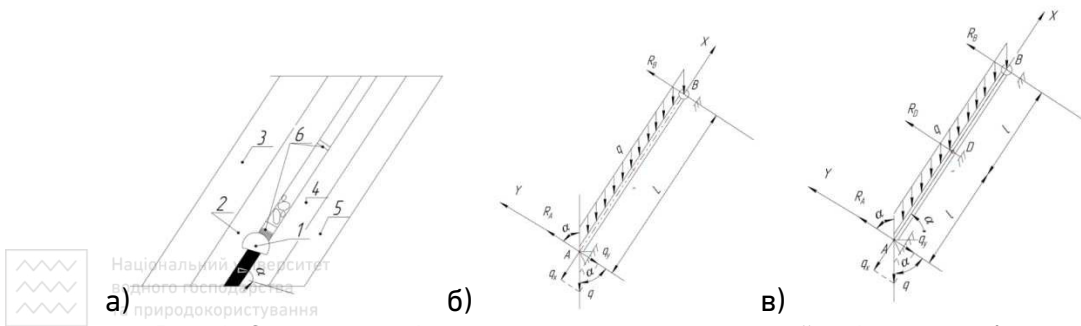


Рис. 1. Схема моделі вуглепородного масиву, який вміщує виробки:  
а) загальна схема; б) схема моделі балки для розрахунку стійкості покрівлі;  
в) з опорою в середині прольоту: 1 – відкотний штрек; 2 – безпосередня покрівля; 3 – основна покрівля; 4 – безпосередня підшова; 5 – основна підшова; 6 – опори для підтримання покрівлі;  $\alpha$  – кут падіння пласта або нахилу балки, град.;  $L$  – похила довжина балки, м;  $l$  – відстань між прольотами, м;  $q$  – рівномірно розподілене навантаження,  $\frac{H}{M}$ ;  
 $A, B, D$  – опори балки;  $R_A, R_B, R_D$  – реакції опор (Н)

Досліджувана балка один раз статично невизначена. Вважаємо, що прогин над опорою  $D$  дорівнює нулю. Використовуючи принцип незалежності дії сил [12, С. 401; 13, С. 154] прогин  $y_D$  (м) можна представити як суму переміщень від розподіленого навантаження  $y_q$  (м) і зосередженої сили  $y_R$  (м) виразом

$$y_D = y_q - y_R = 0. \quad (4)$$

Використовуючи відомі рішення [12, С. 406; 15, С. 326], маємо

$$y_q = \frac{5}{384} \cdot \frac{q_y l^4}{EI_x} \quad (5)$$

і

$$y_R = \frac{1}{48} \cdot \frac{R_D l^3}{EI_x}. \quad (6)$$

Тоді з урахуванням (5) і (6)

$$y_D = \frac{5q_y l^4}{384EI_x} - \frac{R_D l^3}{48EI_x} = 0 \quad (7)$$

звідки

$$R_D = \frac{5}{8} q_y l. \quad (8)$$

Складемо рівняння рівноваги досліджуваної системи

$$R_A + R_B + R_D - q_y l = 0. \quad (9)$$

Після перетворень виразу (9), з урахуванням рекомендацій [14, С. 184; 15, С. 260], отримаємо такий вираз

$$R_A = R_B = \frac{3}{8} q_y l. \quad (10)$$

Для досліджуваної моделі додатковою невідомою буде опорний момент  $M_D$  ( $H \cdot m$ ). Скористаємося рівнянням трьох моментів [12, С. 302; 15, С. 191] та отримаємо

$$2M_D \cdot 2l = 6 \frac{q_y l^3}{12},$$

звідки

$$M_D = \frac{q_y l^2}{8}. \quad (11)$$

Поперечна сила  $Q$  (Н) і згинаючий момент  $M$  ( $H \cdot m$ ) для лівого прольоту визначається за виразами

$$\begin{aligned} Q(x) &= R_A - q_y x; \\ M(x) &= \left( R_A x - \frac{q_y x^2}{2} \right). \end{aligned} \quad (12)$$

Для правого прольоту рішення аналогічне.

При  $Q(x)=0$ , тобто коли  $x = \frac{3}{8} l$ , моменти будуть мати найбільше значення

$$M_{\max} = \frac{9}{128} q_y l^2. \quad (13)$$

З урахуванням умови (1)

$$M_{\max} = \frac{9}{128} q \cos \alpha l^2.$$

Очевидним є те, що найбільшим за абсолютною величиною буде згинаючий момент над жорсткою опорою D.

Розглянемо балку довжиною  $2l$  (м), яка в середині прольоту має опору піддатливу D, жорсткість якої  $C \left( \frac{H}{m} \right)$  (рис. 1, в). Значення додаткового невідомого  $X_D$  ( $H \cdot m$ ) визначимо з канонічного рівняння [16, С. 74; 17, С. 21]

$$\delta_{11} \cdot X_1 + \Delta_{10} = 0,$$

або

$$\delta_{D1} \cdot X_D + \Delta_{DA} = 0,$$

коли

$$X_D = -\frac{\Delta_{DA}}{\delta_{D1}}, \quad (14)$$

де  $\Delta_{10} = \Delta_{DA}$  – вантажний коефіцієнт;

$\delta_{11} = \delta_{D1}$  – одиничний коефіцієнт.

Визначимо значення одиничного коефіцієнта  $\delta_{D1}$ . На рис. 2 представлена розрахункова схема похилої балки для визначення  $\delta_{D1}$ . У цій схемі одиничний коефіцієнт  $\delta_{D1}$  дорівнює сумі взаємних кутів повороту  $\psi_x$  і  $\psi_y$  від згину над опорою D суміжних перетинів балки і переміщення опори в основній системі, навантаженої моментом  $X_D=1$  (рис. 2, а).

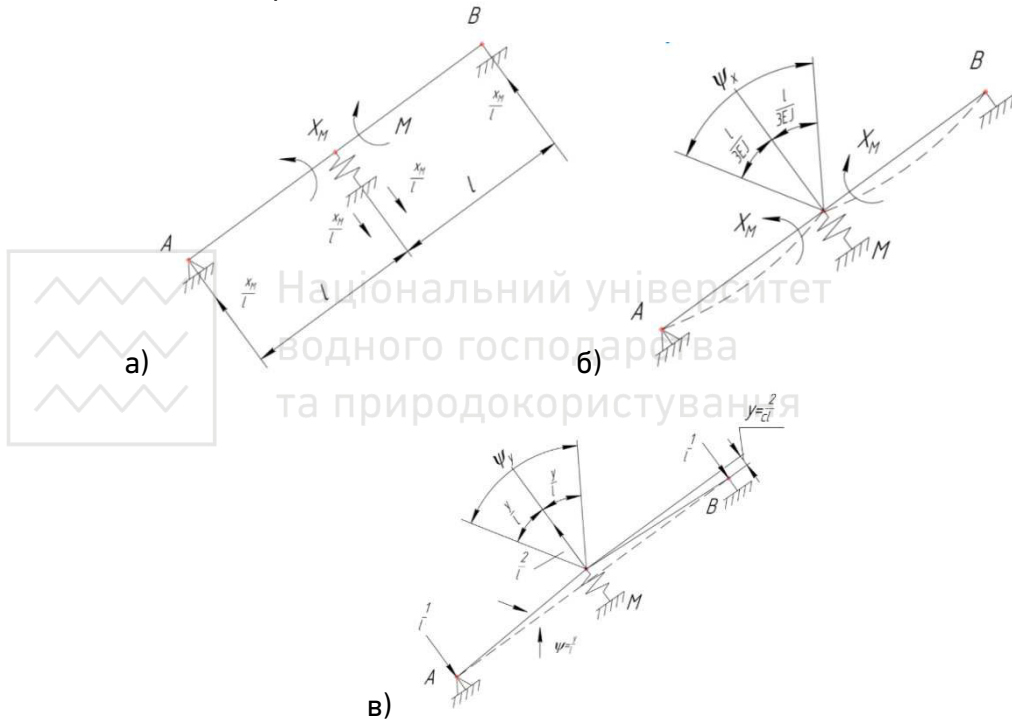


Рис. 2. Розрахункова схема похилої балки для визначення одиничного коефіцієнта  $\delta_{D1}$ :  $\psi_x, \psi_y$  – кути повороту суміжних перетинів балки над опорою D від згину балки: а) основна система; б, в) допоміжна система:  $\bar{y}$  – переміщення опори в основній системі, навантаженої моментом  $X_D$ ,  $l$  – відстань між опорами, м

Відповідно до викладеного

$$\delta_{D1} = \psi_x + \psi_y \quad (15)$$

причому, використовуючи рис. 2, б

$$\psi_m = \sum \int \frac{M_m(z)M_m(z)dz}{EI} = \frac{1}{2} \cdot l \cdot \frac{2}{3} \cdot 2 \cdot \frac{1}{EI} = \frac{2l}{3EI} \quad (16)$$

і рис. 2, в

$$\psi_y = \frac{2\bar{y}}{l} = 2 \cdot \frac{2}{cl^2} = \frac{4}{cl^2}. \quad (17)$$

Отже,

$$\delta_{D1} = \frac{2l}{3EI} + \frac{4}{cl^2}. \quad (18)$$

Визначимо значення вантажного коефіцієнта  $\Delta_{DA}$ . На рис. 3 представлена розрахункова схема похилої балки для визначення коефіцієнта  $\Delta_{DA}$ . У цій схемі вантажний коефіцієнт  $\Delta_{DA}$  дорівнює сумі взаємних кутів повороту суміжних перетинів над опорою D при завантаженні основної системи зовнішнього навантаження (рис. 3, а).

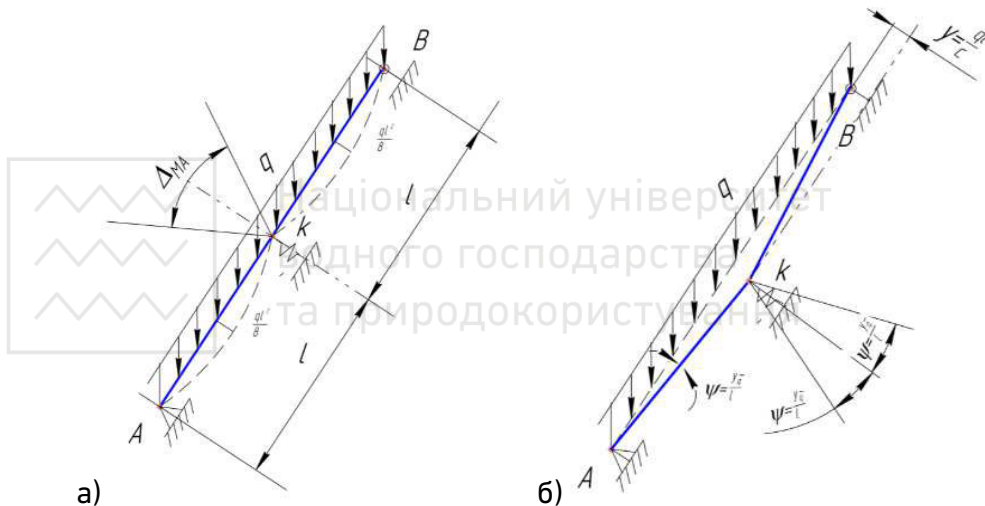


Рис. 3. Розрахункова схема похилої балки для визначення вантажного коефіцієнта  $\Delta_{DA}$  а) основна система; б) допоміжна система:

$$\frac{q_y l^2}{8} - \text{згинаючий момент, } H \cdot m; q - \text{рівномірно розподілене}$$

навантаження,  $\left(\frac{H}{m}\right)$ ;  $l$  – довжина прольоту, м;  $y$  – переміщення опори, м;

$\psi$  – кут повороту

Відповідно до викладеного

$$\Delta_{DA} = \Delta_{DA}^{изз.} + \Delta_{DA}^{\mathcal{K}}. \quad (19)$$

Визначимо значення вантажного коефіцієнта  $\Delta_{DA}^{изз.}$  при згині

$$\Delta_{DA}^{изз.} = 2 \cdot \int_0^l \frac{M(z)M_M(z)dz}{EI} = 2 \left( \frac{2}{3} \cdot \frac{q_y l^2}{8} \cdot l \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{EI} \right) = \frac{q_y l^3}{12EI}. \quad (20)$$



Національний університет  
водного  
та природокористування

Значення вантажного коефіцієнта  $\Delta_{DA}^{\mathcal{K}}$  з урахуванням жорсткості опори (рис. 3, б) визначається як

$$\Delta_{DA}^{\mathcal{K}} = -\frac{2y_q}{l} = -\frac{2q_y l}{cl} = -\frac{2q_y}{c}. \quad (21)$$

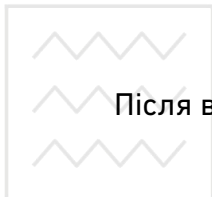
Тоді

$$\Delta_{DA} = \frac{q_y l^3}{12EI} - \frac{2q_y}{c}. \quad (22)$$

Визначимо значення додаткового невідомого  $X_D$  ( $H \cdot m$ ) в канонічному рівнянні (14).

З урахуванням отриманих виразів

$$X_D = \frac{\frac{q_y l^3}{12EI} - \frac{2q_y}{c}}{\frac{2l}{3EI} + \frac{4}{cl^2}} = \frac{\frac{q_y l^2}{l^3 c} \cdot \left( \frac{l^3 c}{l^3 c} - \frac{24EI}{l^3 c} \right)}{\frac{8}{l^3 c} \cdot \left( \frac{l^3 c}{l^3 c} + \frac{6EI}{l^3 c} \right)}. \quad (23)$$



Після відповідних перетворень

$$X_D = \frac{\frac{q_y l^2}{8} \left( 1 - \frac{24EI}{cl^3} \right)}{1 + \frac{6EI}{cl^3}}, \quad (24)$$

де  $l$  – момент інерції площі поперечного перетину,  $m^4$ .

Враховуючи згинальну жорсткість ( $EI$ ) модельованою балки певної довжини  $l$  ( $m$ ), а також жорсткість  $c \left( \frac{H}{m} \right)$  опори  $D$ , введемо безрозмірний коефіцієнт  $k$ , що дорівнює відношенню [17, С. 20]

$$k = \frac{EI}{cl^3}. \quad (25)$$

Тоді вираз (24) можна записати у вигляді



$$X_D = \frac{1 - 24k}{8 + 48k} \cdot q_y l^2. \quad (26)$$

Позначимо множник у виразі (26) через  $n$  і отримаємо

$$n = \frac{1 - 24k}{8 + 48k}. \quad (27)$$

Залежно від коефіцієнта  $k$ , значення множника  $n$  можуть змінюватися так само, як і значення опорного моменту  $X_D$  ( $H \cdot м$ ).

В табл. 1 приведено значення множника  $n$  і опорного моменту  $X_D$  ( $H \cdot м$ ) при різних значеннях коефіцієнта  $k$ .

Таблиця 1

Результати розрахунку множника  $n$  і опорного моменту  $X_D$  при різних значеннях  $k$

Коефіцієнт $k$	Множник $n$	Опорний згинаючий момент $X_D$ ( $H \cdot м$ ),
0	-0,12	$0,12 q_y l^2 \cos \alpha$
0,1	- 0,1	$- 0,10 q_y l^2 \cos \alpha$
0,5	-0,3	$- 0,3 q_y l^2 \cos \alpha$
1,0	-0,4	$- 0,4 q_y l^2 \cos \alpha$

На рис. 4 представлено епюри згинальних моментів для модельованої балки при різних значеннях коефіцієнта  $k$  в межах силової ділянки.

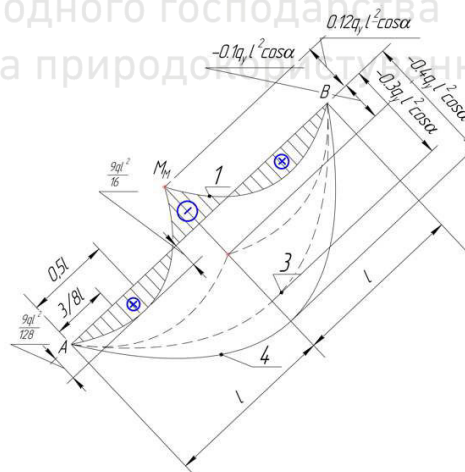


Рис. 4. Епюри згинальних опорних моментів  $M$  ( $H \cdot м$ ) для модельованої балки при різних значеннях коефіцієнта  $k$ :  
1-  $k=0$ ; 2-  $k=0,1$ ; 3-  $k=0,5$ ; 4-  $k=1,0$

Отримані епюри наочно показують вплив зміни коефіцієнта  $k$  на величину згинального опорного моменту  $X_D$  ( $H \cdot m$ ) в перетинах модельованої балки (рис. 4).

На рис. 5 наведено графіки зміни згинального опорного моменту  $X_D$  ( $H \cdot m$ ) при різних значеннях коефіцієнта  $k$ .

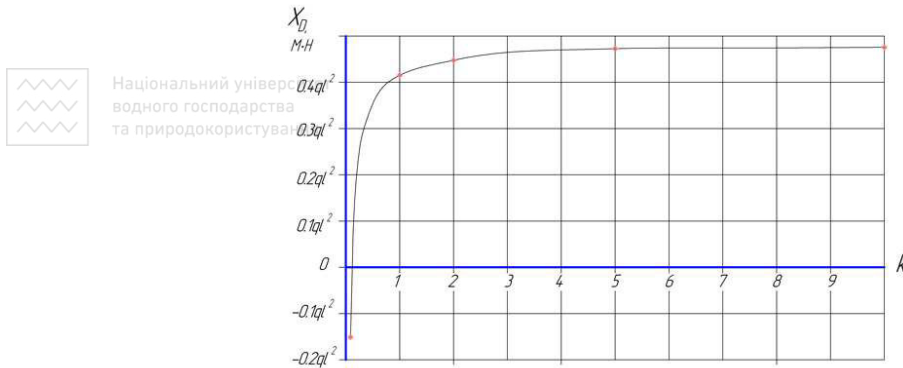


Рис. 5. Графік зміни згинального опорного моменту  $X_D$  ( $H \cdot m$ ) при різних значеннях коефіцієнта  $k$

З графіка видно, що зі збільшенням коефіцієнта  $k$  значення згинального опорного моменту  $X_D$  збільшуються по гіперболічній залежності. Причому при  $k=2,0 - 10,0$ , величина згинального опорного моменту знаходиться в інтервалі значень  $(0,4 - 0,48) q_l^2$  (рис. 5).

Експериментальні моделі. Дослідження виконувалися в лабораторії гірничого тиску ДонНТУ на експериментальних моделях з оптичних матеріалів<sup>1</sup>. Мета лабораторних досліджень полягала у визначенні вихідної якісної картини розподілу дотичних напружень в вуглепородному масиві з виробками після виїмки вугілля при різних способах охорони відкатного штреку, з урахуванням деформаційних особливостей охоронних споруд.

Теоретичні основи моделювання методом фотопружності викладено в працях низки дослідників [18, С. 70; 19, С. 54].

Для проведення експериментів були виготовлені оптичні моделі з ігданіта (склад матеріалу: гліцерин – 30%, желатин – 25%, вода – 45%). Розміри моделі: 300 × 300 мм, товщина 20 мм, геометричний масштаб 1:100. Моделі імітували пластовий штрек з різними способами охорони: ціликами вугілля, накатними кострами

<sup>1</sup> В дослідженнях приймали участь асп. Каюн О.П., Бойченко Г.Є.

зі шпал або закладання виробленого простору. Критерії подібності, пружні і оптичні константи моделей, визначені відповідно до методики, розробленої в ІГС ім. О. О. Скочинського [18, С. 70]. Характеристики оптичних моделей, представлені в табл. 2. Модуль пружності закладного матеріалу бутової смуги прийнятий відповідно до [20, С. 44]. Дослідження моделей здійснювалося на поляризаційній установці ППУ-4 відомим способом зіставлення кольорів і смуг розподілу дотичних напружень [19, С. 54]. Всього було відібрано 9 моделей. Розподіл напружень вивчався в межах відкатного штреку, пройденого по вугільному пласту потужністю  $m=1,0$  м. Штрек аркової форми (висота 2,5 м, ширина 2,5 м). Дослідження проводилося на моделях з шарами, які розглядалися як безпосередня і основна покрівля і підшва вугільного пласта, потужність яких відповідала 2 м і 4 м, де  $m$  – потужність пласта, м. При моделюванні імітували спосіб управління покрівлею повним обваленням. Відкатний штрек охороняли ціликами вугілля, дерев'яними кострами зі шпал та закладанням виробленого простору. Дерев'яні костри зі шпал, які зводяться над штреком, мали усадку до 50% і моделювалися поролоном, просоченим парафіном. Закладання виробленого простору з подрібленої породи, яка мала усадку до 30% у вигляді надштрекової смуги, моделювалася поролоном (з урахуванням просочення парафіном). Вугільний цілик над штреком представляв жорстке охоронне спорудження. Модель завантажувалася за схемою, в якій вертикальне навантаження відповідало глибині  $H=1200$  м, а горизонтальне навантаження створювалося відсіччю бічних стінок моделі. Кут падіння пласта  $\alpha = 60^\circ$ .

Таблиця 2

## Характеристика оптичних моделей

Найменування	Матеріал	Модуль пружності E, МПа
покрівля, підшва	модель	0,125
	натура	12500
вугільний пласт, охоронний цілик	модель	0,09
	натура	9000
дерев'яний костер	модель	0,006
	натура	600
закладний масив	модель	0,005
	натура	500

При аналізі статичного поля дотичних напружень в вуглепородному масиві вважалось, що об'ємний напружений стан бічних порід в міру віддалення від контуру виробки змінюється від стану, близького до узагальненого розтягування, до узагальненого стискання в глибині масиву [21, С. 56].

На рис. 6, а, б, в представлені схеми моделі статичного поля дотичних напружень у вуглепородному масиві при охороні відкатного штреку а) ціликами вугілля, б) дерев'яними кострами зі шпал, в) закладанням виробленого простору.



Аналіз статичного поля напружень в моделях вказує на те, що при охороні пластового відкатного штреку ціликами вугілля висотою  $h=8$ , маємо максимальну концентрацію напружень в бічних породах і навколо відкатного штреку (рис. 6, а). Використання ціликів вугілля для охорони відкатних штреків супроводжується їх інтенсивним силовим обігруванням з боку покрівлі і підшви вугільного пласта. Вивчення модельних картин розподілу напружень навколо відкатного штреку при охороні ціликами вугілля показує, що в усіх випадках дотичні напруження концентруються біля контуру виробки і верхньої межі цілика, в місці згину порід покрівлі і підшви пласта.

При охороні дільничої підготовчої виробки дерев'яними кострами зі шпал, які розміщуються над відкатним штреком, в бічних породах помітно знижується концентрація напружень, в порівнянні з охоронною ціликами вугілля (рис. 6, а, б).

З аналізу моделей випливає, що негативні прояви гірничого тиску навколо підготовчих виробок зводяться до мінімуму при використанні в якості охоронних споруд піддатливих опор (рис. 6, б, в). Це відбувається за рахунок плавного прогину покрівлі на площі контакту охоронних споруд з покрівлею і підшвою вугільного пласта.

На рис. 6 в зображена схема моделі статичного поля дотичних напружень навколо відкатного штреку при способі управління покрівлею в очисному вибої закладанням виробленого простору. В цьому випадку відкатний штрек охороняється широкою смугою з породи.

Експериментальні дані вказують на те, що використання закладання виробленого простору для підтримки бічних порід, знижує концентрацію напружень в вуглепородному масиві і навколо відкатного штреку, в порівнянні з охороною ціликами вугілля. Очевидним є те, що розміщення закладного масиву по всій довжині

відпрацьованої частини лави, у вигляді податливої смуги над штреком, забезпечує плавний прогин бічних порід. Перерозподіл напруження на контакті порід покрівлі та підшви із закладним масивом відбувається за рахунок збільшення площі фактичного дотику осідаючих порід з охоронним спорудженням (рис. 6, б, в).

Вважається [21, С. 59], що утворення зон концентрації напружень, варіації їх розмірів та зміна напружено-деформованого стану бічних порід залежить від жорсткості піддатливих охоронних споруд. Ступінь впливу жорсткості ціликів або піддатливих охоронних споруд, розташованих над штреком, з урахуванням їх розмірів на зміну напружено-деформованого стану бічних порід, пропонується оцінювати коефіцієнтом  $k$  за виразом (25).

Жорсткість охоронних споруд визначали за виразом [12, С. 201]

$$c = \frac{E \cdot S}{h}, \quad (28)$$

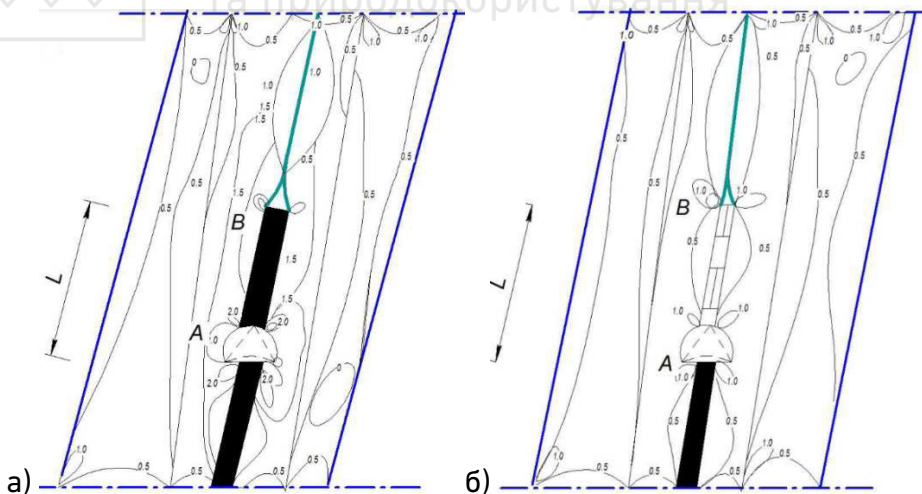
де  $E$  – модуль пружності охоронного спорудження,  $\frac{H}{M^2}$ ;

$S$  – площа поперечного перетину охоронної споруди,  $M^2$ ;

$h$  – висота, м.

З урахуванням експериментальних даних табл. 2, отримано значення коефіцієнта  $k$  (табл. 3). За даними табл. 3 побудовано

графік зміни коефіцієнта  $k$  від жорсткості  $c \left( \frac{H}{M} \right)$  охоронних споруд (рис. 7).



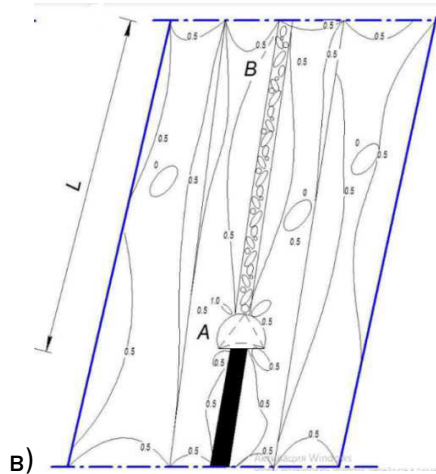


Рис. 6. Схема моделі статичного поля дотичних напружень у вуглепородному масиві при способі охорони відкатного штреку: а) ціликами вугілля; б) кострами з дерев'яних шпал; в) закладанням виробленого простору:  $L$  – довжина ділянки АВ у покрівлі, яка підтримується охоронним спорудженням, м

Таблиця 3

Результати розрахунку коефіцієнта  $k$  у моделі вуглепородного масиву з підготовчими виробками

Способи охорони	$h$ , м	$c$ , Н/м	$L$ , м	$k$
цілики вугілля	0,01	14400	0,08	0,00017
дерев'яні костри	0,01	960	0,08	0,0025
закладний масив	0,01	1600	0,16	0,0002

З рис. 7 видно, що зі збільшенням жорсткості охоронних споруд, значення коефіцієнта  $k$  зменшується.

При викладені результатів досліджень слід зазначити, що при розкритті статичної невизначеності модельованої балки з проміжною опорою в середині прольоту, за додаткову невідому приймалися опорні моменти [12, С. 312; 13, С. 164]. Таким методичним прийомом вдалося скоротити кількість невідомих в одному рівнянні при будь-якому ступені статичної невизначеності модельованої балки і встановити вплив жорсткості проміжної опори на величину опорних моментів.

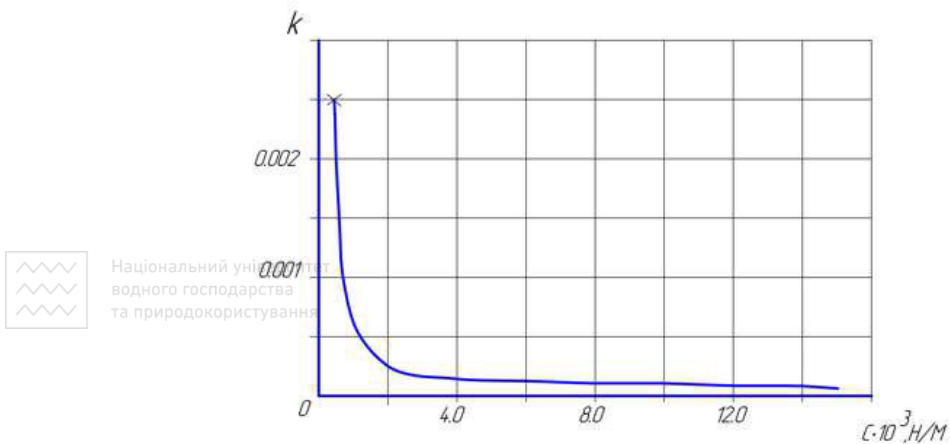


Рис. 7. Графік зміни коефіцієнта  $k$  від жорсткості  $c \left( \frac{H}{M} \right)$  охоронних споруд в моделі вуглепородного масиву з виробками

### Обговорення результатів дослідження

Проведені дослідження дозволили оцінити стійкість бічних порід крутого вугільного пласта у вуглепородному масиві, що вміщає виробки на моделі похилої балки, завантаженої зовнішнім навантаженням та на моделях із оптичних матеріалів при різних способах охорони відкратного штреку, з урахуванням деформаційних властивостей охоронних споруд (рис. 1, 6). Встановлено, що наявність жорсткої проміжної опори в шарнірній двопрогоновій балці з рівномірно розподіленим навантаженням сприяє виникненню розтягуючих зусиль на середній опорі. В цьому випадку двопрогінну балку з рівними прольотами можна розглядати як дві однопрогонові балки, у яких одна опора шарнірна (опора А чи В), а друга – має жорстке защемлення (опора D).

При моделюванні стійкості нерозрізних несучих балок постійного перерізу, що згинаються в одній площині і статичних навантаженнях, рівновагу модельованого вантажонесучого елемента оцінювали з урахуванням перерозподілу опорних і прогонних моментів. Визначено умови виникнення згинальних моментів в похилій балці з проміжною опорою. Встановлені умови виникнення граничної рівноваги балки, що моделюється під дією зовнішнього навантаження (рис. 1, 2, 3, 4, табл. 1, рис. 5).

На моделях з оптичних матеріалів (рис. 6, а, б, в) встановлений вплив жорсткості охоронних споруд підготовчої виробки на характер розподілу напружень у вуглепородному масиві. Негативні прояви гірничого тиску в породах покрівлі, підшви і на контурі виробки зводяться до мінімуму при охороні відкатного штреку закладанням виробленого простору (рис. 6, в). Шляхом порівняння вихідних якісних картин розподілу дотичних напружень в моделі вуглепородного масиву з виробками, (рис. 6, а, б, в) встановлені значення коефіцієнта  $k$  (вир. 25, табл. 3). Величина коефіцієнта  $k$  залежить від  $L$  (м) довжини ділянки АВ в породах покрівлі (рис. 6, а, б, в), (вир. 28, табл. 3) і жорсткості вантажонесучої охоронних споруд  $c \left( \frac{H}{m} \right)$  (вир. 28, табл. 3).

При збільшенні  $L$  (м) та урахуванні зміни жорсткості охоронних споруд гірничих виробок, коли відбувається плавний прогин бічних порід у моделі вуглепородного масиву, фіксується зменшення концентрації напружень навколо відкатного штреку, величини згинаючих моментів у покрівлі та коефіцієнту  $k$  (рис. 6, вир. 25). Зіставлення рівня згинальних моментів для найбільш несприятливих умов завантаження балки при розподіленому навантаженні показало, що забезпечуючи плавну передачу навантаження на вантажонесучу опору, з урахуванням її розмірів, за рахунок зміни її жорсткості, можна досягти зниження рівня згинальних моментів і запобігти небезпеці руйнувань покрівлі, а також обмежити переміщення вантажонесучого елемента.

Таким чином, в результаті виконаних досліджень встановлено вплив жорсткості підтримуючих опор на величину опорних моментів, що проявляються у виробленому просторі вуглепородного масиву при зависанні покрівлі. При виборі способу управління гірничим тиском в очисному вибої і типу підтримуючих опор слід враховувати жорсткість охоронних споруд та фізико-механічні характеристики бічних порід. Це дозволить, при правильному співвідношенні згинальної жорсткості бічних порід до жорсткості охоронних споруд гірничих виробок, посилити прогонну частину покрівлі по висоті поверху в зоні дії згинальних моментів, після розшарування нависаючої товщі у вуглепородному масиві. При розробці крутих вугільних пластів стійкість покрівлі забезпечується системою підтримуючих опор, розташованих у виробленому просторі виїмкової



дільниці вугільної шахти.

**Висновок.** З метою збереження цілісності бічних порід у вуглепородному масиві і забезпечення експлуатаційного стану гірничих виробок на виїмкових дільницях вугільної шахти з крутим заляганням пластів, доцільне застосування системи охоронних піддатливих підтримуючих опор, розташованих у виробленому просторі. Наявність таких охоронних споруд підсилює прогонну частину покрівлі по падінню пласта і сприяє стійкості бічних порід позаду очисного вибою по довжині виїмкової дільниці. Для досягнення максимального ефекту використання підтримуючих опор, необхідно визначати питання їх жорсткості з фізико-механічними властивостями бічних порід, що дозволить обмежити руйнування та зміщення покрівлі, запобігти небезпеці обвалень і забезпечити стійкість відкатних штреків.

1. Николин В. И., Подкопаев С. В., Малеев Н. В., Агафонов А. В. Снижение травматизма от проявлений горного давления. Донецк : Норд Пресс, 2005. 324 с.
2. Руппенейт К. В., Либерман Ю. М. Введение в механику горных пород. Москва : Госгортехиздат, 1960. 355 с.
3. Шашенко А. Н., Пустовойтенко В. П., Сдвижкова Е. А. Геомеханика. Киев : Новый друк, 2016. 528 с.
4. S. Podkopaiev, V. Gogo, I. Yefremov, O. Kirko, I. Iordanov, Yu. Simonova. Phenomena of stability of the coal seam roof with a yielding support. *Mining of Mineral Deposits*. 2019. Vol. 13, Issue 4. Pp. 28–41. URL: <https://doi.org/10.33271/mining13.04.028> (дата звернення: 12.02.2022).
5. Кошелев К. В., Петренко Ю. А., Новиков А. О. Охрана и ремонт горных выработок. М. : Недра, 1990. 256 с.
6. Викторов С. Д., Гончаров С. А., Иофис М. А., Закалинский В. М. Механика сдвижения и разрушения горных пород. М. : РАН, 2019. 360 с. ISBN 978-5-907036-13-0.
7. Вахромеев С. А. Месторождения полезных ископаемых, их классификация и условия образования. М. : Недра, 1979. 288 с.
8. Жуков В. Е. Об одной стратегической ошибке в разрешении проблемы разработки крутых пластов. *Уголь Украины*. 2001. № 7. С. 6–10.
9. Чепіга Д. А. Обґрунтування та розробка способів підвищення безпеки праці гірників у виїмкових дільницях глибоких шахт : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.26.01 / ДВНЗ «ДонНТУ». Покровськ, 2019. 24 с.
10. Подкопаев С. В., Гого В. Б., Ефремов И. А., Иорданов И. В., Носач А. К., Симонова Ю. И. Моделирование устойчивости кровли угольного пласта с податливой опорой различной жесткости. *Вісті Донецького гірничого інституту*. 2019. № 1(44). С. 7–22.
11. Якоби О. Практика управления горным давлением. М. : Недра, 1987. 566 с.
12. Феодосьев В. И. Сопrotивление материалов : учебник для вузов. 10-е изд., перераб. и доп. Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1999.

Т. 2. 592 с. **13.** Timoshenko S., Woinowsky-Krieger S. Theory of Plates and Shells. 2nd edition. New York : McGraw-Hill, 1959. 580 p. **14.** Писаренко Г. С., Квітка О. Л., Уманський Е. С. Опір матеріалів : підручник / за ред. Г. С. Писаренка. Київ : Вища школа, 1993. 655 с. **15.** Reddy J. N. Theory and Analysis of Elastic Plates and Shells. 2nd Edition. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2007. 547 p. **16.** Шакирзянов Р. А., Шакирзянов Ф. Р. Динамика и устойчивость сооружений. Казань : Изд-во Казанс. гос. архит.-стр. ун-та, 2005. 120 с. **17.** A. Korol. The influence of the rigidity of mining security structures on the stability of side rocks in the coal rock massif. *Technology audit and production reserves*. 2021. № 3 / 1 (59). Pp. 19–22. doi: 10.15587/2706–5448.2021.235403. **18.** Хаимова-Малкова Р. И. Метод исследования напряжений поляризационно-оптическим методом. М. : Наука, 1970. 194 с. **19.** Методические указания по изготовлению моделей из оптических чувств для исследований горного давления. Л. : ВНИМИ, 1970. 180 с. **20.** Соцков В. А., Деревягина Н. И. Определение рациональных параметров закладки выработанного пространства при селективной добыче угля. *Збірник наукових праць Націон. гірн. ун-ту*. 2019. № 59–04. С. 43–54. URL: <https://doi.org/10.3327/crnpnu.59.043> (дата звернення: 12.02.2022). **21.** Баклашов И. В. Деформируемость и разрушение массивов. М. : Недра, 1988. 271 с. **22.** Гого В. Б., Кипко А. Е., Власенко Н. Н., Симонова Ю. И., Подкопаев Е. С. Особенности напряженно деформированного состояния боковых пород в оценке эксплуатационного состояния горных выработок. *Вестник Донецкого горного института*. 2019. № 1. С. 53–64. DOI: 10.31474/1999-981X-2019-1-53-64.

## REFERENCES:

**1.** Nikolin V. I., Podkopaev S. V., Maleev N. V., Agafonov A. V. Snijenie travmatizma ot proyavleniy gornogo davleniya. Donetsk : Nord Press, 2005. 324 s. **2.** Ruppeneyt K. V., Liberman Yu. M. Vvedenie v mehaniku gorniyh porod. Moskva : Gosgortehizdat, 1960. 355 s. **3.** Shashenko A. N., Pustovoytenko V. P., Sdvijkova E. A. Geomehanika. Kiev : Novyy druk, 2016. 528 s. **4.** S. Podkopaiev, V. Gogo, I. Yefremov, O. Kipko, I. Iordanov, Yu. Simonova. Phenomena of stability of the coal seam roof with a yielding support. *Mining of Mineral Deposits*. 2019. Vol. 13, Issue 4. Pp. 28–41. URL: <https://doi.org/10.33271/mining13.04.028> (дата звернення: 12.02.2022). **5.** Koshelev K. V., Petrenko YU. A., Novikov A. O. Ohrana i remont gorniyh vyirabotok. М. : Nedra, 1990. 256 s. **6.** Viktorov S. D., Goncharov S. A., Iofis M. A., Zakalinskiy V. M. Mehanika sdvijeniya i razrusheniya gorniyh porod. М. : RAN, 2019. 360 s. ISBN 978-5-907036-13-0. **7.** Vahromeev S. A. Mestorojdeniya poleznyih iskopaemyih, ih klassifikatsiya i usloviya obrazovaniya. М. : Nedra, 1979. 288 s. **8.** Jukov V. E. Ob odnoy strategicheskoy oshibke v razreshenii

problemyi rozrabotki krutyih plastov. *Ugol Ukrainyi*. 2001. № 7. S. 6–10.

**9.** Chepiha D. A. Obgruntuvannia ta rozrobka sposobiv pidvyshchennia bezpeky pratsi hirnykiv u vyimkovykh dilnytsiakh hlybokykh shakht : avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk : 05.26.01 / DVNZ «DonNTU». Pokrovsk, 2019. 24 s.

**10.** Podkopaev S. V., Gogo V. B., Efremov I. A., Iordanov I. V., Nosach A. K., Simonova Yu. I. Modelirovanie ustoychivosti krovli ugolnogo plasta s podatlivoy oporoy razlichnoy jestkosti. *Visti Donetskoho hirnychoho instytutu*. 2019. № 1(44). S. 7–22.

**11.** Yakobi O. Praktika upravleniya gornym davleniem. M. : Nedra, 1987. 566 s.

**12.** Feodosev V. I. Soprotivlenie materialov : uchebnik dlya vuzov. 10-e izd., pererab. i dop. Moskva : Izd-vo MG TU im. N. E. Baumana, 1999. T. 2. 592 s.

**13.** Timoshenko S., Woinowsky-Krieger S. Theory of Plates and Shells. 2nd edition. New York : McGraw-Hill, 1959. 580 p.

**14.** Pysarenko H. S., Kvitka O. L., Umanskyi E. S. Opir materialiv : pidruchnyk / za red. H. S. Pysarenka. Kyiv : Vyshcha shkola, 1993. 655 s.

**15.** Reddy J. N. Theory and Analysis of Elastic Plates and Shells. 2nd Edition. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2007. 547 p.

**16.** Shakirzyanov R. A., Shakirzyanov F. R. Dinamika i ustoychivost sooruzheniy. Kazan : Izd-vo Kazans. gos. arhit.–str. un-ta, 2005. 120 s.

**17.** A. Korol. The influence of the rigidity of mining security structures on the stability of side rocks in the coal rock massif. *Technology audit and production reserves*. 2021. № 3 / 1 (59). Pp. 19–22. doi: 10.15587/2706–5448.2021.235403.

**18.** Haimova-Malkova R. I. Metod issledovaniya napryajeniy polarizatsionno-opticheskim metodom. M. : Nauka, 1970. 194 s.

**19.** Metodicheskie ukazaniya po izgotovleniyu modeley iz opticheskikh chuvstv dlya issledovaniy gornogo davleniya. L. : VNIMI, 1970. 180 s.

**20.** Sotskov V. A., Derevyagina N. I. Opredelenie ratsionalnykh parametrov zakladki vyirabotannogo prostranstva pri selektivnoy dobyche uglya. *Zbirnyk naukovykh prats Natsion. hirn. un-tu*. 2019. № 59–04. S. 43–54. URL: <https://doi.org/10.3327/crpnmu.59.043> (data zvernennia: 12.02.2022).

**21.** Baklashov I. V. Deformiruemost i razrushenie massivov. M. : Nedra, 1988. 271 s.

**22.** Gogo V. B., Kipko A. E., Vlasenko N. N., Simonova Yu. I., Podkopaev E. S. Osobennosti napryajenno deformirovannogo sostoyaniya bokovyih porod v otsenke ekspluatatsionnogo sostoyaniya gornyih vyirabotok. *Vestnik Donetskogo gornogo instituta*. 2019. № 1. S. 53–64. DOI: 10.31474/1999-981X-2019-1-53-64.

**Bessarab I. M., Post-graduate Student, Podkopaiev Y. S.,  
Post-graduate Student** (Donetsk National Technical University,  
Pokrovsk)

## **ASSESSMENT OF THE STABILITY OF WALL ROCKS OF THE STEEP COAL SEAM IN THE MODEL OF COAL MASSIF WITH WORKINGS**



**To determine the conditions of the stability of wall rocks of the steep coal seam in the model of the coal massif for providing the operational condition of workings, taking into account the safety method.**

**To achieve this goal, analytical research using the basics of classical mechanics and resistance of materials were performed, in which the roof of a steep coal seam in the model of coal massif with workings was simulated in the form of an inclined beam loaded with external loads and research on models from optical materials, when the distribution of tangential stresses around the haulage roadway was studied under different safety methods, taking into account the deformation characteristics of the constrictions supporting lateral rocks.**

**In the model of the coal massif the inclined beam, which simulates the roof of the coal seam, was considered as the main load-bearing element. According to the results of research, the conditions of loss of stability of the load-bearing element due to the occurrence of bending moments in the research model are determined. The influence of the stiffness of the intermediate support on the amount of bending moments in the inclined beam is established. On models from optical materials the influence of deformation characteristics of protection constructions on distribution of stresses in a roof and a floor at various ways of protection of a haulage road is determined. It is proved that in order to ensure the condition of boundary equilibrium of the inclined beam, it is necessary to determine the stiffness of the intermediate supports with the physical and mechanical characteristics of the lateral rocks. This permits to strengthen the span of the beam along the length in the area of significant bending moments which have an affect on the stability of the load-bearing element and this permits to limit its movement.**

**Conditions of stability of wall rocks in the coal massif are provided due to change of rigidity of protective constructions of**

workings that leads to decrease in level of bending moments at a smooth deflection of the roof.

In the development of steep coal seams, the stability of wall rocks, which determines the operational condition of workings and mine safety on the excavation section of the coal mine, is provided by a system of pliable roof supports located in the mined-out space of the coal massif along the excavation section.

**Keywords:** wall rocks; stability; coal massif; inclined beam; support; external load.



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

## ПРИКЛАДНА МАТЕМАТИКА, ІНФОРМАТИКА ТА ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА

УДК 004.42:626.8

<https://doi.org/10.31713/vt1202219>

Пінчук О. Л., к.т.н., доцент, Герасімов Є. Г., д.т.н., доцент,  
Куницький С. О., к.т.н., старший дослідник, Іванчук Н. В., к.т.н.,  
доцент, Шатний С. В., к.т.н., старший викладач (Національний  
університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)



### КОМП'ЮТЕРНА ПРОГРАМА ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ВТРАТ НАПОРУ В ОБОЛОНКАХ-РУКАВАХ ГІДРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ ПОВЕРХНЕВОГО ОБІГРІВУ ҐРУНТУ

Перспективним напрямком використання скидного тепла промислових та енергетичних об'єктів є сільське господарства, а саме створення спеціальних гідротехнічних систем обігріву ґрунту. Представлено результати дослідження гідравлічних параметрів і режимів руху теплоносія в оболонках-рукавах гідротехнічних систем поверхневого обігріву ґрунту. Проведені дослідження гнучких поліетиленових оболонок-рукавів діаметром 50, 70, 85 та 100 мм довжиною 30 м в умовах вільного та підтопленого витікання води дозволили встановити характер зміни гідравлічного похилу при максимальній витраті до 1,5 л/с. Розроблено комп'ютерну програму для гідравлічного розрахунку втрат напору в оболонках-рукавах.

**Ключові слова:** комп'ютерна програма; втрати напору; гідротехнічна система; оболонка-рукав; поверхневий обігрів ґрунту.

Перспективним напрямком використання скидного тепла промислових та енергетичних об'єктів, як засвідчили розробки вчених різних країн, є використання в сільському господарстві, а саме для потреб рослинництва і тваринництва [1; 2; 3], причому найбільший ефект очікується від комплексного поєднання різних напрямів у складі так званих «енергобіологічних комплексів», що вирішують одночасно проблеми промисловості, енергетики, сільського господарства і навколишнього середовища [4; 5]. У складі енергобіологічних комплексів технології використання

низькопотенціального тепла промислових та енергетичних об'єктів конструктивно реалізуються у вигляді спеціальних гідротехнічних систем обігріву ґрунту, а в якості обігрівачів в системах використовуються різноманітні пристрої (лотки, труби, шланги, тонкостінні оболонки тощо) [6].

Технологія теплової меліорації ґрунтів поверхневим обігрівом гнучкими оболонками-рукавами з використанням скидних теплих вод виявила свою достатньо високу тепломеліоративну та економічну ефективність [7; 8], що стимулює подальший науковий пошук, а також детальну розробку гідротехнічних систем поверхневого обігріву ґрунту оболонками-рукавами та їх впровадження в аграрному секторі для фермерських господарств і створення на їх основі ЕБК.

Тому питання розробки, обґрунтування та дослідження технології і технічних засобів поверхневого обігріву ґрунту скидною теплою водою з використанням гнучких тонкостінних оболонок-рукавів, як одного із найбільш перспективних напрямів у складі ЕБК, залишається актуальним і на даний час.

**Водночас невирішеними залишаються питання** обґрунтування раціональних конструкцій гідротехнічних систем поверхневого обігріву та форми оболонок-рукавів, розробки комп'ютерних програм для гідравлічного розрахунку втрат напору в оболонках-рукавах тощо.

**З метою дослідження гідравлічних параметрів** і режимів руху теплоносія в оболонках-рукавах, встановлення особливостей втрат напору та відповідно подальшої розробки комп'ютерної програми для гідравлічного розрахунку втрат напору в оболонках-рукавах були проведенні експериментальні дослідження. Методика їх проведення наведена у [9].

**Важливим параметром для гідравлічного розрахунку** закритих трубопровідних систем є втрати напору. У розрахунках та аналізі, як відомо, втрати напору поділяються на місцеві та втрати напору по довжині. Місцеві втрати напору у гнучкій оболонці відсутні, а втрати напору по довжині визначаються, за відомою залежністю, Дарсі-Вейсбаха. Зважаючи на той факт, що гнучкі оболонки-рукави працюють в режимі турбулентного руху води коефіцієнт гідравлічного тертя доцільно розраховувати за формулою Блазіуса.

Проведені дослідження гнучких поліетиленових оболонок-рукавів діаметром 50, 70, 85 та 100 мм довжиною 30 м в умовах

вільного та підтопленого витікання води дозволили встановити характер зміни гідравлічного похилу при максимальній витраті до 1,5 л/с (рис. 1, 2).

Аналіз отриманих експериментальних залежностей показав, що в загальному випадку залежність гідравлічного похилу від витрати води можна представити як:

$$i = a \cdot Q^b, \quad (1)$$

де  $a, b$  – коефіцієнти зміни, яких обумовлена характером руху теплоносія (рис. 3, 4).

За результатами експериментальних досліджень встановлені залежності, що описують залежність коефіцієнта гідравлічного тертя від числа Рейнольдса за різних умов витікання води (таблиця).

Температура води в дослідженнях змінювалась від 20 до 35° С, а її вплив на зміну гідравлічних характеристик враховували відповідною зміною величини в'язкості при розрахунку числа Рейнольдса.

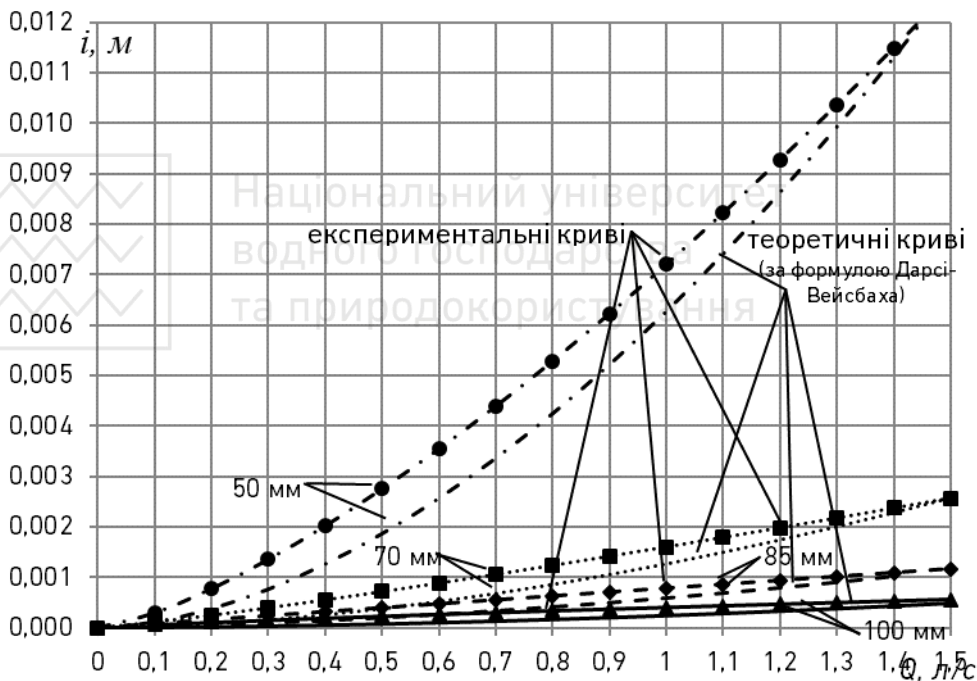


Рис. 1. Графіки зміни гідравлічного похилу оболонок-рукавів діаметром 50, 70, 85 та 100 мм за умов вільного витікання



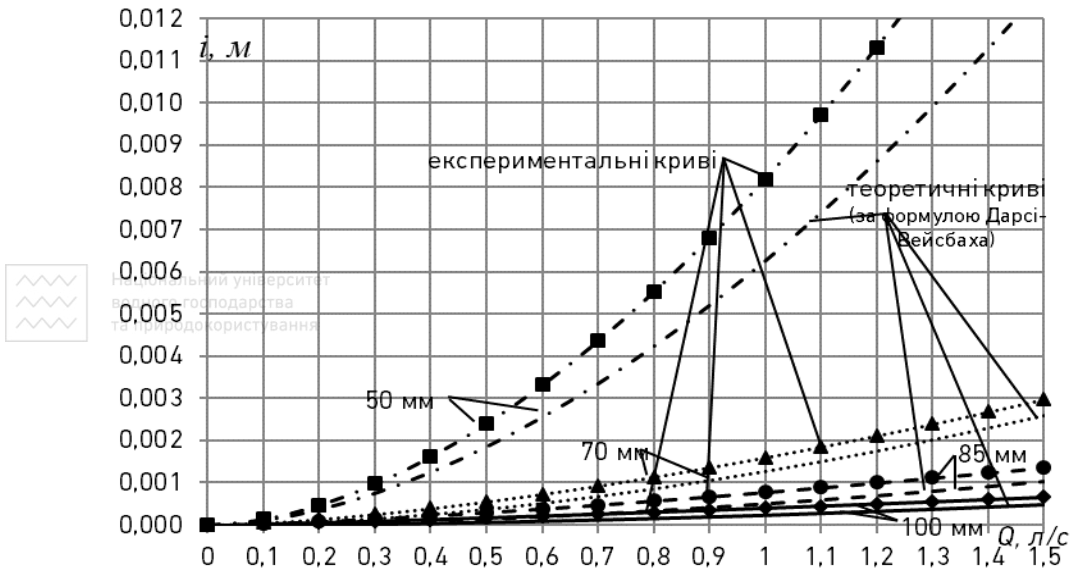


Рис. 2. Графіки зміни гідравлічного похилу оболонки-рукавів діаметром 50, 70, 85 та 100 мм за умов підтопленого витікання  
 $a=f(d)$   $b=f(d)$

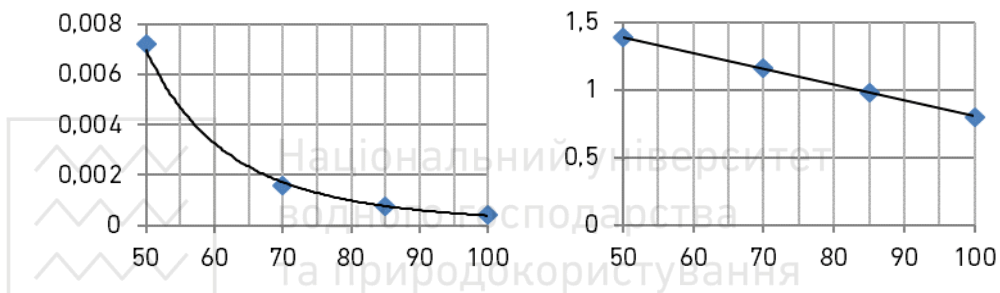


Рис. 3. Графік залежності коефіцієнтів  $a, b$  від діаметру оболонки-рукава за умов вільного витікання

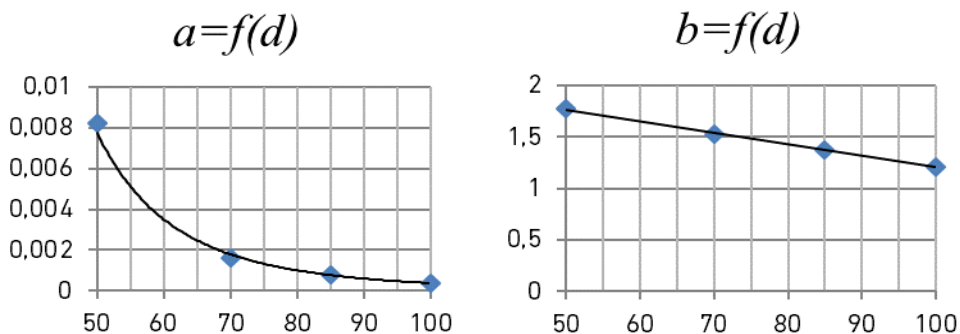


Рис. 4. Графік залежності коефіцієнтів  $a, b$  від діаметру оболонки-рукава за умов підтопленого витікання

Залежності коефіцієнта гідравлічного тертя від Re для оболонок-рукавів різного діаметру за різних умов її витікання

Режим витікання	Діаметр оболонки, мм	Характер залежності
Вільне	50	$\lambda = 0,1113 / Re^{0,6119}$
	70	$\lambda = 0,2223 / Re^{0,8348}$
	85	$\lambda = 0,4346 / Re^{1,0165}$
	100	$\lambda = 0,7633 / Re^{1,1982}$
Підтоплене	50	$\lambda = 0,0526 / Re^{0,2300}$
	70	$\lambda = 0,0958 / Re^{0,4694}$
	85	$\lambda = 0,1789 / Re^{0,6310}$
	100	$\lambda = 0,2992 / Re^{0,7915}$



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

При цьому було встановлено, що при прокачуванні води витратою до 1,5 л/с по оболонках число Рейнольдса за температури 30° С змінювалось в межах: для діаметра 50 мм –  $(0,32...4,8) \cdot 10^4$ , для діаметра 70 мм –  $(0,22...3,4) \cdot 10^4$ , для діаметра 85 мм –  $(0,19...2,8) \cdot 10^4$ , для діаметра 100 мм –  $(0,16...2,4) \cdot 10^4$ . Воду пропускали невеликими витратами від 0,1 до 1,5 л/с, імітуючи роботу рукавів у реальній системі поверхневого обігріву.

Одержані дані гідравлічних характеристик гнучких оболонок-рукавів, виконаних із поліетиленової плівки товщиною 0,2 мм, засвідчили, що вони при довжині 25–30 м можуть пропускати значні витрати води при незначних початкових напорах і незначних швидкостях руху води як при вільному, так і при підтопленому витіканні.

Так, наприклад, для пропуску витрати води величиною 0,6 л/с по оболонці довжиною 30 м при вільному витіканні, для діаметра 50 мм потрібний напір склав 10,5 см, для діаметра 70 мм – 2,7 см, для діаметра 85 мм – 1,5 см, а для діаметра 100 мм всього на всього – 0,9 см. При вільному витіканні води, режим протікання води по оболонці переходить практично у самопливний, а рукави сплющуються до розмірів вузької щілини чи пластини, особливо при малих витратах.

Для проведення високоточних розрахунків та зменшення часу на аналіз дослідних даних, була розроблена комп'ютерна програма для розрахунку втрат напору в оболонках-рукавах гідротехнічних

систем. Програма виконана із використанням інтегрованого середовища розробки Borland Delphi, що базується на класичній мові програмування Pascal та із дотриманням принципів сучасної розробки програмних продуктів, а саме RAD (Rapid Application Development) – високошвидкісна розробка додатків та WYSIWYG (What You See Is What You Get) – проєктування та розробка інтерфейсу в момент створення програмного продукту.

Структура програми являє собою сукупність програмних модулів, об'єднаних одним інтерфейсом взаємодії та передачі даних та із застосуванням зручного та інтуїтивно-зрозумілого інтерфейсу користувача. На рис. 5 зображений інтерфейс користувача програми із наступними блоками взаємодії: початкові налаштування – можливість вибору режиму витікання з вільним або підтопленим режимами.

Область вводу вихідних даних розділяється на можливість внесення параметрів  $Q$ , л/с;  $d$ , мм;  $L$ , м. Після внесення всіх необхідних даних, оператор натискаючи кнопку «Обрахунок» запускає на виконання основний алгоритм обчислень. Особливістю реалізації даного алгоритму є первинна перевірка правильності введених даних, перевірка коректності плаваючої коми та заповненість всіх необхідних полів. Після успішної перевірки правильності введених даних, результати обрахунку виводяться у відповідних полях. Результати обрахунків та коректності роботи програми зображені на рис. 5.

Для більш точного налаштування початкових даних, в програмі реалізований модуль «Головне меню», де можна здійснити налаштування відповідних меж, здійснити вихід із програми з видаленням займаної оперативної пам'яті персонального комп'ютера та перейти до перегляду вбудованого мультимедійного контенту, зображеного на рис. 5.

Мультимедійна інтеграція призначена для спрощення розуміння процесів, які обраховуються та забезпечує можливість використання у навчальному процесі, зокрема для підготовки студентів по відповідним спеціальностям.

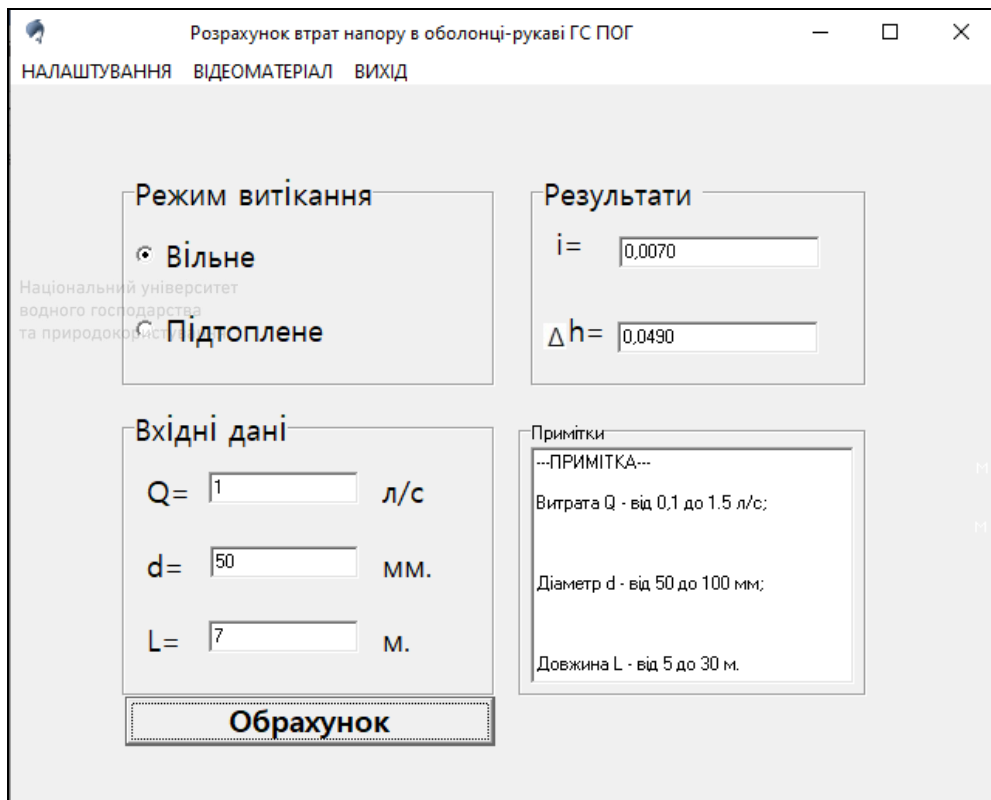


Рис. 5. Інтерфейс користувача програми з результати роботи

Код програми написаний із використанням сучасних підходів та технологій. Лістинг основної програми зображено на рис. 7.

Під час написання коду програми були виявлені наступні проблеми: некоректність введення початкових даних у вигляді числа із плаваючої комою; вихід за межі допустимих значень та невідповідність введених даних до системи вимірювання. Фінальна версія програми виконана із усуненням вищевказаних недоліків.

Для усунення проблеми некоректності числа із плаваючою комою був розроблений метод послідовного перебору рядку введених символів із пошуком відповідності та подальшою заміною. Лістинг методу представлено на рис. 8.

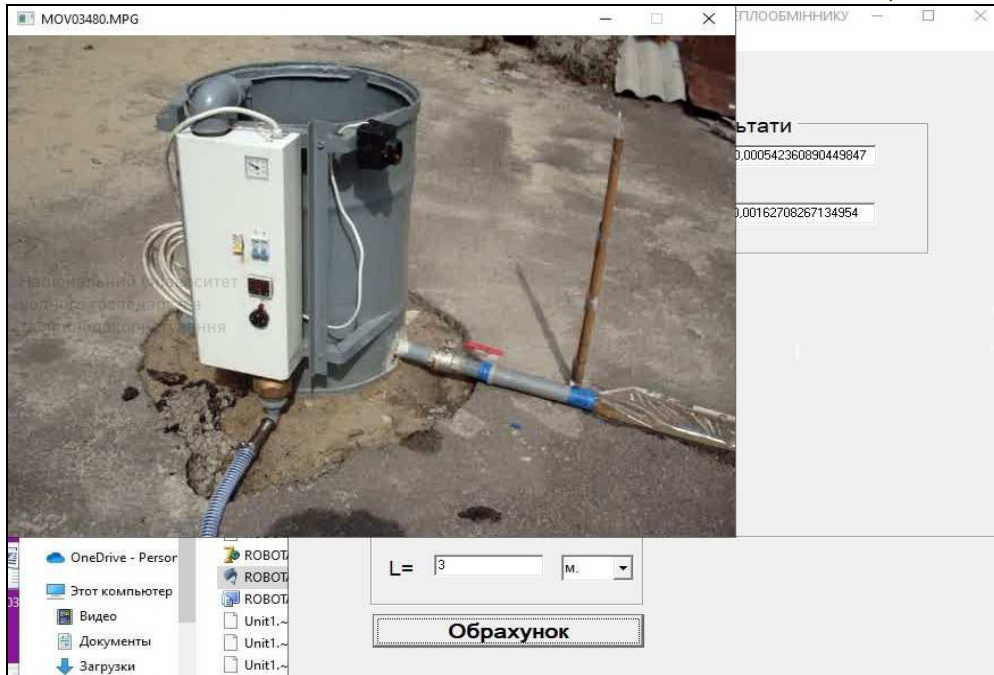


Рис. 6. Мультимедійні можливості розробленої програми

**Одержані дані гідравлічних параметрів роботи** тонкостінних оболонок-рукавів із гнучких матеріалів засвідчили цілковиту можливість їх використання для систем поверхневого обігріву ґрунту як вискоєфективних транспортуючих пристроїв при використанні водних теплоносіїв. При цьому оболонки діаметром 80–100 мм спроможні пропускати значні витрати води при дуже незначних втратах напору.

Проведені дослідження засвідчили також, що з точки зору мінімізації втрат напору доцільніше використовувати оболонки-рукави діаметром 80–100 мм. Такими рукавами можна перекачувати значні об'єми води на великі відстані за мінімальних початкових напорів та в режимах самопливного перетікання води (на горизонтальній місцевості).

Отримані наукові і практичні результати можуть бути використанні при проектуванні та гідравлічному розрахунку гідротехнічних систем з оболонок-рукавів на основі використання скидних теплих вод промислових і енергетичних об'єктів.

Рукав

```
procedure TForm1.Button1Click(Sender: TObject);
begin
  qmin:=strtofloat(form2.ed_minq.Text);
  qmax:=strtofloat(form2.ed_maxq.Text);
  dmin:=strtofloat(form3.ed_mind.Text);
  dmax:=strtofloat(form3.ed_maxd.Text);
  Lmin:=strtofloat(form4.ed_minL.Text);
  Lmax:=strtofloat(form4.ed_maxL.Text);

  if (ed_q.Text='') then application.MessageBox('Введіть Q','')
  else q:=strtofloat(ed_q.Text);
  if (ed_d.Text='') then application.MessageBox('Введіть d','')
  else d:=strtofloat(ed_d.Text);
  if (ed_l.Text='') then application.MessageBox('Введіть L','')
  else L:=strtofloat(ed_l.Text);

  if ((form1.RadioButton1.Checked=false) and (form1.RadioButton2.Checked=false)
  then application.MessageBox('Здайте режим поливу','');

  if ((q<qmin) or (q>qmax)) then
    begin
      application.MessageBox('Q не задовільняє
      обмеженням','Не коректні дані');
      ed_q.Text:='';
    end;

  if ((d<dmin) or (d>dmax)) then
    begin
      application.MessageBox('d не задовільняє
      обмеженням','Не коректні дані');
      ed_d.Text:='';
    end;

  if ((L<Lmin) or (L>Lmax)) then
    begin
      application.MessageBox('L не задовільняє
      обмеженням','Не коректні дані');
      ed_l.Text:='';
    end;

  if (((q>=qmin) and (q<=qmax) and (d>=dmin) and (d<=dmax) and (L>=Lmin) and
  (L<=Lmax)) and ((form1.RadioButton1.Checked=true) or
  (form1.RadioButton2.Checked=true))) then
    begin
      if form1.RadioButton1.Checked=true then
        begin
          a:=79736*exp((-4.155)*ln(d));
          b:=-0.0117*d+1.98;
          i:=a*exp(b*ln(q));
        end;
      if form1.RadioButton2.Checked=true then
        begin
          a:=186740*exp((-4.345)*ln(d));
          b:=-0.0112*d+2.3245;
          i:=a*exp(b*ln(q));
        end;
      ed_i.Text:=floattostr(i);
      dh:=i*L;
      ed_dh.Text:=floattostr(dh);
    end;
end;
end;

procedure TForm1.Q1Click(Sender: TObject);
begin
  form2.ShowModal;
end;
```

Страница 2

Рис. 7. Сторінка програмного коду

```
s1:=ed_q.Text;  
while True do begin  
ii1:= Pos ('.', s1);  
if ii1=0 then  
Break  
else  
s1[ii1]:=',';  
end;  
ed_q.Text:=s1;
```

```
s2:=ed_d.Text;  
while True do begin  
ii2:= Pos ('.', s2);  
if ii2=0 then  
Break  
else  
s2[ii2]:=',';  
end;  
ed_d.Text:=s2;
```

```
s3:=ed_l.Text;  
while True do begin  
ii3:= Pos ('.', s3);  
if ii3=0 then  
Break  
else  
s3[ii3]:=',';  
end;  
ed_l.Text:=s3;
```

Рис. 8. Програмна реалізація методу послідовного перебору та автозаміни некоректних символів

На основі отриманих даних, розроблено комп'ютерну програму для гідравлічного розрахунку втрат напору в оболонках-рукавах, яка виконана на високому алгоритмічному та програмному рівнях, показує високу точність обчислень та високу обчислювальну швидкість. Перспективність даної розробки полягає у можливості розширення функціоналу програми, збільшення обчислювальних

можливостей та реалізованих методів, розширення сфери для проведення обрахунків. Програма виконана із використанням сучасних бібліотек, що дозволяє їй функціонувати у всіх операційних системах сімейства MS Windows.

1. Бурденкова Е. Ю. Оптимизация параметров и схем теплоснабжения теплично-овощных комбинатов с использованием сбросной и низкопотенциальной теплоты КЭС : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.01. Саратов, 2001. 146 с. 2. Ольховик О. І., Востріков В. П., Пінчук О. Л. Використання низькопотенційного тепла доквілля тепловими насосами для потреб сільського господарства. *Вісник НУВГП. Технічні науки* : зб. наук. праць. Рівне : НУВГП, 2007. Вип. 1(37). С. 54–61. 3. Востріков В. П., Романюк І. В., Пінчук О. Л., Новачок І. О. Обігрів ґрунту рукавами-теплообмінниками і його вплив на ґрунтові процеси, розвиток і врожайність суниць. *Вісник НУВГП. Технічні науки* : зб. наук. праць. Рівне : НУВГП, 2008. Вип. 2(42). Ч. 1. С. 108–115. 4. Фарберов В. Г., Калмыков А. Е., Зеленина Е. С. Энергобиологический комплекс. *Экология промышленного производства*. 2001. № 4. С. 28–30. 5. Васильев Н. Н., Ремизов Ю. В. Энергобиологические комплексы как способ утилизации сбросного тепла крупных энергообъектов и создание высокоинтенсивного безотходного производства. *Вопросы атомной науки и техники*. 2004. Вып. 1. С. 57–60. 6. Пінчук О. Л. Аналіз конструкцій тепломеліоративних систем. *Вісник НУВГП. Технічні науки* : зб. наук. праць. Вип. 1(53). Рівне, 2011. С. 85–94. 7. Романюк І. В. Теплова меліорація ґрунту скидною теплою водою за допомогою гідротехнічної системи з теплообмінниками-рукавами (в умовах Західного Полісся України) : дис. ... канд. техн. наук : 06.01.02. Рівне, 2007. 249 с. 8. Гурин В. А., Востріков В. П., Романюк І. В., Пінчук О. Л. Тепловая эффективность обогрева грунта водонаполненными гибкими рукавами при использовании низкотемпературной воды. *Роль мелиорации в обеспечении продовольственной и экологической безопасности России* : материалы международной научно-практической конференции. Москва, 2009. Ч. 1. С. 129–135. 9. Востріков В. П., Пінчук О. Л., Романюк І. В. Методичні аспекти гідравлічних досліджень тепломеліоративних систем поверхневого обігріву ґрунту оболонками-рукавами. *Вісник НУВГП. Технічні науки* : зб. наук. праць. Рівне, 2011. Вип. 3(55). С. 30–36.

## REFERENCES:

1. Burdenkova E. Yu. Optimizatsiya parametrov i shem teplosnabjeniya teplichno-ovoschnyih kombinatov s ispolzovaniem sbrosnoy i nizkopotentsialnoy teploty KES : dis. ... kand. tehn. nauk : 05.14.01. Saratov, 2001. 146 s. 2. Olkhovyk O. I., Vostrikov V. P., Pinchuk O. L. Vykorystannia




nyzkopotentsiinoho tepla dovkillia teplovymy nasosamy dlia potreb silskoho gospodarstva. *Visnyk NUVHP. Tekhnichni nauky* : zb. nauk. prats. Rivne : NUVHP, 2007. Vyp. 1(37). S. 54–61. **3.** Vostrikov V. P., Romaniuk I. V., Pinchuk O. L., Novachok I. O. Obihriv gruntu rukavamy-teploobminnykamy i yoho vplyv na gruntovi protsesy, rozvytok i vrozhainist sunyts. *Visnyk NUVHP. Tekhnichni nauky* : zb. nauk. prats. Rivne : NUVHP, 2008. Vyp. 2(42). Ch. 1. S. 108–115. **4.** Farberov V. G., Kalmyikov A. E., Zelenina E. S. Energobiologicheskyy kompleks. *Ekologiya promyishlennogo proizvodstva*. 2001. № 4. S. 28–30. **5.** Vasilev N. N., Remizov Yu. V. Energobiologicheskyye komplekxy kak sposob utilizatsii sbrosnogo tepla krupnykh energoobyektov i sozdanie vyysokointensivnogo bezothodnogo proizvodstva. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki*. 2004. Vyip. 1. S. 57–60. **6.** Pinchuk O. L. Analiz konstruksii teplomelioryatyvnykh system. *Visnyk NUVHP. Tekhnichni nauky* : zb. nauk. prats. Vyp. 1(53). Rivne, 2011. S. 85–94. **7.** Romaniuk I. V. Teplova melioratsiia gruntu skydnoiu teploiu vodoiu za dopomohoiu hidrotekhnichnoi systemy z teploobminnykamy-rukavamy (v umovakh Zakhidnogo Polissia Ukrainy) : dys. ... kand. tekhn. nauk : 06.01.02. Rivne, 2007. 249 s. **8.** Gurin V. A., Vostrikov V. P., Romanyuk I. V., Pinchuk O. L. Teplovaya effektivnost obogreva grunta vodonapolnennyimi gibkimi rukavami pri ispolzovanii nyzkotemperaturnoy vodyi. *Rol melioratsii v obespechenii prodovolstvennoy i ekologicheskoy bezopasnosti Rossii* : materialy mejdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Moskva, 2009. Ch. 1. S. 129–135. **9.** Vostrikov V. P., Pinchuk O. L., Romaniuk I. V. Metodychni aspekty hidravlichnykh doslidzhen teplomelioryatyvnykh system poverkhnevoho obihrivu gruntu obolonkamy-rukavamy. *Visnyk NUVHP. Tekhnichni nauky* : zb. nauk. prats. Rivne, 2011. Vyp. 3(55). S. 30–36.

---

**Pinchuk O. L., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor,**  
**Gerasimov Ie. G., Doctor of Engineering, Associate Professor,**  
**Kunytskyi S. O., Candidate of Engineering (Ph.D.), Senior Researcher,**  
**Ivanchuk N. V., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor,**  
**Shatnyi S. V., Candidate of Engineering (Ph.D.), Senior Lecturer**  
(National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

### **COMPUTER PROGRAM FOR CALCULATION OF PRESSURE LOSSES IN SHELLS-SLEEVES OF HYDROTECHNICAL SYSTEMS OF SURFACE HEATING SOIL**

**Agriculture is a promising direction for the use of waste heat from industrial and energy facilities, namely the creation of special hydrotechnical systems for heating the soil. The technology of heat**



reclamation of soils by surface heating with flexible shells-sleeves using discharge warm water has shown its sufficiently high heat reclamation and economic efficiency. The results of the study of the hydraulic parameters and modes of movement of the heat carrier in the casings-sleeves of hydrotechnical systems of surface heating of the soil are presented. Conducted studies of flexible polyethylene sheaths-sleeves with a diameter of 50, 70, 85 and 100 mm and a length of 30 m in conditions of free and flooded outflow of water made it possible to establish the nature of the change in the hydraulic slope at a maximum flow rate of up to 1.5 l/s. According to the results of experimental studies, the dependences describing the dependence of the hydraulic friction coefficient on the Reynolds number under different conditions of water outflow have been established. The water temperature in the studies varied from 20 to 35° C, and its influence on the change in hydraulic characteristics was taken into account by the corresponding change in viscosity when calculating the Reynolds number. At the same time, it was established that when pumping water with a flow rate of up to 1.5 l/s through the shells, the Reynolds number at a temperature of 30° C varied within the following limits: for a diameter of 50 mm –  $(0.32...4.8) \cdot 10^4$ , for a diameter of 70 mm –  $(0.22...3.4) \cdot 10^4$ , for a diameter of 85 mm –  $(0.19...2.8) \cdot 10^4$ , for a diameter of 100 mm –  $(0.16...2.4) \cdot 10^4$ . Water was passed at a small rate of 0.1 to 1.5 l/s, simulating the operation of the sleeves in a real surface heating system. The obtained data on the hydraulic characteristics of flexible sheaths-sleeves, made of polyethylene film with a thickness of 0.2 mm, proved that they can pass significant water flows at a length of 25–30 m with small initial pressures and small speeds of water movement both at free and at submerged outflow. A computer program has been developed for the hydraulic calculation of pressure losses in casings-sleeves.

**Keywords:** computer program; head loss; hydraulic engineering systems; shell-sleeve; surface heating of soil.

---

**Сокол О. В., магістр, Цветкова Т. П., к.т.н., доцент, Харів Н. О., старший викладач** (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, t.p.tsvetkova@nuwm.edu.ua, n.o.khariv@nuwm.edu.ua)



## ПРОЄКТУВАННЯ ТА РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНИХ ПРОЦЕСІВ ВПРОВАДЖЕННЯ ВЕБСЕРВІСУ ЗА DEVOPS МЕТОДОЛОГІЄЮ

Розробка програмного забезпечення складається з багатьох етапів – від розробки, збирання та тестування до розгортання, випуску, доставлення користувачам та підтримки. З метою оптимізації та пришвидшення циклу розробки програмного продукту постає необхідність впровадження автоматизованих процесів, що забезпечує вищу надійність кожного етапу та пришвидшує весь цикл розробки програмного забезпечення. Автоматизація процесів розробки дозволяє створювати системи неперервної розробки та впровадження для ефективної роботи над програмним забезпеченням. З метою оптимізації процесів розробки та впровадження програмних продуктів у статті представлено проєктування та розробку автоматизованих процесів впровадження вебсервісу за DevOps методологією. Застосування методології DevOps дозволяє автоматизувати рутину роботи із збірки, тестування та впровадження вебзастосунку. Розглянуто методи та технології впровадження принципів DevOps підходу до розробки програмного забезпечення, з використанням яких здійснено проєктування та розробку автоматизованих процесів для безперервної інтеграції та розгортання вебсервісу на базі AWS EC2. Розроблені автоматизовані процеси тестувалися на прикладі розробленого сайту для бронювання кемпінгів та можуть застосовуватися для будь-якого вебпроєкту. Спроєктований та розроблений процес автоматизації забезпечив безперервну інтеграцію, автоматичне тестування, збірку та розгортання розробленого вебсервісу. Для цього на всіх етапах розробки та впровадження вебсервісу необхідно забезпечувати стабільну роботу системи, прозорість та зрозумілість системи для розробників. Отримані результати використання розроблених автоматизованих процесів позитивно впливають на швидкість командної розробки, що дозволяє розробляти якісні програмні продукти швидше та бути більш конкурентними на IT-ринку.

**Ключові слова:** DevOps методологія; автоматизовані процеси; сервер; проєкт; вебсервіс; версія; CI/CD; Git; Bitbucket.

**Вступ.** Розробка програмного забезпечення включає створення, проєктування, розгортання та підтримку програмного забезпечення, що є досить складним процесом та потребує залучення багатьох спеціалістів. Тому актуальною є автоматизація деяких етапів розробки програмного забезпечення: від розробки, збирання та тестування до розгортання, випуску, доставлення користувачам та підтримки, що забезпечує вищу надійність та пришвидшує весь цикл розробки програмного продукту. Адже впровадження автоматизованих процесів дозволяє створювати системи неперервної розробки та впровадження для ефективної роботи над вебресурсом, оптимізує командну роботу, що дозволяє розробляти якісні програмні продукти швидше та бути більш конкурентними на IT-ринку.

**Постановка задачі.** Розглядається задача застосування DevOps методології при проєктуванні, розробці та впровадженні вебсервісу для оптимізації та пришвидченні циклу розробки. Головна мета проєкту полягає у мінімізації витрат часу на виконання рутинної роботи, пов'язаної з розробкою та впровадженням вебсервісу, на прикладі розробленого вебсайту бронювання готелів, шляхом їх автоматизації, впровадження CI/CD практики для полегшення процесів інтеграції та доставки коду.

**Розробка автоматизованих процесів та їх впровадження.** Для проєктування та розробки автоматизованих процесів впровадження вебсервісу розглянемо застосування DevOps методології, яка дозволяє автоматизувати рутину роботи із збірки, тестування та впровадження вебзастосунку.

До появи методології DevOps процес розробки і подальшого розгортання програмного забезпечення являв собою чітку послідовність – розробка, тестування та введення в експлуатацію. Підхід DevOps дозволив розробникам і фахівцям з експлуатації працювати у більш тісній співпраці та менше залежати від проблем та особливостей діяльності один одного, а поява інструментів DevOps як спільної екосистеми зовсім стерло межі між розробкою і експлуатацією. Запропонований інструментарій дозволив стандартизувати процеси налаштування, розгортання та підтримки застосунків.

DevOps методологія орієнтована на командну роботу, де розглядаються всі аспекти життєвого циклу програмного забезпечення: від програмного коду до експлуатації продукту кінцевим користувачем (рис. 1). Згідно з рис. 1, основними процесами розробки програмного забезпечення за DevOps методологією є наступні [2; 7]:

- Code (код) – розробка та аналіз, контроль версій та злиття коду;
- Build (збірка) – безперервна інтеграція різних збірок;
- Test (тест) – інструменти безперервного тестування, що повідомляють про бізнес-ризик;

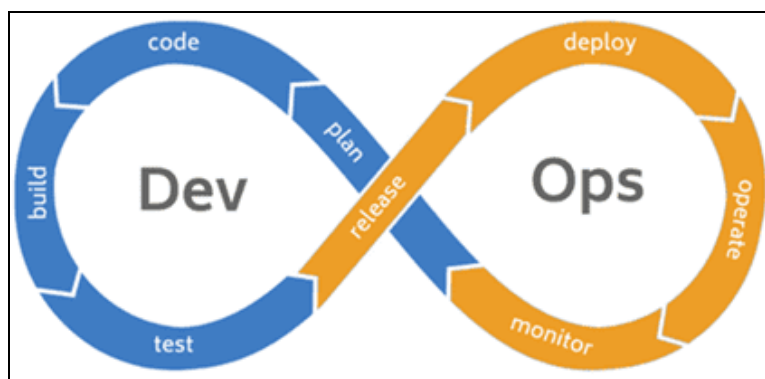


Рис. 1. Основні процеси розробки програмного забезпечення за DevOps

- Operate (робота з пакетами) – репозиторій артефактів, попереднє встановлення застосунків;
- Release (випуск) – управління змінами, офіційне затвердження випуску, автоматизація випуску;
  - Deploy (розгортання конфігурації) – управління інфраструктурою як кодом;
  - Monitor (моніторинг) – моніторинг продуктивності застосунків, досвід роботи з кінцевим користувачем.

Дані процеси описують весь цикл розробки програмного забезпечення, які необхідно оптимізувати за допомогою впровадження DevOps методології на кожному кроці розробки.

Протягом усього життєвого циклу застосунки в DevOps застосовують на різних етапах конкретні методики, які автоматизують і прискорюють конкретний етап або дозволяють створити цілісний продуктивний процес, охоплюючи відразу декілька етапів. Розглянемо основні підходи до розробки

програмного забезпечення, які використовуються в DevOps методології.

*Безперервна інтеграція і доставка (CI/CD)* дозволяє розробникам оперативно додавати зміни в основний код. Програмний код відразу автоматично тестується, що підвищує стабільність роботи програми. При безперервній доставці нові версії регулярно автоматично розгортаються на сервер, за рахунок цього можливі більш часті оновлення проєкту. Тобто CI/CD дозволяє автоматизувати всі дії – від фіксації коду до розгортання його на сервер, щоб скоротити час і трудозатрати на рутинні операції і прискорити процес розгортання коду з мінімальними ризиками.

*Керування версіями* дозволяє відслідковувати всі виправлення та зміни коду, що допомагає спростити процес його аналізу та відновлення в разі помилок. Системи управління версіями дозволяють команді розробників спільно створювати код, забезпечуючи об'єднання його змін в файлах, вирішення конфліктів і, в разі необхідності, повернутися до попередніх версій.

*Гнучка розробка програмного забезпечення.* Дуже важливою є спільна робота різних команд, отримання оперативного зворотного зв'язку від користувачів та адаптація до коротких циклів випуску програмного забезпечення, що дозволяє враховувати побажання клієнтів і швидко вносити зміни до застосунків.

*Інфраструктура як код.* За даною методикою системні ресурси описуються як код, що допомагає здійснювати розгортання середовища розробки, тестування та експлуатацію оперативно, передбачувано та надійно, знижує ризики помилок, пов'язаних з людським фактором.

*Управління конфігурацією* дозволяє керувати станом ресурсів (серверів, віртуальних машин, баз даних) в системі. За допомогою певних інструментів DevOps-інженер може розгортати зміни контрольовано та систематично, при цьому зменшивши до мінімуму ризики зміни конфігурації, а також відстежувати актуальний стан системи і будь-які зміни чи відхилення в конфігурації від потрібного її стану.

*Безперервний моніторинг* передбачає відстеження в реальному часі продуктивності та працездатності програми. Для цього автоматично збираються певні показники телеметрії, метаданих, а також налаштовується оповіщення про відхилення у роботі програми. Ця інформація допомагає вирішувати виникаючі проблеми

дуже швидко і допомагає зрозуміти, що можна поліпшити у майбутніх циклах розробки [1; 4–6].

Розглянемо застосування DevOps підходу при проєктуванні, розробці та впровадженні вебсервісу для оптимізації командної роботи, забезпечені якості, надійності кінцевого продукту та пришвидшенні циклу розробки програмного забезпечення. Створені автоматизовані процеси впроваджено у розроблений вебсервіс бронювання готелів. Головною метою є мінімізація витрат часу на виконання рутинної роботи, пов'язаної з розробкою та впровадженням вебсервісу, шляхом автоматизації процесів інтеграції та доставки коду. Для вирішення поставленої задачі необхідно виконати наступні завдання:

1. Налаштувати локальне середовище розробки проєкту за допомогою Docker контейнерів.
2. Створити сервіс розгортання проєкту на сервер BitBucket Pipeline, який буде виконувати наступні функції:
  - збірка тестової версії проєкту;
  - запуск автоматизованого тестування проєкту (Unit-тестування);
  - збірка проєкту для завантаження на тестовий (prod) та мастер (dev) сервери;
  - копіювання готової аплікації на файлове сховище Amazon S3;
  - ініціалізація запуску розгортання проєкту на dev та prod сервери;
  - налаштування серверів для проєкту.
3. Створити віртуальні машини на Amazon EC2 для хостингу проєкту.
4. Налаштувати систему керування базами даних Amazon RDS для зберігання бази даних.
5. Підключити файлове сховище Amazon S3 для зберігання аплікації проєкту.
6. Забезпечити універсальність алгоритму для легкої адаптації під інші вебзастосунки.

Результатом виконання всіх завдань є реалізація алгоритму (рис. 1), який описує весь процес проєктування, розробки, впровадження та підтримки вебсервісу із застосуванням DevOps методології. На всіх етапах розробки та впровадження вебсервісу потрібно забезпечити стабільну роботу системи, прозорість та зрозумілість системи для розробників.

DevOps методологія містить підхід до роботи з системою контролю версій програмного забезпечення GIT. Git Workflow – це рекомендація щодо використання Git для виконання роботи послідовно та продуктивно, яка спонукає розробників ефективно та послідовно використовувати Git. Основна ідея цих рекомендацій полягає у тому, що існують master-гілка, dev-гілка та feature's гілки. Розробники працюють в межах своєї feature-гілки, синхронізуючись з dev-гілкою. Після потрапляння в dev, feature's гілки видаляються. Час від часу, коли проєкт на dev-гілці стає стабільним, dev синхронізується з master-гілкою і отримуємо наступну робочу версію продукту (рис. 2) [5; 6].

Початок створення автоматизованого CI/CD процесу – це завантаження проєкту на мастер-гілку, яке ініціалізує запуск саме процесу безперервної інтеграції (Continuous Integration), який виконує збірку та запуск автоматичних тестів. У разі успішного проходження тестування починається етап безперервної доставки (Continuous Delivery), під час якого проєкт копіюється на сервер, створюється резервна копія старої версії, яка замінюється новою версією.

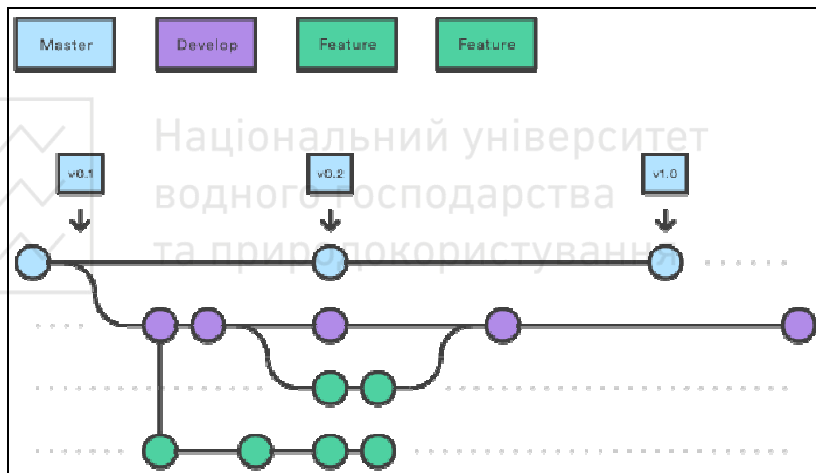


Рис. 2. Схема Git Workflow

Загальна блок-схема автоматизованої CI/CD системи має вигляд (рис. 3):



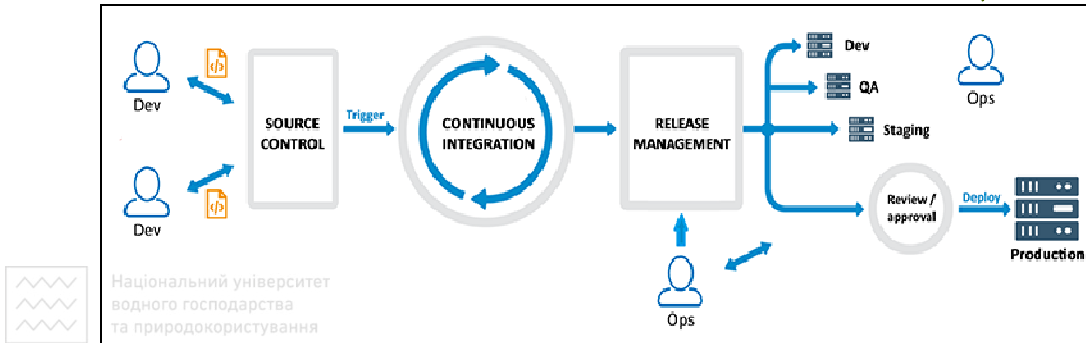


Рис. 3. Загальна CI/CD блок-схема

До реалізації автоматизованих процесів впровадження вебпроект розгортався шляхом виконання певного набору операції, які зводилися до наступного:

- завантаження останніх змін;
- збірка проєкту локально, який призводив до створення артефакту;
- локальний запуск, перевірка справності роботи;
- перенесення артефакту на сервер;
- заміна артефакту новою версією;
- перенесення нового артефакту у відповідне місце;
- видалення старого артефакту.

Таким чином, даний процес можна відобразити у вигляді наступної схеми (рис. 4):

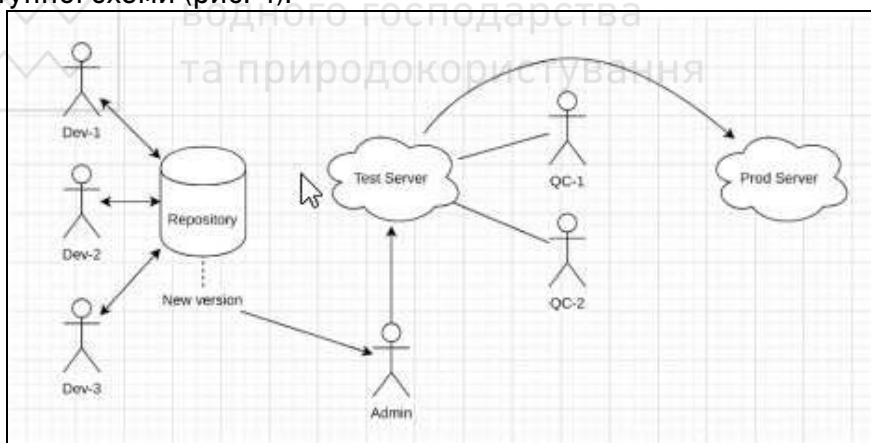


Рис. 4. CI/CD процеси до виконання автоматизації

Загалом процес розробки вимагає багато розробників, які, в свою чергу, взаємодіють з загальною кодовою базою, яка в певний

період часу містить відповідну версію проєкту. Ця нова версія може бути перенесена на сервер, тобто, відбудеться процес розгортання даної аплікації. Сервер для початку повинен бути тестовим – для відлагодження та перевірки програми. Коли нова версія програми потрапляє на тестовий сервер, відділ тестування випробовує, перевіряє на помилки даний продукт. Після успішної перевірки, якщо не було виявлено жодних дефектів, проєкт розгортається в межах production середовища, тобто такого, яке використовується реальними користувачами. Якщо забрати з загального процесу людину, яка займається адмініструванням, то виникає проблема в тому, що весь цей процес стає неможливим. Тобто, є певні ризики щодо певних непередбачених ситуацій, які можуть виникнути через велику залежність від однієї людини. Можливі наступні шляхи вирішення даної проблеми:

- найняти ще одного адміністратора;
- автоматизувати частково ці процеси, якими займається даний робітник.

У випадку застосування спроектованих автоматизованих процесів до розробки програмного забезпечення додаємо до схеми DevOps спеціаліста, який налаштує автоматичну збірку та доставку проєкту до кінцевого користувача, і схема CI/CD процесу представлена на рис. 5.

Для тестування розроблених автоматизованих процесів можна використати будь-який вебпроєкт. Проведемо дане тестування на прикладі спеціально розробленого сайту для бронювання кемпінгів.

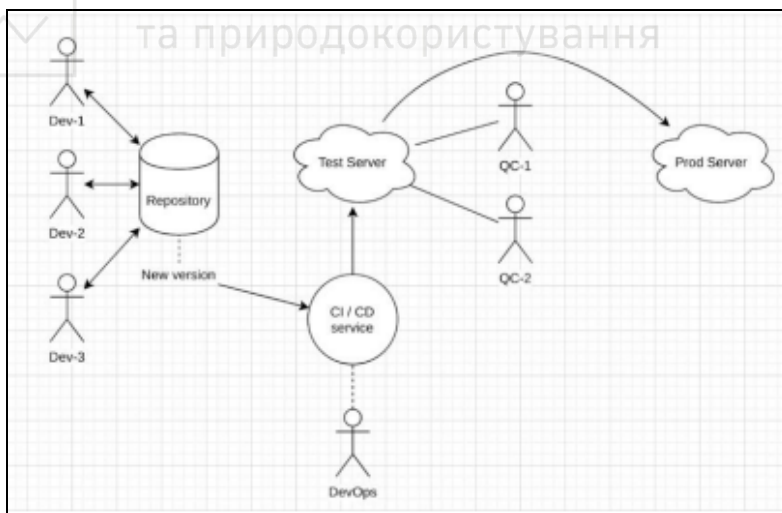


Рис. 5. CI/CD процеси після автоматизації

Спочатку відкриємо локальну версію проєкту та додамо надпис «Тест CI/CD» на головну сторінку сайту (рис 6) [3].

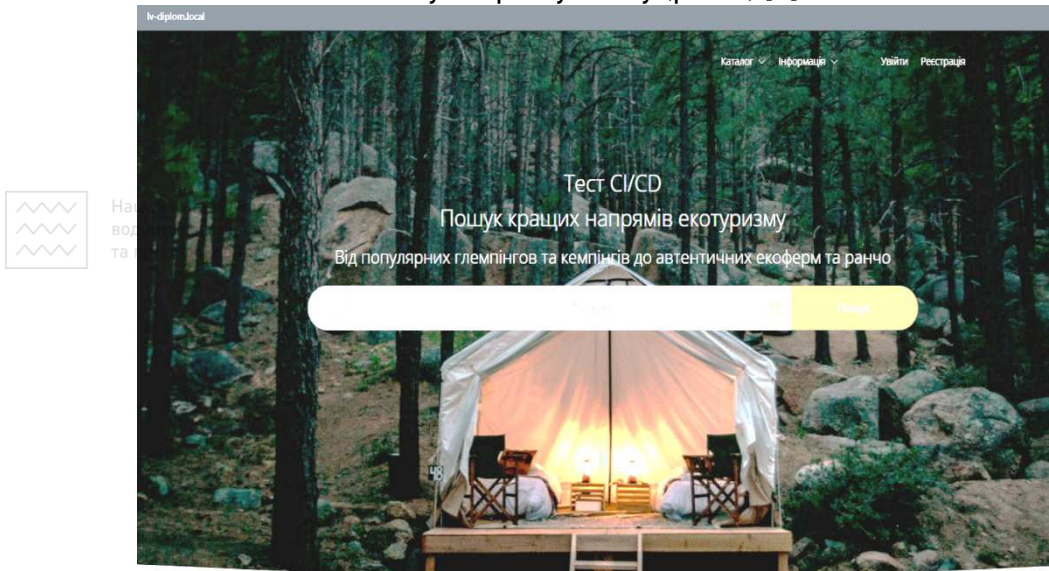


Рис. 6. Головна сторінка вебсервісу на локальному комп'ютері

Після завантаження змін на Git автоматично запускається створений раніше набір команд для сервісу Bitbucket Pipeline, який автоматично виконує розгортання проєкту на сервер. Результат виконання даного файлу наведено на рис. 7.

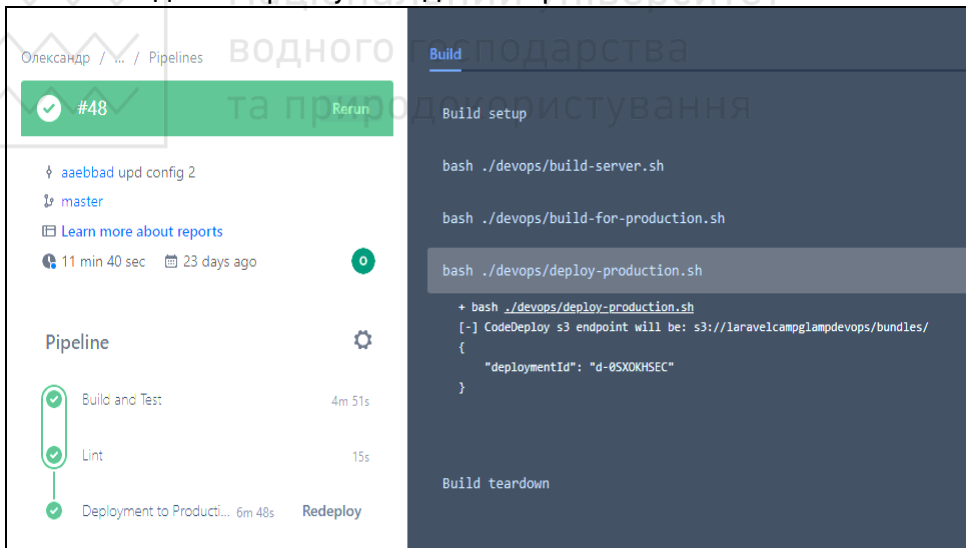


Рис. 7. Виконання розгортання проєкту на сервер Bitbucket Pipeline

Також даний файл ініціалізує запуск сервісу AWS CodeDeploy, що копіює завантажену сервісом BitBucket Pipeline апликацію із сховища Amazon S3 у вебдиректорію, результат виконання якого можна побачити на рис. 8.

Revision details						
Revision location		Revision created		Revision description		
s3://aravellcampglampdevops/bundles/bundle-b8ab104.tag.gz		1 month ago		Application revision registered by Deployment ID: d-UMYZU2INC		
Event	Duration	Status	Error code	Start time	End time	
ApplicationStop	less than one second	✔ Succeeded	-	Dec 14, 2021 11:42 PM (UTC+2:00)	Dec 14, 2021 11:42 PM (UTC+2:00)	
DownloadBundle	13 seconds	✔ Succeeded	-	Dec 14, 2021 11:42 PM (UTC+2:00)	Dec 14, 2021 11:43 PM (UTC+2:00)	
Beforeinstall	less than one second	✔ Succeeded	-	Dec 14, 2021 11:43 PM (UTC+2:00)	Dec 14, 2021 11:43 PM (UTC+2:00)	
Install	24 seconds	✔ Succeeded	-	Dec 14, 2021 11:43 PM (UTC+2:00)	Dec 14, 2021 11:43 PM (UTC+2:00)	
Afterinstall	3 minutes 45 seconds	✔ Succeeded	-	Dec 14, 2021 11:43 PM (UTC+2:00)	Dec 14, 2021 11:47 PM (UTC+2:00)	
ApplicationStart	less than one second	✔ Succeeded	-	Dec 14, 2021 11:47 PM (UTC+2:00)	Dec 14, 2021 11:47 PM (UTC+2:00)	
ValidateService	less than one second	✔ Succeeded	-	Dec 14, 2021 11:47 PM (UTC+2:00)	Dec 14, 2021 11:47 PM (UTC+2:00)	

Рис. 8. Результати роботи сервісу AWS CodeDeploy

Як видно з рис. 8, всі етапи розгортання проєкту пройшли успішно, отже, всі зміни повинні бути вже на віддаленому сервері. Перейдемо за адресою <http://35.178.225.200> (дата останнього доступу: 30.11.2021) та перевіримо (рис. 9).

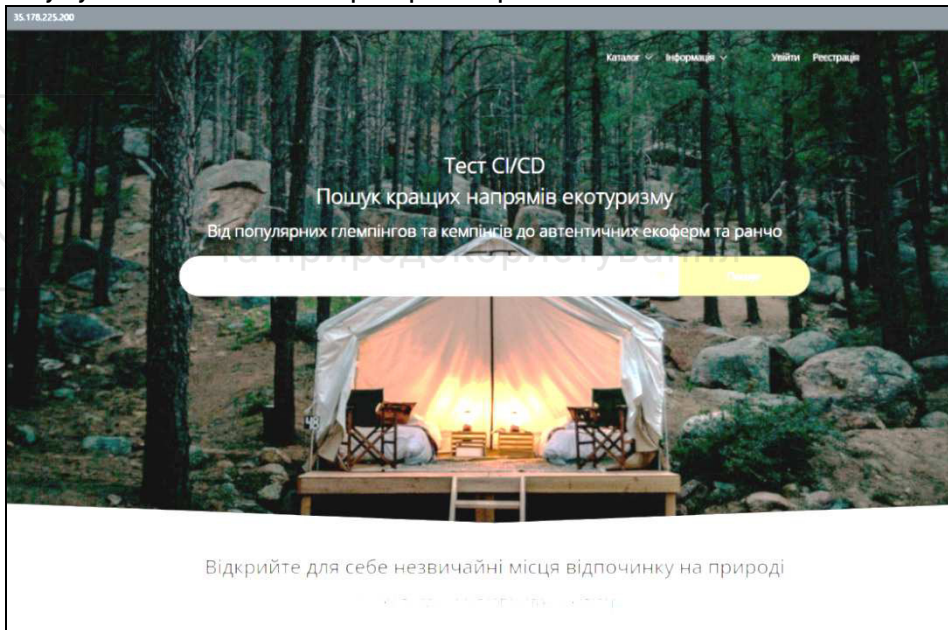


Рис. 9. Головна сторінка вебсервісу на віддаленому сервері

Надпис «Тест CI/CD» з'явився на мастер-сервері, отже, все налаштовано правильно та працює без помилок, що свідчить що спроектований та розроблений процес автоматизації забезпечує безперервну інтеграцію, автоматичне тестування, збірку та розгортання вебсервісу.

**Висновок.** DevOps методологія дозволяє здійснювати автоматизоване розгортання та покращення надійності коду, підвищити продуктивність команди, зменшити бізнес-ризики та кінцеву ціну для замовника. Результати використання розроблених автоматизованих процесів позитивно впливають на швидкість командної розробки. Для порівняння один staging-реліз (випуск програмного забезпечення) в місяць перетворився у 4, що є кращим показником, ніж було раніше, при цьому впевненість у працездатності та правильності роботи вебпроєкту залишилась на хорошому рівні.

Розроблені автоматизовані процеси можуть повторно застосовуватися для аналогічних проєктів. Адаптація даного рішення чи використання принципів підходу до проєктування та розробки програмного забезпечення є можливими та легко інтегрується у вже існуюче різного роду програмне забезпечення та не вимагає значних зусиль на їх реалізацію. Крім того, алгоритм розробленої системи автоматизованого процесу є досить простим для розробників та дає можливість застосовувати його в невеликих проєктах з малочисельною командою.

1. Вольф Е. Continuous delivery. Практика неперервних апдейтів. Вид-во «МІФ», 2016. 78 с. 2. Девіс Д. Філософія DevOps. Мистецтво управління ІТ. Вид-во «ВВМ», 2018. 92 с. 3. Хоган Б. HTML5 та CSS3. Веб-розробка за стандартами нового покоління : 4-те вид. Київ : Видавничий дім «Слово», 2010. 260 с. 4. Gene Kim. The DevOps Handbook. Packt Publishing, 2019. 302 с. 5. Joseph Muli. Beginning DevOps with Docker. Packt Publishing, 2019. 215 с. 6. Rafal Leszko. Continuous Delivery with Docker and Jenkins: Delivering software at scale. Packt Publishing Limited, 2018. 140 с. 7. Складові DevOps. Synopsys : вебсайт. URL: <https://www.synopsys.com/glossary/what-is-devops.html> (дата звернення: 30.05.2022).

## REFERENCES:

1. Volf E. Continuous delivery. Praktyka neperervnykh apdeitiv. Vyd-vo «MIF», 2016. 78 s.
2. Devis D. Filosofiia DevOps. Mystetstvo upravlinnia IT. Vyd-vo «VVM», 2018. 92 s.
3. Khoan B. HTML5 ta CSS3. Veb-rozrobka za standartamy novoho pokolinnia : 4-te vyd. Kyiv : Vydavnychi dim «Slovo», 2010. 260 s.
4. Gene Kim. The DevOps Handbook. Packt Publishing, 2019. 302 c.
5. Joseph Muli. Beginning DevOps with Docker. Packt Publishing, 2019. 215 c.
6. Rafal Leszko. Continuous Delivery with Docker and Jenkins: Delivering software at scale. Packt Publishing Limited, 2018. 140 c.
7. Skladovi DevOps. Synopsys : vebсайт. URL: <https://www.synopsys.com/glossary/what-is-devops.html> (data zvernennia: 30.05.2022).

---

**Sokol O. V., Master, <sup>1</sup>Tsvietkova T. P., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor, <sup>2</sup>Khariv N. O., Senior Lecturer** (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne,  
<sup>1</sup>t.p.tsvetkova@nuwm.edu.ua, <sup>2</sup>n.o.khariv@nuwm.edu.ua)

### **DESIGN AND DEVELOPMENT OF AUTOMATED PROCESSES OF WEB SERVICE IMPLEMENTATION USING DEVOPS METHODOLOGY**

**Software development consists of many stages – from development, assembly and testing to deployment, release, delivery to users and support. In order to optimize and accelerate the software development cycle, implementation of automated processes which provide higher reliability on each stage and speeds up the entire software development cycle is required. Automation of development processes allows to create continuous development and implementation systems for effective work on the software. In order to optimize the processes of development and implementation of software products, this article presents the design and development of automated web service implementation processes according to DevOps methodology. The application of DevOps methodology allows to automate routine work on the assembly, testing and deployment of web application. The methods and technologies of DevOps approach implementation are considered and used for design and development of automated processes for continuous integration and deployment of a web service based on AWS EC2. Developed automated processes were tested on the example developed site for booking campsites and**

can be used for any web project. The automation process designed and developed in this paper ensured continuous integration, automatic testing, assembly and deployment of the developed web service. For this purpose, the stable operation of the system, transparency and system clarity for developers must be ensured on each stage of development and implementation of the web service. The results of using the developed automated processes have a positive effect on the speed of cooperative development, which allows to develop quality software products faster and to be more competitive in the IT market.

**Keywords:** DevOps methodology; automated processes; server; project; web service; version; CI/CD; Git; Bitbucket.

---



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

**Шпортко О. В., к.т.н., доцент** (ПВНЗ «Міжнародний економіко-гуманітарний університет імені академіка Степана Дем'янчука», м. Рівне, ITShportko@ukr.net), **Шпортко Л. В., ст. викладач** (Рівненський фаховий коледж економіки та бізнесу, м. Рівне, LChportko@gmail.com), **Бомба А. Я., д.т.н., професор** (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, abomba@ukr.net)

### **ФОРМУВАННЯ РОЗКЛАДУ МОДИФІКОВАНОГО АЛГОРИТМУ LZ77 У ФОРМАТІ DEFLATE З ОРІЄНТАЦІЄЮ ДОВЖИН ОДНАКОВИХ ПОСЛІДОВНОСТЕЙ НА ЦІЛІ ПІКСЕЛІ**

Проаналізовано взаємовплив основних етапів стиснення зображень без втрат та формату словникової компресії Deflate. Обґрунтована доцільність перерозподілу довжин суміжних замін модифікованого алгоритму LZ77 з їх орієнтацією на цілі пікселі в процесі прогресуючого ієрархічного стиснення зображень без втрат. Встановлено, що під час першого проходу цього алгоритму з пошуком однакових послідовностей по найближчих опрацьованих раніше пікселях орієнтацію на цілі пікселі доцільно застосовувати для всіх графічних файлів, а в процесі другого проходу з пошуком однакових послідовностей в словнику – лише для дискретно-тонових зображень. Подано результати застосування різних розкладів модифікованого алгоритму LZ77 для стиснення зображень набору АСТ. Показано, що застосування комбінованої орієнтації розкладу модифікованого алгоритму LZ77 на цілі пікселі дає змогу додатково зменшити коефіцієнти стиснення окремих зображень на 0.01–0.02 брб, сповільнюючи при цьому кодування в середньому лише на 0.05 с.

**Ключові слова:** розклади словникового алгоритму LZ77; прогресуюче стиснення зображень; стиснення без втрат.

**Як відомо, обсяги** даних, які містяться у файлах та передаються каналами зв'язку через локальні мережі та Інтернет [1, С. 28], систематично зростають. Їх стиснення дає змогу пропорційно підвищити швидкість обміну інформацією по мережі та зменшити обсяги використання дискового простору. Невід'ємною складовою



цих даних є мультимедійна інформація загалом та зображення, як їх частина, зокрема. Тому вдосконалення існуючих та розробка нових графічних форматів з метою покращення показників стиснення зображень є на сьогодні актуальним науковим завданням.

**Усі графічні формати** за принципом стиснення зображень поділяють на два основні класи: з втратами та без втрат. Стиснення зображень без втрат у графічних форматах найчастіше відбувається в три етапи: на першому яскравості компонентів пікселів перетворюються за допомогою предикторів [2; 3, С. 200; 4, С. 315–317], які не стискають зображення, але збільшують нерівномірність розподілу яскравостей і тому підвищують ефективність третього етапу; на другому – контекстно-залежне кодування зменшує надлишковості між однаковими фрагментами чи фрагментами з однаковою структурою [3, С. 81–110; 5, С. 75–119]; на третьому етапі контекстно-незалежне кодування усуває надлишковості між переважаючими значеннями яскравостей компонентів [3, С. 25–80; 5, С. 31–49]. Однакові фрагменти чи фрагменти з однаковою структурою в основному трапляються в дискретно-тонових зображеннях. Тому для таких малюнків істотно зменшує коефіцієнт стиснення (відношення розмірів стиснутого до нестиснутого файлів зображення, надалі – КС) другий етап кодування, а третій етап є єдиною універсальною фазою кодування для всіх зображень.

Основний принцип контекстно-незалежного кодування третього етапу сформулюємо так: **довжина коду довільного елемента з більшою ймовірністю не повинна перевищувати довжину коду будь-якого елемента з меншою ймовірністю.** Стосовно зображень, цей принцип базується на фундаментальному положенні теорії інформації, згідно з яким для мінімізації довжини коду послідовності кожне значення елемента  $i$  (яскравість окремої компоненти *brightness* (для окремої компоненти кожного пікселя зображень True Color  $brightness = \overline{0, 255}$ ) чи значення контекстно-залежного коду) з ймовірністю появи  $p_i = n_i / N$  (де  $n_i$  – абсолютна частота елемента  $i$ , а  $N = \sum_i n_i$  – загальна кількість елементів)

доцільно кодувати

$$l_i = -\log_2 p_i = \log_2 \frac{N}{n_i} \quad (1)$$

бітами [5, С. 17]. Тоді середня довжина коду елемента блоку після застосування будь-якого контекстно-незалежного алгоритму згідно з формулою of Shannon не може бути меншою ентропії джерела [3, С. 25–26]

$$H = -\sum_i p_i \times \log_2 p_i . \quad (2)$$

Назвемо  $l_i$  довжиною ентропійного коду елемента  $i$ . Як відомо, ентропія джерела (2) зменшується зі збільшенням нерівномірності розподілу ймовірностей (частот) між елементами [2].

Одним з вдалих прикладів поєднання контекстно-залежного та контекстно-незалежного етапів кодування, затвердженого на рівні стандарту є формат словникового стиснення Deflate. Цей формат був розроблений Філом Кацем в 1993 році для другої версії архіватора PKZIP [5, С. 94–95] та формалізований в RFC 1951 [6] у 1996 році. Формат Deflate для опрацювання вхідного потоку використовує контекстно-залежний словниковий алгоритмом LZ77 [7], а результати його роботи для забезпечення найменших КС стискає динамічними кодами Хафмана [8]. На сьогодні цей формат використовується також в багатьох популярних архіваторах (наприклад, GZIP) та графічних форматах (наприклад, PNG [4, С. 249–318]) і не потребує придбання ліцензій для використання в прикладному ПЗ.

Алгоритм LZ77 як складова частина формату Deflate базується на заміні під час кодування у вихідному потоці однакової послідовності для буфера посиланням на аналогічну вже закодовану послідовність словника у вигляді пари чисел <довжина однакової послідовності, зміщення від кінця словника до попередньої однакової послідовності>. Якщо для елементів з початку буфера віднайти однакоvu послідовність в словнику не вдається, то перший елемент (літерал) з початку буфера записується в кінець словника та у вихідний потік без змін і кодування продовжується аналогічно з наступного елемента буфера. У форматі Deflate довжини замін та окремі літерали алгоритму LZ77 кодуються разом числами в межах [0; 285]. При цьому числа з діапазону [0; 255] відповідають кодам окремих літералів, 256 позначає закінчення блоку, а числа з діапазону [257; 285] вказують на базові значення довжин. Після базових значень довжин міститься визначена форматом додаткова кількість бітів (до п'яти), що разом з базовим значенням однозначно визначає довжину заміни [5, С. 98]. Зміщення зберігається відразу

після відповідної довжини заміни аналогічно – у вигляді базового значення та додаткових бітів (до 13). Базове значення зміщення знаходиться в межах [0; 29] [5, С. 99].

Зрозуміло, що однакових послідовностей різної довжини для початку буфера у словнику може бути декілька, тому й альтернативних розкладів алгоритму LZ77 можливо сформувати чимало і серед цих розкладів доцільно обирати той, що забезпечує мінімальний КС. Але аналізувати ефективність всеможливих розкладів алгоритму LZ77 в процесі стиснення зображень недоцільно через обмеження на час кодування. Тому на практиці використовують один з поширених варіантів формування розкладу алгоритму LZ77. Охарактеризуємо найпопулярніші з таких розкладів, які ми опосередковано використали в цьому дослідженні:

1. **«Жадібний» розклад** алгоритму LZ77 базується на використанні на кожному кроці заміни *<довжина; зміщення>* найбільшої довжини. Природно, що цей розклад забезпечує найшвидше стиснення, але й практично завжди – високі КС [5, С. 106], оскільки не аналізує альтернативні варіанти. Ми також використовуємо «жадібний» розклад для найшвидшого кодування зображень.

2. **«Лінійний» розклад** (lazy parsing) базується на відмові від використання віднайдені заміни *<довжина; зміщення>* з чергової позиції потоку, якщо з наступної позиції вдається віднайти довшу заміну. Але довжина контекстно-незалежного коду літерала з чергової позиції потоку може перевищувати довжину його коду в заміні, якщо цей літерал зустрічається рідко. Крім цього, «лінійний» розклад може ітеративно породжувати послідовності літералів, які могли б входити в окремі заміни [5, С. 104–105]. Тому в цій роботі нами використовувався лише підхід формування цього розкладу для реалізації орієнтації довжин замін на цілі пікселі.

Водночас на сьогодні обхід яскравостей пікселів зображень у популярних графічних форматах, які виконують стиснення без втрат, як правило здійснюється послідовно по рядках зверху вниз, а у кожному рядку – поспіль зліва направо. Тому вивести стиснуте зображення у цих форматах можливо лише після завершення декодування, а декомпресія їх файлів з мільйонами пікселів при такому способі обходу може тривати декілька секунд незалежно від розміру області чи роздільної здатності пристрою виводу. Для прискорення ж виводу великих зображень у форматах компресії з

втратами вже застосовують прогресуюче (поступальне) ієрархічне опрацювання пікселів [3, С. 176] (наприклад вейвлети [9]). Під час такого способу опрацювання пікселі зображення обходять пошарово, збільшуючи щоразу роздільну здатність (прогресуюча складова), і в процесі послідовної обробки яскравостей пікселів чергового шару використовують дані попередніх шарів (ієрархічна складова). Зупинити таке декодування в процесі прогресуючого ієрархічного обходу можливо вже після декомпресії шару з кількістю пікселів, не меншою від області виводу по кожній з осей, не очікуючи відтворення всього зображення.

Для реалізації прогресуючого ієрархічного стиснення зображень без втрат в [10] нами було запропоновано відповідні предиктори та схему обходу, за якою на першому шарі пікселі зображення опрацюються послідовно, починаючи з першого у верхньому лівому куті, по рядках зверху вниз, а у кожному рядку – підряд зліва направо з кроком  $h_1 = 2^k$ , де  $k$  визначається з умови

$$k = \left\lceil \log_2 \left( \frac{\max(\min(\text{height}; \text{width}); 16) - 1}{15} \right) \right\rceil, \text{ height} - \text{кількість рядків,}$$

$\text{width}$  – кількість стовпців пікселів зображення (рис. 1, а). На наступних шарах ( $l = 2, k+1$ ) проміжні пікселі зображення обробляються в два проходи: на першому послідовно опрацюються ті з них, які містяться на перетині діагоналей квадратів з вершинами у суміжних пікселях попередніх шарів з кроком  $h_l = 2^{k+2-l}$  як по рядках, так і по стовпцях (див. рис. 1, б), а на другому необроблені пікселі послідовно обходяться між суміжними пікселями попередніх шарів і пікселями першого проходу з тим самим кроком по стовпцях і з вдвічі зменшеним – по рядках (див. рис. 1, в). На рис. 1 символом  $F$  позначені пікселі першого шару, символом  $P$  – пікселі попередніх шарів, цифрою 1 – пікселі першого проходу чергового шару, цифрою 2 – пікселі другого проходу чергового шару.

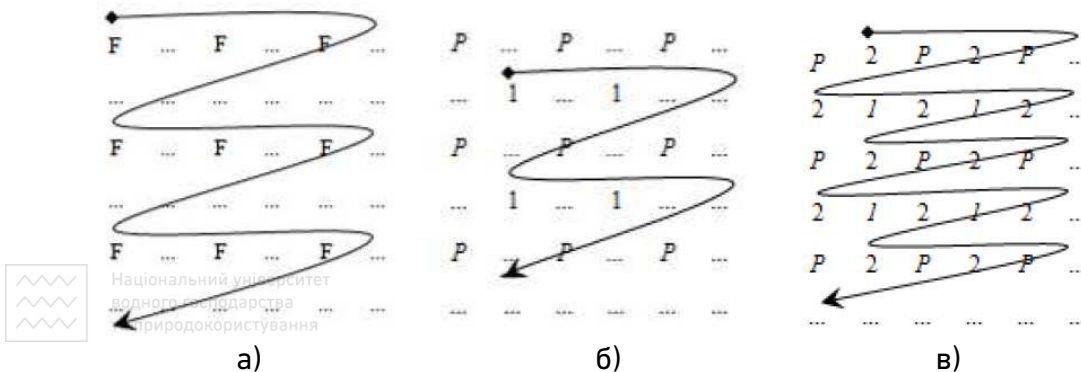


Рис. 1. Черговість обходу пікселів в процесі прогресуючого ієрархічного опрацювання: а) пікселів першого шару; б) пікселів першого проходу чергового шару; в) пікселів другого проходу чергового шару

Для підвищення ефективності застосування алгоритму LZ77 в процесі прогресуючого ієрархічного стиснення зображень без втрат на всіх шарах, починаючи з другого, в [11] ми обґрунтували доцільність виконання пошуку однакових послідовностей для елементів буфера не лише у словнику, **а й починаючи з найближчих раніше опрацьованих пікселів з кроком чергового шару**. Оскільки серед раніше опрацьованих пікселів черговий піксель  $X$  має найвищий рівень кореляції саме з найближчими серед них, то найменші 6 зміщень (з кодами від 1 до 6) ми закріпили за найближчими опрацьованими раніше пікселями (рис. 2), а для забезпечення однозначності декодування коди зміщень в словнику збільшили на 6.

**З метою додаткового зменшення КС зображень** у цій статті ми наведемо власний варіант формування розкладу алгоритму LZ77 у форматі Deflate в процесі прогресуючого ієрархічного стиснення RGB-зображень з орієнтацією довжин заміन на цілі пікселі та дослідимо ефективність його застосування.

**Для виявлення можливостей зменшення КС модифікованого алгоритму LZ77** в процесі прогресуючого ієрархічного стиснення зображень без втрат шляхом оптимізації його розкладу проаналізуємо розподіл частот коротких замін різної довжини, які були використані нами для стиснення зображень набору Archive Comparison Test (<http://www.compression.ca/act/act-files.html>, надалі АСТ) в процесі «жадібного» розкладу цього алгоритму (табл. 1). Цей набір містить 3 синтезованих (№№ 1 (з шумами), 2, 7), та

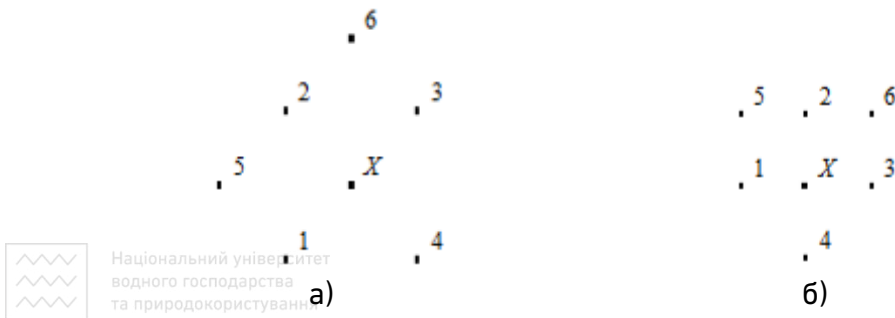


Рис. 2. Коды зміщень до яскравостей суміжних опрацьованих раніше пікселів на шарах, починаючи з другого: а) для першого проходу; б) для другого проходу

5 фотореалістичних (решта) зображень. В табл. 1 наведені дані для довжин заміни алгоритму LZ77 до 10 елементів включно (такі заміни назвемо **короткими**), оскільки у форматі Deflate довші заміни кодуються однаковими груповими кодами з суміжними значеннями [5, С. 98] і їх перерозподіл істотно не впливає на КС.

Таблица 1

Кількості коротких заміни різної довжини, використаних для стиснення зображень набору АСТ в процесі «жадібного» розкладу алгоритму LZ77

Довжина заміни	№ файла								В середньому по набору
	1	2	3	4	5	6	7	8	
3	17443	54673	44	57155	7660	91270	19929	33689	35233
4	3562	3864	11	9430	1763	8798	5058	5886	4797
5	772	2777	6	3463	765	3612	2275	1873	1943
6	497	23509	2	10512	711	5401	7917	3208	6470
7	112	1861	1	1470	164	247	1465	684	751
8	28	1416	0	726	61	80	687	285	410
9	471	18739	0	4183	48	179	5861	599	3760
10	239	1438	0	432	13	17	927	147	402
<b>Разом:</b>	<b>23124</b>	<b>108277</b>	<b>64</b>	<b>87371</b>	<b>11185</b>	<b>109604</b>	<b>44119</b>	<b>46371</b>	<b>53764</b>

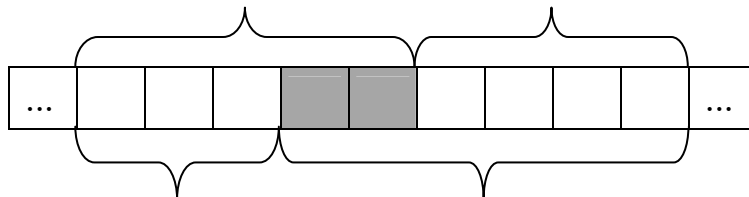
Як слідує з табл. 1, короткі заміни найчастіше зустрічаються в дискретно-тонових зображеннях та фотореалістичних знімках з багатьма середніми чи малими об'єктами. Також бачимо, що **серед суміжних довжин коротких заміни алгоритму LZ77 найчастіше зустрічаються довжини, кратні цілим пікселям (3, 6 чи 9 елементів)**. І це не дивно, адже в зображеннях найчастіше повторюються

кольори цілих пікселів, а не кольори пікселів і суміжних компонентів у відповідності до послідовності їх обходу. Тому після застосування контекстно-незалежного алгоритму, враховуючи (1), ентропійні коди довжин заміни, кратних цілим пікселям, будуть в середньому суттєво коротші від ентропійних кодів суміжних довжин. Наприклад, для зображення *frymire.bmp* (№ 2 в наборі АСТ) середня довжина заміни з трьох елементів буде меншою від довжини заміни з чотирьох елементів на  $\log(54673) - \log(3864) \approx 3.82$  біта. Тому, якщо в цьому зображенні код першого чи останнього елемента заміни з чотирьох елементів коротший 3.82 біта, то для зменшення КС навіть доцільно закодувати такий елемент окремо, а заміну скоротити до трьох елементів. Але такі ситуації трапляються в зображенні порівняно рідко і тому цей підхід зменшує розміри стиснутих зображень лише на десятки байтів.



Суттєвіше зменшити КС зображень можливо, якщо для обрізаних елементів короткої заміни алгоритму LZ77 (заміни з довжинами 4 чи 5 обрізаються до 3 елементів, з довжинами 7 чи 8 – до 6 елементів, заміни довжиною 10 – до 9 елементів) вдається віднайти суміжну заміну. Якщо ж суміжну заміну алгоритму LZ77 для обрізаних елементів віднайти не вдалося, то ці елементи доцільно по чергову повертати до попередньої заміни, щоразу повторюючи пошук суміжної заміни для залишених обрізаних елементів при їх наявності. Наприклад, на рис. 3 схематично відмічено заміну довжиною 5 елементів (верхня частина), яку обрізано до пікселя (нижня частина), а її два обрізаних елементи включено до наступної заміни.

Довжини заміни алгоритму LZ77 без орієнтації на цілі пікселі



Довжини заміни алгоритму LZ77 з орієнтацією на цілі пікселі

Рис. 3. Зміни довжин двох суміжних заміни алгоритму LZ77 внаслідок скорочення першої заміни до довжини пікселя (обрізані елементи виділені на сірому фоні)

Тут дві суміжних заміни до орієнтації на цілі пікселі мали довжини 5 і 4 елементи, а після орієнтації – 3 і 6 елементів відповідно. Змінені довжини в середньому мають більші частоти і тому, враховуючи (1), закодуються меншою кількістю бітів контекстно-незалежним алгоритмом.

З іншого боку, послідовна обрізка суміжних замін може збільшити кількість замін меншої довжини, які за результатами аналізу замін Deflate-блоку виявляться неефективними і будуть відкинуті. Наприклад, замість трьох замін по чотири елементи може бути сформовано чотири заміни по три елементи. Тому суміжну заміну, яка покриває обрізані елементи, будемо вважати **прийнятною** тоді, коли крім обрізаних елементів вона покриває ще й принаймні два наступні елементи.

Описаний підхід формування розкладу модифікованого алгоритму LZ77 з орієнтацією довжин замін на цілі пікселі по суті аналогічний механізму формування вже згаданого «лінивого» розкладу, але перший з цих розкладів в найгіршому випадку шукає додаткові заміни <довжина; зміщення>, починаючи лише з обрізаних елементів, а другий – з кожного елемента заміни.

Запропонована нами в [11] модифікація алгоритму LZ77 реалізується в два проходи: на першому виконується пошук замін по найближчих опрацьованих раніше пікселях (див. рис. 2), а на другому – віднаходження замін по словнику в основному для тих компонентів пікселів, які не увійшли в заміни першого проходу. Відповідно, орієнтацію довжин замін на цілі пікселі слід виконувати в кожному з цих проходів окремо.

Позначимо через *trimBestLength* кількість обрізаних елементів попередньої заміни, а через *bestLength* – довжину кращої віднайденної суміжної заміни з поточної позиції потоку, яка завжди перевищує 2 згідно обмежень формату Deflate. Початкове значення *trimBestLength* – це остача від ділення довжини попередньої заміни на 3, яка не перевищує 2. Тому, враховуючи ці обмеження, суміжна заміна буде неприйнятною, коли  $bestLength - trimBestLength = 1$  (тобто  $bestLength = 3$  і  $trimBestLength = 2$ ). З врахуванням цих позначень та обмежень фрагмент програми мовою C++ для пошуку замін по найближчих опрацьованих раніше компонентах під час першого проходу модифікованого алгоритму LZ77 з орієнтацією довжин замін на цілі пікселі може бути таким:



```

// шукаємо найдовше співпадіння по суміжних пікселях
LongestAdjacentMatch(bestLength, bestOffset);
// якщо знайдено заміну і вона перекриває крім обрізаних елементів
// попередньої заміни не менше двох суміжних елементів (є прийнятною)
if (bestLength>0 && (bestLength-trimBestLength!=1))
{if (LZLazyParsing && bestLength<=maxLenRoundPixelReplaceLiteral &&
    bestLength%3!=0) // якщо виконується орієнтування на пікселі і заміна
    // коротка і є що обрізати – обрізаємо знайдену заміну до пікселя
    {trimBestLength=bestLength%3; // кількість обрізаних елементів
    bestLength-=trimBestLength; // зменшуємо довжину заміни
    prevBestOffset=bestOffset; } // запам'ятовуємо зміщення заміни
    else trimBestLength=0; // інакше заміна не обрізається
    long adres=j*row_width+3*i+k; // адреса компоненти чергового пікселя
    for (i1=0; i1<bestLength; i1++) // зберігаємо зміщення віднайденної заміни
    {offsetAdjacentPixel[adres]=bestOffset;
    if (adres%3==2) adres+=3*step-2; // перехід до наступного пікселя
    else adres++; } // перехід до наступної компоненти
else // заміна не знайдена
// якщо є обрізані елементи попередньої заміни
if (LZLazyParsing && trimBestLength>0)
{offsetAdjacentPixel[j*row_width+3*i+k]=prevBestOffset; // то розширюємо її
trimBestLength--; } // зменшуємо кількість обрізаних елементів

```



А фрагмент програми для пошуку заміни по словнику з врахуванням заміни першого проходу під час другого проходу формування розкладу модифікованого алгоритму LZ77 з орієнтацією довжин заміни на цілі пікселі схематично може мати такий вигляд:

```

// шукаємо найдовше співпадіння по словнику та суміжних пікселях
LongestMatch(bestLength, bestOffset);
// якщо заміна відсутня або є непринятною суміжною заміною
if (bestLength==0 || (bestLength-trimPrevBestLength==1))
{... // переносимо поточну компоненту з буфера в словник
if (trimPrevBestLength==0) // обрізаних елементів з попередньої заміни немає
// записуємо у стиснуті дані поточний літерал
UBYTE1 literal=imageDataPredict[currentPosImage];
block_buffer[block_buffer_count]=literal;
length_table->IncrementFrequency(literal); }
else // повертаємо перший з обрізаних елементів в попередню заміну
{ // в розподілі літералів/довжин збільшуємо довжину попередньої заміни
UBYTE2 lenPrev=block_buffer [block_buffer_count-2]-256;
// зменшуємо частоту базового значення попередньої довжини заміни
LengthToCode(lenPrev, code, extra, value);
length_table->freq[code]--;
lenPrev++; // інкрементуємо довжину попередньої заміни
// зберігаємо збільшену довжину в стиснутих даних та частотах
block_buffer[block_buffer_count-2]=lenPrev+256;
LengthToCode(lenPrev, code, extra, value);

```

```
length_table->IncrementFrequency(code);
block_buffer_count--; // довжина стиснутих даних не збільшилася
trimPrevBestLength--; } // зменшуємо кількість обрізаних елементів
currentPosImage++; } // переходимо до наступної позиції
else // заміну знайдено
{ // якщо виконується орієнтування на пікселі і заміна коротка і є що
  // обрізати та куди записати – обрізаємо знайдену заміну до пікселя
  if (LZLazyParsing && bestLength<=maxLenRoundPixelReplaceLiteral &&
    bestLength%3!=0 && block_buffer_count<block_buffer_size-4)
  { trimPrevBestLength=bestLength%3; // кількість обрізаних елементів
    bestLength-=trimPrevBestLength; } // зменшуємо довжину заміни
  else
  trimPrevBestLength=0; // поточна заміна не обрізається
  // збільшуємо частоти базових значень довжини та зміщення заміни
  LengthToCode(bestLength, code, extra, value);
  length_table->IncrementFrequency(code);
  DistanceToCode(bestOffset, codeD, extra, value);
  distance_table->IncrementFrequency (codeD) ;
  // зберігаємо довжину та зміщення знайденої заміни в стиснутих даних.
  block_buffer [block_buffer_count] = 256 + bestLength;
  ++block_buffer_count ;
  block_buffer [block_buffer_count] = bestOffset;
  // модифікуємо хеш-ланцюги зі всіх літералів заміни
  for (unsigned int ii=0; ii<bestLength ; ii++)
  { ... // переносимо поточну компоненту з буфера в словник
    currentPosImage++; } }
```

**Проаналізуємо результати застосування** різних варіантів розкладу модифікованого алгоритму LZ77 з орієнтацією довжин замін на цілі пікселі (табл. 2) на прикладі прогресуючого ієрархічного стиснення зображень набору АСТ. Час декодування файлів, отриманих внаслідок застосування цих варіантів, практично не змінюється, оскільки розміри отриманих стиснутих зображень відрізняються несуттєво.

Таблиця 2

Коефіцієнти стиснення зображень набору АСТ  
після застосування різних варіантів розкладу модифікованого  
алгоритму LZ77 з орієнтацією довжин замін на цілі пікселі, vrb

Варіант розкладу модифікованого алгоритму LZ77	№ файла								Середній КС
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Без орієнтації на цілі пікселі	1.34	0.58	4.65	3.82	4.15	5.16	0.62	4.33	3.08
З орієнтацією на цілі пікселі під час першого проходу	1.34	0.57	4.65	3.81	4.15	5.16	0.62	4.32	3.08
З орієнтацією на цілі пікселі під час другого проходу	1.34	0.58	4.65	3.82	4.15	5.16	0.61	4.33	3.08
З орієнтацією на цілі пікселі під час двох проходів	1.34	0.57	4.65	3.81	4.15	5.16	0.60	4.33	3.08
З комбінованою орієнтацією на цілі пікселі	1.34	0.57	4.65	3.81	4.15	5.16	0.60	4.32	3.08
З комбінованою орієн- тацією на цілі пікселі та розрахунком прогно- зованих довжин кодів	1.34	0.56	4.65	3.81	4.15	5.15	0.60	4.32	3.07

Бачимо, що орієнтація довжин замін на цілі пікселі під час першого проходу модифікованого алгоритму LZ77 з пошуком замін по найближчих опрацьованих раніше компонентах дає змогу зменшити КС трьох зображень набору з восьми на 0.01 vrb, причому зменшення спостерігається як для дискретно-тонових, так і для фотореалістичних зображень. Така ж орієнтація в процесі другого проходу цього алгоритму з пошуком замін по словнику аналогічно зменшує КС лише для дискретно-тонового зображення № 7 і гірше проявляє себе на фотореалістичних зображеннях. І це не дивно, адже заміни по словнику мають більші зміщення від замін по найближчих опрацьованих пікселях і тому кодуються в середньому більшою кількістю бітів та можуть бути в подальшому відкинуті, як неефективні. Крім цього, орієнтація довжин замін на цілі пікселі під час першого проходу сповільнює кодування в середньому на 0.04 с, а під час другого – на 0.07 с.

Орієнтація довжин заміन на цілі пікселі під час двох проходів зменшує КС трьох зображень з восьми на 0.01–0.02 brb, аналогічно першому проходу, але погіршує відносно нього КС для фотореалістичного зображення № 8 та додатково сповільнює кодування в середньому на 0.01 с. Тому на практиці ми рекомендуємо використовувати **комбіновану орієнтацію довжин замін на цілі пікселі в процесі формування розкладу модифікованого алгоритму LZ77:**

1. Застосувати таку орієнтацію під час першого проходу з пошуком замін по найближчих опрацьованих раніше пікселях;

2. Визначити частку пікселів зображення, включених в заміни першого проходу.

3. Якщо частка пікселів, включених в заміни першого проходу, менше 80 % (наш критерій визначення того, що зображення не дискретно-тонове), то відмовитися від орієнтації на цілі пікселі в процесі другого проходу алгоритму LZ77.

Така комбінована орієнтація довжин замін алгоритму LZ77 на цілі пікселі (п'ятий рядок табл. 2) зменшує КС 50% зображень набору АСТ на 0.01–0.02 brb і сповільнює кодування в середньому лише на 0.05 с. Вплив цієї модифікації розкладу алгоритму LZ77 на решту зображень набору обмежується сотнями байтів і тому не впливає на показники табл. 2. Додатковий розрахунок прогнозованих довжин кодів розподілу літералів/довжин формату Deflate в процесі комбінованої орієнтації довжин замін дає змогу зменшити середні КС зображень набору АСТ до 3.07 brb (останній рядок табл. 2), хоча й сповільнює кодування у середньому ще на 0.17 с.

З наведених результатів дослідження приходимо до таких висновків:

1. Підвищити ефективність застосування класичного алгоритму LZ77 з пошуком по словнику в процесі прогресуючого ієрархічного стиснення зображень без втрат можливо за рахунок додаткового попереднього проходу пікселів зображення з пошуком однакових послідовностей, починаючи з найближчих опрацьованих раніше пікселів. Такий додатковий прохід дає змогу зменшити КС за рахунок однакових послідовностей, не включених в словник, та використання менших зміщень для найближчих опрацьованих пікселів.
2. Словникові алгоритми суттєво зменшують КС насамперед штучних дискретно-тонових зображень, оскільки такі зображення містять

багато однакових суміжних послідовностей яскравостей компонентів пікселів.

3. Додатково зменшити КС модифікованого алгоритму LZ77 для окремих зображень максимум на 0.02 bpb можливо шляхом орієнтації його розкладу на цілі пікселі. При цьому під час першого проходу даного алгоритму таку орієнтацію доцільно застосовувати для всіх, а під час другого – лише для дискретно-тонових зображень. Це дає змогу не збільшувати КС для всіх зображень і сповільнює кодування в середньому лише на 0.05 с.



Надалі, з метою додаткового зменшення розмірів файлів стиснутих зображень і прискорення декодування, ми плануємо вдосконалити алгоритм зменшення розміру сформованих Deflate-блоків [10] та пристосувати його до прогресуючого ієрархічного стиснення зображень без втрат.

1. Cormen T. H., Leiserson C. E., Rivest R. L., Stein C. Introduction to Algorithms, Third Edition. Kiyv : Dialektika, 2020. Vol. 1. 648 p.
2. Shportko A., Postolatii V. Development of Predictors to Increase the Efficiency of Progressive Hierarchic Context-Independent Compression of Images Without Losses. *Proceedings of the 5th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems (COLINS 2021)* (Kharkiv, 22–23 apr. 2021). Volume I. ceur-ws.org, P. 1026–1038.
3. Сэломон Д. Сжатие данных, изображений и звука. Москва : Техносфера, 2006. 368 с.
4. Миано Дж. Форматы и алгоритмы сжатия изображений в действии. Москва : Триумф, 2003. 336 с.
5. Ватолин Д., Ратушняк А., Смирнов М., Юкин В. Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео. Москва : ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. 384 с.
6. Deutsch P. DEFLATE Compressed Data Format Specification version 1.3. RFC 1951. Alladin enterprises, 1996. 15 p.
7. Ziv J., Lempel A. A universal algorithm for sequential data compression. *IEEE Transactions on Information Theory*. May 1977. Vol. 23(3). P. 337–343.
8. Huffman D. A Method for the Construction of Minimum Redundancy Codes. *Proceedings of the IRE*. Sept. 1952. Vol. 40(9). P. 1098–1101.
9. Уэлстид С. Фракталы и вейвлеты для сжатия изображений в действии. Москва : Триумф, 2003. 320 с.
10. Шпортько О. В. Оптимізація застосування модифікованого формату словникової компресії Deflate у процесі прогресуючого ієрархічного стиснення зображень без втрат. *Науковий вісник Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича. Сер. Комп'ютерні системи та компоненти*. 2013. Вип. 4. Т. 4. С. 40–52.
11. Шпортько О. В., Шпортько Л. В., Бомба А. Я. Підвищення ефективності застосування словникових методів компресії для прогресуючого ієрархічного стиснення зображень без втрат. *Вісник*

Національного університету водного господарства та природокористування.  
Сер. Технічні науки. Рівне : НУВГП, 2021. Вип. 4 (96). С. 130–145.

## REFERENCES:

1. Cormen T. H., Leiserson C. E., Rivest R. L., Stein C. Introduction to Algorithms, Third Edition. Kiyv : Dialektika, 2020. Vol. 1. 648 p.
  2. Shportko A., Postolatii V. Development of Predictors to Increase the Efficiency of Progressive Hierarchic Context-Independent Compression of Images Without Losses. *Proceedings of the 5th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems (COLINS 2021)* (Kharkiv, 22–23 apr. 2021). Volume I. ceur-ws.org, P. 1026–1038.
  3. Selomon D. Szhatie dannykh, izobrazheniy i zvuka. Moskva : Tekhnosfera, 2006. 368 p.
  4. Miano Dj. Formaty i algoritmy sjatiya izobrazheniy v deystvii. Moskva : Triumf, 2003. 336 s.
  5. Vatolin D., Ratushnyak A., Smirnov M., YUkin V. Metody sjatiya dannyih. Ustroystvo arhivatorov, sjatie izobrazheniy i video. Moskva : DIALOG-MIFI, 2003. 384 s.
  6. Deutsch P. DEFLATE Compressed Data Format Specification version 1.3. RFC 1951. Alladin enterprises, 1996. 15 p.
  7. Ziv J., Lempel A. A universal algorithm for sequential data compression. *IEEE Transactions on Information Theory*. May 1977. Vol. 23(3). P. 337–343.
  8. Huffman D. A Method for the Construction of Minimum Redundancy Codes. *Proceedings of the IRE*. Sept. 1952. Vol. 40(9). P. 1098–1101.
  9. Uelstid S. Fraktaly i veyvlety dlya sjatiya izobrazheniy v deystvii. Moskva : Triumf, 2003. 320 s.
  10. Shportko O. V. Optymizatsiia zastosuvannya modyfikovanoho formatu slovnkovoi kompresii Deflate u protsesi prohresuiuchoho iierarkhichnoho stysnennia zobrazhen bez vtrat. *Naukovyi visnyk Chernivetskoho natsionalnoho universytetu imeni Yuriiia Fedkovycha. Ser. Kompiuterni systemy ta komponenty*. 2013. Vyp. 4. T. 4. S. 40–52.
  11. Shportko O. V., Shportko L. V., Bomba A. Ya. Pidvyshchennia efektyvnosti zastosuvannya slovnkovykh metodiv kompresii dlia prohresuiuchoho iierarkhichnoho stysnennia zobrazhen bez vtrat. *Visnyk Natsionalnoho universytetu vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannia. Ser. Tekhnichni nauky*. Rivne : NUVHP, 2021. Vyp. 4 (96). S. 130–145.
-

**Shportko A. V., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor** (Academician Stepan Demianchuk International University of Economics Humanities, Rivne), **Shportko L. V., Senior Lecturer** (Vocational College of Economics and Business, Rivne), **Bomba A. Ya., Doctor of Engineering, Professor** (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)



Національний водно-енергетичний університет України  
**FORMATION OF THE DECOMPOSITION OF THE MODIFIED LZ77  
ALGORITHM IN DEFLATE FORMAT WITH ORIENTATION OF LENGTHS OF  
THE SAME SEQUENCES ON WHOLE PIXELS**

The article analyzes the interaction of the main stages of lossless image compression and the format of Deflate dictionary compression. The advantages and disadvantages of «greedy» and «lazy» schedules of the LZ77 algorithm as part of the Deflate format are described. The expediency of redistribution of adjacent substitution lengths of the modified LZ77 algorithm with their orientation on whole pixels in the process of progressive hierarchical compression of lossless images is substantiated. It is established that during the first pass of this algorithm with search of identical sequences of the nearest previously processed pixels the orientation on whole pixels should be applied to all graphic files, and during the second pass with the search of identical sequences in the dictionary – only for discrete images. The results of the application of different schedules of the modified LZ77 algorithm for image compression of the ACT set are presented.

According to the results of the study, the following conclusions were made:

1. It is possible through additional pre-passage of image pixels in search of identical sequences, starting from the nearest previously processed pixels to increase the efficiency of the classical algorithm LZ77 with dictionary search in the process of progressive hierarchical compression of lossless images. This additional pass allows to reduce the compression ratios due to the same sequences which are not included in the dictionary, and the use of smaller offsets for the nearest processed pixels.

2. Vocabulary algorithms reduce the compression ratios of primarily artificial discrete-tone images significantly, as such images contain many of the same adjacent sequences of brightness of the

**pixel components.**

**3. It is possible to further reduce the compression ratio of the modified LZ77 algorithm for individual images by a maximum of 0.02 bpb by combining its decomposition into whole pixels. This orientation allows not to increase the compression ratios for all images and slows down the encoding by an average of only 0.05 s.**

**Keywords: schedules LZ77 dictionary algorithm; progressive image compression; lossless compression.**



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

---



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування



Уляньчук-Мартинюк О. В., аспірант (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

## АЛГОРИТМИ ЧИСЛОВОГО УРАХУВАННЯ ІНТЕГРАЛЬНИХ УМОВ СПРЯЖЕННЯ В МОДЕЛЯХ СЕРЕДОВИЩ З ГЕОБАР'ЄРАМИ



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

В статті, на прикладі задачі вологоперенесення, розглянуто алгоритмічні особливості математичного і комп'ютерного моделювання фізико-хімічних процесів в пористих середовищах із тонкими включеннями (геобар'єрами). Використовуючи модифіковані умови спряження сформовано математичну модель процесу вологоперенесення в масиві ґрунту, який містить одне тонке включення. Наведено схему числового розв'язання відповідної початково-крайової задачі методом скінченних елементів та доведено теореми про точність наближених узагальнених розв'язків. Розглянуто схеми урахування інтегральної умови спряження. Запропоновано три типи алгоритмів. Перший алгоритм ґрунтується на лінійній апроксимації поля напорів всередині включення, використовуючи знайдені граничні значення зліва та справа від його (включення). Другий алгоритм базується на обчисленні інтеграла в інтегральній умові спряження із застосуванням теореми про середнє. В третьому алгоритмі запропоновано всередині включення ввести внутрішній вузол, через скінченнорізницький метод знайти в ньому значення напорів та апроксимувати їх (напори) шляхом квадратичної інтерполяції. Числові експерименти показали, що значення вологості на включенні при застосуванні першого та другого алгоритмів відрізняються не більше ніж на 1%. Відносні різниці вологості при застосуванні першого та третього алгоритмів, як правило, лежать в межах 3%, але інколи можуть досягати 5.5%.

**Ключові слова:** числовий алгоритм; умова спряження; стрибок вологості; геобар'єр.

**Вступ.** В роботах [1–9] обґрунтована необхідність, з точки зору фізики процесів в середовищах з тонкими включеннями, модифікації класичних умов спряження неідеального контакту. Така необхідність обумовлена залежністю теплогідропровідності тонких включень від

впливу зовнішніх факторів – змінної вологості, температури, концентрації хімічних речовин, пористості. В класичних умовах спряження неідеального контакту цих фактів не враховано [10–12].

В роботі [1] досліджено вплив залежності коефіцієнта вологоперенесення матеріалу тонкого включення від напорів на значення стрибка напорів на самому включенні. На прикладі модельної задачі, в результаті числових експериментів, показано, що відносні різниці в значеннях стрибків напорів при використанні класичної та модифікованої умов спряження неідеального контакту можуть сягати 34.7% (як в сторону збільшення, так і в сторону зменшення).

В роботі [4] досліджено вплив напівпроникних властивостей глини як матеріалів геобар'єрів на значення концентрації забруднень, які проникають крізь нього (глинистий бар'єр). При цьому коефіцієнт ідеальності геобар'єра як напівпроникної мембрани залежить від концентрації забруднень на вході (і це враховано в математичній моделі). Згідно з числовими експериментами, якщо зовсім знехтувати напівпроникними властивостями глинистого геобар'єра, або коефіцієнт ідеальності вважати сталим, то це призводить у відносних змінах концентрації забруднень, що поширюються за геобар'єр, в межах від -5.5% до +8.5% (це при умові застосування модифікованої умови спряження). Більше того, якщо в якості умови спряження неідеального контакту використовувати класичну, то відмінності в прогностичних концентраціях за межами геобар'єра (наприклад, через 2 роки) сягають 4-кратних значень в порівнянні з випадком використання модифікованих умов.

В роботі [6], окрім показника ідеальності геобар'єра, враховано ще й вплив хімічного осмосу. Результати числових експериментів показують, що як напівпроникність включення, так і урахування осмотичних явищ є важливими в прогностичних розрахунках. Наприклад, при нехтуванні показником ідеальності геобар'єра та осмосом рівень забруднення за геобар'єром через три роки вже становить 175 мМ, а перед геобар'єром – 220 мМ і стрибок концентрації забруднень на геобар'єрі – 45 мМ. При одночасному урахуванні ступеня ідеальності (який теж залежить від концентрації забруднень) та осмосу рівень забруднень за геобар'єром становить 29 мМ, а перед – 147 мМ. Враховуючи довготривалість процесу, прогнозована кількість забруднюючих речовин, що виходить за межі сховищ відходів у ґрунтові води, може значно змінюватися в

залежності від умов вирішення задачі.

В роботі [5] авторами досліджено вплив біокольматації геобар'єра сховища органічних відходів на значення стрибків напорів. Сформовано математичну модель фільтрації органічних речовин з урахуванням ефекту біокольматації. Математична модель містить рівняння фільтрації в умовах змінної пористості. Також в математичну модель входить рівняння перенесення органічних хімічних речовин в поровій рідині пористого середовища та рівняння динаміки біомаси бактерій в пористому середовищі на основі рівняння Моно. Як відмічено в [5], числові експерименти показали, що наявність мікроорганізмів у порах ґрунту значно впливає на значення напорів зверху та знизу геобар'єра. Зокрема, відносні зміни в стрибках напорів, в порівнянні із випадком нехтування впливом мікроорганізмів, можуть сягати 54,8% в сторону збільшення. Такі відмінності, в свою чергу, призводять до змін у прогнозних розрахунках поширення забруднень зі сховищ відходів у ґрунтові води.

В роботі [8] розглянуто поширення органічної хімічної речовини та процес фільтрації в ґрунті, який (ґрунт) містить тонкий геохімічний бар'єр. На відміну від попередньої роботи динаміку зміни мікроорганізмів в пористому середовищі описано дифузійним рівнянням. Умови спряження, як складова частина математичної моделі фільтрації хімічних речовин на випадок неоднорідності пористих середовищ та наявності тонких включень, модифіковано для випадку впливу біокольматації. Числовий розв'язок відповідної нелінійної крайової задачі з модифікованими умовами спряження знайдено методом скінченних елементів. Зазначено умови, за яких існує єдиний узагальнений розв'язок відповідної крайової задачі. Наведено результати щодо теоретичної точності скінченноелементних розв'язків. На тестовому модельному прикладі фільтраційної консолідації ґрунту в основі сховища твердих побутових відходів проаналізовано відмінності в значеннях стрибків напорів на тонкому геохімічному бар'єрі для розглянутого в статті та класичного випадків. Так, для випадку урахування впливу біокольматації надлишкові напори через 600 діб після початку процесу сягають 25% від їх початкового значення. Водночас для тестового випадку без урахування вказаного ефекту – лише 6%. Уповільнене розсіювання надлишкових напорів в околі геобар'єра означає меншу швидкість руху порової рідини через геобар'єр. Такий

ефект пояснюється біокольтматацією і має свою позитивну сторону – уповільнене поширення забруднень із верхніх шарів ґрунту в нижні. В даному випадку функції геобар'єра як захисної споруди від поширення забруднень підсилюються. Оскільки матеріалом для штучних геобар'єрів, як правило, є глини, то високі надлишкові напори та їх стрибки можуть стати причиною зменшення стійкості та зростання ризику зсувів, формування зсувонебезпечних зон, що особливо актуально для великих сховищ відходів.

Як видно з огляду, в попередніх авторських наукових роботах увага зосереджена на числових дослідженнях впливу модифікації умов спряження для геобар'єра на значення стрибків досліджуваних функцій на ньому. Однак алгоритмічні аспекти методики урахування таких модифікованих умов спряження, які містять інтеграли по товщині включення, в числовому розв'язуванні крайових задач детально не розглядались. Це і становить основну мету цієї статті.

**Математична модель задачі вологоперенесення в неоднорідному масиві ґрунту.** Для прикладу розглянемо процес вологоперенесення в неоднорідному масиві ґрунту в одновимірному випадку, який (процес) описується наступною крайовою задачею [1; 9]:

$$\beta(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k(h) \frac{\partial h}{\partial x} \right), \quad (x, t) \in Q_T; \quad (1)$$

$$h(x, t)|_{x=0} = 0, \quad t \in (0; T]; \quad (2)$$

$$u(x, t)|_{x=l} = -k(h) \frac{\partial h}{\partial x} \Big|_{x=l} = 0, \quad t \in (0; T]; \quad (3)$$

$$h(x, 0) = h_0(x), \quad x \in \bar{\Omega}; \quad (4)$$

$$u^\pm \Big|_{x=\xi} = \left( -k(h) \frac{\partial h}{\partial x} \right)^\pm \Big|_{x=\xi} = - \frac{[h]}{\int_0^d \frac{dx}{k_\omega(h)}}. \quad (5)$$

Тут  $Q_T = \Omega \times (0; T]$ ,  $Q_T^1 = \Omega_1 \times (0; T]$ ,  $Q_T^2 = \Omega_2 \times (0; T]$ ,  $\Omega = \Omega_1 \cup \Omega_2$ ,  $\Omega_1 = (0; \xi)$ ,  $\Omega_2 = (\xi; l)$ ,  $0 < \xi < l$ ;  $h_0(x)$ ,  $\beta(h)$ ,  $k(h)$ ,  $k_\omega$  – відомі функції. Функція  $h_0(x)$  має бути неперервною на кожному з відрізків  $[0; \xi]$ ,  $[\xi; l]$ . Відмітимо, що в (1)–(5)

$$k(h) = \begin{cases} k_1(h), & x \in \Omega_1; \\ k_2(h), & x \in \Omega_2; \end{cases} \quad \beta(h) = \begin{cases} \beta_1(h), & x \in \Omega_1; \\ \beta_2(h), & x \in \Omega_2. \end{cases}$$

Оскільки основна мета статті стосується алгоритмів числового урахування модифікованої умови спряження (5) при наближеному розв'язанні початково-крайової задачі (1)–(5), то відмітимо наступні, не принципові для досягнення мети, спрощення. По перше, в рівнянні (1), як і в швидкості руху вологи  $u(x, t)$ , знехтувано гравітаційною складовою руху вологи. По друге, граничні умови (2) та (3) прийнято однорідними.

Модифікована умова спряження (5), яка містить інтеграл по товщині включення, виведена в [9] із припущення (в силу тонкості включення), що процеси вологоперенесення в поперечному перерізі даного включення є стаціонарними (або принаймні квазістаціонарними). Таким чином для включення розглядалась наступна задача вологоперенесення:

$$\frac{d}{d\zeta} \left( -k_\omega(h) \frac{dh}{d\zeta} \right) = 0, \quad 0 < \zeta < d, \quad (6)$$

$$h(0) = h^-, \quad h(d) = h^+, \quad (7)$$

де  $k_\omega(h)$  – коефіцієнт вологоперенесення тонкого включення, який нелінійно залежить від вологості, а отже – і від напорів.

Припустимо, що функція  $h_0(x)$  є неперервною на кожному із замикань  $\bar{\Omega}_1, \bar{\Omega}_2$ . Також стосовно функцій  $\beta, k, k_\omega$  припустимо, що

$$0 < \beta_{min} \leq \beta(s_1) \leq \beta_{max} < \infty,$$

$$0 < k_{min} \leq k(s_1) \leq k_{max} < \infty,$$

$$0 < k_{\omega, min} \leq k_\omega(s_1) \leq k_{\omega, max} < \infty,$$

$\forall s_1 \in (-\infty; +\infty)$ ;  $\beta_{min}, \beta_{max}, k_{min}, k_{max}, k_{\omega, min}, k_{\omega, max}$  – додатні константи;

2)

$$|\beta(s_1) - \beta(s_2)| \leq \beta_L |s_1 - s_2|, \quad 0 < \beta_L < \infty;$$

$$|k(s_1) - k(s_2)| \leq k_L |s_1 - s_2|, \quad 0 < k_L < \infty;$$

$$|k_\omega(s_1) - k_\omega(s_2)| \leq k_{\omega, L} |s_1 - s_2|, \quad 0 < k_{\omega, L} < \infty.$$

Також функції  $\beta = \beta(h)$ ,  $k = k(h)$  мають бути неперервними на  $\overline{\Omega}_1$ ,  $\overline{\Omega}_2$ , а  $k = k(h)$  ще й неперервно диференційованою на  $\Omega_1$ ,  $\Omega_2$ .

**Означення 1.** Класичним розв'язком початково-крайової задачі (1)–(5), який допускає розрив першого роду в точці  $x = \xi$ , називається функція  $h(x, t) \in \Psi$ , яка задовольняє  $\forall (x, t) \in \overline{Q}_T$  рівнянню (1) та початковій умові (4).

В означенні 1  $\Psi$  – це множина функцій  $\psi(x, t)$ , які, разом із  $\frac{\partial \psi}{\partial x}$ , неперервні на кожному із замикань  $\overline{Q}_T^1$ ,  $\overline{Q}_T^2$ , мають обмежені

неперервні частинні похідні  $\frac{\partial \psi}{\partial t}$ ,  $\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2}$  на  $Q_T^1$ ,  $Q_T^2$  та задовольняють умовам (2), (3), (5).

Для подальших викладок відмітимо ще один аспект. В класичну умову спряження неідеального контакту (див. [10, С. 291, формула (7.4)])  $\left( \chi(x, u) \frac{\partial u}{\partial x} \right) \Big|_{x=\xi} = r[u]$  входить деяка відома константа  $r$ , причому  $0 < r_0 \leq r < \infty$ . Розглянемо умову (5). При виконанні третьої з умов 1) для коефіцієнта в правій частині умови спряження (5)



$$\left( -k(h) \frac{\partial h}{\partial x} \right) \Big|_{x=\xi} = - \frac{[h]}{d \int_0^d \frac{dx}{k_\omega(h)}}$$

$$\frac{d}{k_{\omega, \max}} \leq \int_0^d \frac{dx}{k_\omega(h)} \leq \frac{d}{k_{\omega, \min}}$$

Далі

$$k_{\omega, \min} \frac{[h]}{d} \leq \frac{[h]}{d \int_0^d \frac{dx}{k_\omega(h)}} \leq k_{\omega, \max} \frac{[h]}{d}$$

Тобто у випадку модифікованої умови спряження (5) маємо

$$0 < \frac{k_{\omega, \min}}{d} \leq r \leq \frac{k_{\omega, \max}}{d} < \infty. \quad (8)$$

Оцінка (8) дозволяє нам узагальнити теореми, доведені в роботах [10–12] для задач з класичною умовою спряження неідеального контакту, на випадок модифікованої умови спряження (5).

**Узагальнений розв'язок задачі (1)–(5).** Аналогічно [10; 11], нехай  $H_0$  – простір функцій  $s(x)$  які на кожній з областей  $\Omega_i$  належать простору Соболева  $W_2^1(\Omega_i)$ ,  $i=1,2$ , причому вони набувають нульових значень на кінцях відрізка  $[0; l]$  де для функції  $h(x, t)$  задані граничні умови першого роду.

Нехай  $h(x, t) \in \Psi$  – класичний розв'язок початково-крайової задачі (1)–(5). Візьмемо  $s(x) \in H_0$ . Домножимо рівняння (1) та початкову умову (4) на  $s(x)$ . Інтегруючи їх на відрізку  $[0; l]$  та враховуючи умови спряження (5), отримаємо

$$\int_0^l \beta(h) \frac{\partial h}{\partial t} s(x) dx + \int_0^l k(h) \frac{\partial h}{\partial x} \frac{ds}{dx} dx + \frac{[h][s]}{\int_0^l \frac{dx}{k_\omega(h)}} = 0, \quad (9)$$

$$\int_0^l h(x, 0) s(x) dx = \int_0^l h_0(x) s(x) dx. \quad (10)$$

Отже, якщо  $h(x, t) \in \Psi$  є класичним розв'язком початково-крайової задачі (1)–(5), то  $h(x, t)$  – розв'язок задачі (9), (10) в слабкій постановці.

Нехай  $H$  – простір функцій  $v(x, t)$ , які інтегровані з квадратом разом зі своїми першими похідними  $\frac{\partial v}{\partial t}$ ,  $\frac{\partial v}{\partial x}$  на кожному з інтервалів  $(0; \xi)$ ,  $(\xi; l)$ ,  $\forall t \in [0; T)$ ,  $T > 0$ , причому вони задовольняють граничні умови першого роду, що і функція  $h(x, t)$ .

**Означення 2.** Функція  $h(x, t) \in H$ , котра для будь-якої  $s(x) \in H_0$  задовольняє інтегральним співвідношенням (9), (10), називається узагальненим розв'язком початково-крайової задачі (1)–(5).

Наближений узагальнений розв'язок початково-крайової задачі (1)–(5) будемо шукати у вигляді

$$\widehat{h}(x, t) = \sum_{i=1}^N h_i(t) \varphi_i(x), \quad (11)$$

де  $\{\varphi_i(x)\}_{i=1}^N$  – базис скінченновимірного підпростору  $M_0 \subset H_0$ ;  $h_i(t), i = \overline{1, N}$  – невідомі коефіцієнти, які залежать лише від часу.

Сукупність функцій, які можна подати у вигляді (11), породжують скінченновимірний підпростір  $M_1 \subset H_1$ .

**Означення 3.** Наближеним узагальненим розв'язком початково-крайової задачі (1)–(5) називається функція  $\widehat{h}(x, t) \in M_1$ , яка для довільної функції  $S(x) \in M_0$  задовольняє інтегральним співвідношенням

$$\int_0^l \beta(\widehat{h}) \frac{\partial \widehat{h}}{\partial t} S(x) dx + \int_0^l k(\widehat{h}) \frac{\partial \widehat{h}}{\partial x} \frac{dS}{dx} dx + \frac{[\widehat{h}][S]}{\int_0^d \frac{dx}{k_\omega(\widehat{h})}} = 0, \quad (12)$$

$$\int_0^l \widehat{h}(x, 0) S(x) dx = \int_0^l h_0(x) S(x) dx. \quad (13)$$

Далі із слабкого формулювання (12), (13) отримаємо (покладаючи функцію  $S(x)$  рівною кожній базисній функції  $\varphi_i(x), i = \overline{1, N}$ ) задачу Коші для системи нелінійних диференціальних рівнянь

$$\mathbf{M}(\mathbf{H}) \frac{d\mathbf{H}}{dt} + \mathbf{L}(\mathbf{H}) \mathbf{H}(t) = \mathbf{0}, \quad (14)$$

$$\widetilde{\mathbf{M}} \mathbf{H}^{(0)} = \widetilde{\mathbf{F}} \quad (15)$$

де

$$\widetilde{\mathbf{F}} = (\tilde{f}_i)_{i=1}^N, \quad \widetilde{\mathbf{M}} = (\tilde{m}_{ij})_{i,j=1}^N, \quad \mathbf{M} = (m_{ij})_{i,j=1}^N, \quad \mathbf{L} = (l_{ij})_{i,j=1}^N,$$

$$\mathbf{H} = (h_i(t))_{i=1}^N, \quad \mathbf{H}^{(0)} = (h_i(0))_{i=1}^N, \quad \tilde{m}_{ij} = \int_0^l \varphi_i \varphi_j dx,$$

$$m_{ij} = \int_0^l \beta(\widehat{h}) \varphi_i \varphi_j dx, \quad l_{ij} = \int_0^l k(\widehat{h}) \frac{d\varphi_i}{dx} \frac{d\varphi_j}{dx} dx + \frac{[\varphi_i][\varphi_j]}{\int_0^d \frac{dx}{k_\omega(\widehat{h})}}.$$



При виконанні першої з умов 1) квадратна матриця  $\mathbf{M}(\mathbf{H})$  є симетричною та додатно визначеною. Зважаючи на додатність коефіцієнтів  $k$ ,  $k_\omega$ , а також висловлені припущення 1) щодо їх обмеженості, матриця  $\mathbf{L}(\mathbf{H})$  також буде симетричною та додатно визначеною [11, стор. 417]. Далі, аналогічно до [11, задача (3.14)

глави 8], запишемо систему (14) у вигляді  $\frac{d\mathbf{H}}{dt} = \Phi(\mathbf{H})$ , де

$\Phi(\mathbf{H}) = -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{L}(\mathbf{H})\mathbf{H}(t)$ . Функції  $\Phi(\mathbf{H})$ ,  $\partial\Phi/\partial\mathbf{H}$  є неперервними.

Отже, існує єдиний наближений узагальнений розв'язок  $\widehat{h}(x, t) \in M_1$  початково-крайової задачі (1)–(5).

Введемо в розгляд наступні норми [11, С. 380]:

$$\|u\|_{L_2}^2 = \int_0^l u^2(x, t) dx, \quad \|u\|_{H_0^1}^2 = \left\| \frac{\partial u}{\partial x} \right\|_{L_2}^2,$$

$$\|u\|_{L_2 \times L_2}^2 = \|u\|_{L_2(Q_T)}^2 = \int_0^T \int_0^l u^2(x, t) dx dt,$$

$$\|u\|_{H_0^1 \times L_2}^2 = \int_0^T \|u\|_{H_0^1}^2 dt = \int_0^T \int_0^l \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 dx dt, \quad \|u\|_{L_2 \times L_\infty} = \sup_{t \in (0; T)} \|u(\cdot, t)\|_{L_2},$$

$$\|\nabla_x u\|_{L_\infty \times L_\infty} = \sup_{(x, t) \in Q_T} \left| \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} \right|, \quad \|u\|_{W_2^1 \times L_2}^2 = \int_0^T \int_0^l \left( u^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \right) dx dt,$$

$$\| [u] \|_{L_2}^2 = \int_0^T [u]^2 dt = \int_0^T (u(\xi + 0, t) - u(\xi - 0, t))^2 dt.$$

Аналогічно [11, С. 380, теорема 1] можна довести наступну теорему

**Теорема 1.** Нехай  $h(x, t)$  – класичний розв'язок початково-крайової задачі (1)–(5), а  $\widehat{h}(x, t)$  – наближений узагальнений розв'язок цієї задачі з простору  $M_1$ . Тоді при виконанні умов 1), 2), накладених на  $\beta$ ,  $k$ ,  $k_\omega$ , враховуючи (8), існують такі додатні сталі величини  $c$ ,  $\delta_1$ ,  $\delta_2$ , що для довільної функції  $\tilde{h}(x, t) \in M_1$  виконується нерівність

$$\|h - \hat{h}\|_{L_2 \times L_\infty}^2 + \delta_1 \|h - \hat{h}\|_{H_0^1 \times L_2}^2 + \delta_2 \| [h - \hat{h}] \|_{L_2}^2 \leq \left\{ \|h - \tilde{h}\|_{L_2 \times L_\infty}^2 + \|h - \tilde{h}\|_{H_0^1 \times L_2}^2 + \| [h - \tilde{h}] \|_{L_2}^2 + \left\| \frac{\partial(h - \tilde{h})}{\partial t} \right\|_{L_2 \times L_2}^2 \right\} \quad (16)$$

Залежність (16) використовується при оцінці точності методу скінченних елементів.

**Метод скінченних елементів.** Покриємо замикання  $\bar{\Omega}_1 \cup \bar{\Omega}_2$  скінченноелементною сіткою із загальною кількістю вузлів  $N$ . Причому в точці  $x = \xi$  має бути подвійна нумерація – вузла зліва  $x = \xi - 0$  та вузла справа  $x = \xi + 0$ . Нехай в (8)  $\varphi_i(x)$  – базисні функції методу скінченних елементів, які допускають розрив першого роду в точці  $x = \xi$  і є поліномами степеня  $m$ . Тоді простір функцій  $\hat{h}(x, t)$  вигляду (11) із зазначеними базисними функціями позначимо через  $H_m^N$ .

**Теорема 2.** Нехай класичний розв'язок  $h(x, t)$  початково-крайової задачі (1)–(5) має обмежені на  $Q_T^i$ ,  $i = 1, 2$ , частинні похідні

$\frac{\partial^{m+1}(\cdot)}{\partial x^{m+1}}$ ,  $\frac{\partial^{m+2}(\cdot)}{\partial x^{m+1} \partial t}$ . Тоді для наближеного узагальненого розв'язку

$\hat{h}(x, t) \in H_m^N$  має місце оцінка

$$\|h - \hat{h}\|_{W_2^1 \times L_2} \leq c h_{max}^m,$$

де  $m$  – степінь поліномів МСЕ,  $c = const > 0$ ,

$h_{max} = \max_{i=1, N-1} (x_{i+1} - x_i)$ ,  $[x_i; x_{i+1}]$  – скінченні елементи.

Доведення. Справедливість теореми впливає з оцінки (16) при врахуванні оцінок інтерполяції [11, С. 387, теорема 2].

**Схеми дискретизації в часі.** Задача (14), (15) є задачею Коші для системи нелінійних диференціальних рівнянь першого порядку. Відшукування її розв'язку теж вимагає застосування відповідних схем дискретизації. В [12] обґрунтовано застосування схеми Кранка – Ніколсона

$$\mathbf{M}\left(\frac{1}{2}(\mathbf{H}^{(j+1)} + \mathbf{H}^{(j)})\right) \frac{\mathbf{H}^{(j+1)} - \mathbf{H}^{(j)}}{\tau} + \mathbf{L}\left(\frac{1}{2}(\mathbf{H}^{(j+1)} + \mathbf{H}^{(j)})\right) \times \\ \times \frac{1}{2}(\mathbf{H}^{(j+1)} + \mathbf{H}^{(j)}) = \mathbf{0}, \quad j = 0, 1, 2, \dots, m_\tau - 1. \quad (17)$$

Тут часовий відрізок  $[0; T]$  розбитий на  $m_\tau$  рівних частин з кроком  $\tau = \frac{T}{m_\tau}$ ;  $\mathbf{H}^{(j)}$  – наближений розв'язок задачі Коші (14), (15) при  $t = j\tau$ .

Також введемо наступні позначення:  $h_j$  – класичний розв'язок початково-крайової задачі (1)–(5) при  $t = j\tau$ ;  $\hat{h}_j$  – наближений узагальнений розв'язок початково-крайової задачі (1)–(5) при  $t = j\tau$ ;  $\phi_{j+1/2} = \frac{1}{2}(\phi_{j+1} + \phi_j)$ ;  $z_j = h_j - \hat{h}_j$ .

Враховуючи (8), аналогічно до теореми 5 [11, розділ 8] справедлива.

**Теорема 3.** Нехай  $h(x, t)$  – класичний розв'язок початково-крайової задачі (1)–(5). Нехай функції  $\frac{\partial h}{\partial t}$ ,  $\frac{\partial h}{\partial x}$  двічі неперервно диференційовні по часу на  $\bar{Q}_T^i$ ,  $i = 1, 2$ . Також припустимо, що похідні  $\frac{\partial^3 h}{\partial t^3}$ ,  $\frac{\partial^3 h}{\partial t^2 \partial x}$  рівномірно обмежені по модулю константою  $c_1$ ,  $\forall (x, t) \in \bar{Q}_T$ . Якщо виконуються умови 1), 2), тоді існують додатні постійні величини  $c$ ,  $\delta_1$ ,  $r_0$ ,  $\tau_0$ , які залежать від констант з умов 1), 2), а також  $T$ ,  $l$ , такі, що  $\forall \tau \leq \tau_0$  для класичного розв'язку  $h(x, t)$ , і для наближеного узагальненого розв'язку, отриманого за допомогою схеми Кранка – Ніколсона,  $\hat{h}(x, t) \in M_1$ , відповідно задач (1)–(5) та (14), (15) виконується нерівність

$$\|z_{m_\tau}\|_{L_2}^2 + \delta_1 \sum_{j=0}^{m_\tau-1} \|z_{j+1/2}\|_{H_0^1}^2 \tau + r_0 \sum_{j=0}^{m_\tau-1} [z_{j+1/2}]^2 \tau \leq \\ \leq c \left( \sum_{j=0}^{m_\tau-1} \|(h - \hat{h})_{j+1/2}\|_{H_0^1}^2 \tau + \sum_{j=1}^{m_\tau-1} \left\| \frac{(h - \hat{h})_{j+1/2} - (h - \hat{h})_{j-1/2}}{\tau} \right\|_{L_2}^2 \tau + \right.$$

$$\begin{aligned}
 & + \sum_{j=0}^{m_\tau-1} \left[ (h - \tilde{h})_{j+1/2} \right]^2 \tau + \left\| (h - \tilde{h})_0 \right\|_{L_2}^2 + \\
 & + \left\| (h - \tilde{h})_{m_\tau-1/2} \right\|_{L_2}^2 + \left\| (h - \tilde{h})_{1/2} \right\|_{L_2}^2 + O(\tau^4), \forall \tilde{h} \in M_1.
 \end{aligned} \tag{18}$$

Аналогічно до теореми 6 [11, глава 8], враховуючи оцінку (18), справедлива.

**Теорема 4.** Нехай класичний розв'язок  $h(x, t)$  задачі (1)–(5) задовольняє умовам теореми 3. Тоді для похибок  $z$  наближеного узагальненого розв'язку  $\hat{h}(x, t) \in H_m^N$  задачі (12), (13), отриманого за допомогою схеми Кранка – Ніколсона, справедлива оцінка

$$\left\| z_{m_\tau} \right\|_{L_2}^2 + \delta_1 \tau \sum_{j=0}^{m_\tau-1} \left\| z_{j+1/2}(h) \right\|_{H_0^1}^2 \leq c(h_{max}^{2m} + \tau^4).$$

Однак практична реалізація схеми Кранка – Ніколсона стосовно нелінійної задачі Коші (14), (15) вимагає застосування ітерацій. Замість схеми Кранка – Ніколсона можна використати схему предиктор-коректор [10], яка для системи рівнянь (14) має наступний вигляд:

$$\begin{aligned}
 & \mathbf{M}(\mathbf{H}^{(j)}) \frac{\mathbf{W}^{(j+1)} - \mathbf{H}^{(j)}}{\tau} + \mathbf{L}(\mathbf{H}^{(j)}) \frac{1}{2} (\mathbf{W}^{(j+1)} + \mathbf{H}^{(j)}) = \mathbf{0}, \\
 & \mathbf{M} \left( \frac{1}{2} (\mathbf{W}^{(j+1)} + \mathbf{H}^{(j)}) \right) \frac{\mathbf{H}^{(j+1)} - \mathbf{H}^{(j)}}{\tau} + \mathbf{L} \left( \frac{1}{2} (\mathbf{W}^{(j+1)} + \mathbf{H}^{(j)}) \right) \times \\
 & \times \frac{1}{2} (\mathbf{H}^{(j+1)} + \mathbf{H}^{(j)}) = \mathbf{0}, \quad j = 0, 1, 2, \dots, m_\tau - 1,
 \end{aligned} \tag{19}$$

де  $\mathbf{W}^{(j+1)}$  – допоміжні вектор-функції.

З точки зору простоти практичної реалізації добре зарекомендувала себе повністю неявна лінеаризована різницева схема [8, 13]. Для системи (14) вона має вигляд

$$\mathbf{M}(\mathbf{H}^{(j)}) \frac{\mathbf{H}^{(j+1)} - \mathbf{H}^{(j)}}{\tau} + \mathbf{L}(\mathbf{H}^{(j)}) \mathbf{H}^{(j+1)} = \mathbf{0}, \quad j = 0, 1, 2, \dots, m_\tau - 1. \tag{20}$$

**Схеми урахування модифікованої умови спряження.** У визначення елементів  $l_{ij}$ ,  $i, j = \overline{1, N}$  матриці  $\mathbf{L}(\mathbf{H})$  задачі Коші (14),

(15) входять  $s_{ij} = \frac{[\varphi_i][\varphi_j]}{d \int_0^d \frac{dx}{k_\omega(\hat{h})}}$ . При практичній реалізації відшукування

скінченноелементних розв'язків початково-крайової задачі (1)–(5) постає питання про схеми відшукування інтегралів у  $s_{ij}$  по товщині

тонкого включення. Можна запропонувати кілька схем обчислення

$$I = \int_0^d \frac{dx}{k_\omega(\hat{h})}. \quad (21)$$

Введемо наступні позначення:

$$\hat{h}^{-(j)} = \hat{h}|_{x=\xi-0}^{t=t_j}, \quad \hat{h}^{+(j)} = \hat{h}|_{x=\xi+0}^{t=t_j}.$$

**Спосіб I.** Апроксимуємо розподіл напорів по відрізьку  $[0; d]$  лінійною залежністю

$$\hat{h}_\omega^{(j)}(\zeta) = \hat{h}^{-(j)} + \frac{\hat{h}^{+(j)} - \hat{h}^{-(j)}}{d} \zeta, \quad \zeta \in [0; d].$$

Тоді при використанні схеми (20), із (21) маємо

$$I^{(j)} = \sum_{p=1}^{m_d} A_p \frac{1}{k_\omega(\hat{h}_\omega^{(j)}(\zeta_p))}.$$

Тут  $\int_0^d f(\zeta) d\zeta = \sum_{p=1}^{m_d} A_p f(\zeta_p)$  – деяка квадратурна формула при

наявності  $m_d$  вузлів;  $A_p$ ,  $\zeta_p \in [0; d]$  – коефіцієнти та вузли квадратурної формули.

**Спосіб II.** Згідно припущень функція  $k_\omega = k_\omega(h)$  є неперервною на включенні. Тоді згідно з теоремою про середнє, існує така точка  $\zeta_m \in [0; d]$ , що  $I^{(j)} = \frac{d}{k_\omega(\hat{h}_\omega^{(j)}(\zeta_m))}$ . Візьмемо точку  $\zeta_m$  такою, що

$\hat{h}_\omega^{(j)}(\zeta_m) = 0.5(\hat{h}^{+(j)} + \hat{h}^{-(j)})$ . Тоді

$$I^{(j)} = \frac{d}{k_\omega(0.5(\hat{h}^{+(j)} + \hat{h}^{-(j)}))}.$$

**Спосіб III.** Як вже зазначалося раніше, модифікована умова спряження неідеального контакту (5) виведена із крайової задачі (6), (7). Дискретизуємо рівняння (6) за методом скінченних різниць

$$\frac{1}{0.5d} \left( k(\widehat{h}^{+(j)}) \frac{\widehat{h}^{+(j)} - \widehat{h}^{0(j)}}{0.5d} - k(\widehat{h}^{-(j)}) \frac{\widehat{h}^{0(j)} - \widehat{h}^{-(j)}}{0.5d} \right) = 0. \quad (22)$$

Тут  $\widehat{h}^{0(j)} = \widehat{h} \Big|_{\zeta=0.5d}^{t=t_j}$ . Далі з (22) маємо

$$\widehat{h}^{0(j)} = \frac{1}{k(\widehat{h}^{+(j)}) + k(\widehat{h}^{-(j)})} \left( k(\widehat{h}^{+(j)}) \widehat{h}^{+(j)} + k(\widehat{h}^{-(j)}) \widehat{h}^{-(j)} \right).$$

Якщо значення  $\widehat{h}^{0(j)}$  знайдене, то розподіл напорів  $\widehat{h}^{(j)}(\zeta)$  на включенні  $\zeta \in [0; d]$  апроксимуємо квадратичною залежністю

$$\widehat{h}^{(j)}(\zeta) = \frac{2}{d^2} \times \\ \times \left( \widehat{h}^{-(j)}(\zeta - d)(\zeta - 0.5d) - \widehat{h}^{0(j)}\zeta(\zeta - d) + \widehat{h}^{+(j)}\zeta(\zeta - 0.5d) \right).$$

**Результати числових експериментів.** Параметри ґрунтів для проведення числових експериментів взято із безкоштовної програми Hydrus-1D [14]. Зокрема, в якості основного ґрунту розглядався піщаний суглинок (Sandy Loam) при:  $k_0 = 1.61 \text{ m/day}$ ,  $\theta_{min} = 0.065$ ,  $\theta_{max} = 0.41$ ,  $n = 1.89$ ,  $\alpha = 7.5$ . В якості ґрунту тонкого включення використовувалась глина (clay) з наступними параметрами:  $k_{\omega,0} = 0.048 \text{ m/day}$ ,  $\theta_{min} = 0.068$ ,  $\theta_{max} = 0.38$ ,  $n = 1.09$ ,  $\alpha = 0.8$ .

Згідно моделі ван Генухтена маємо [14; 15]

$$\theta(h) = \theta_{min} + \frac{\theta_{max} - \theta_{min}}{\left(1 + (-\alpha h)^n\right)^m}, \quad k(h) = k_0 \sqrt{s} \left( 1 - \left(1 - s^{\frac{1}{m}}\right)^m \right)^2,$$

$\theta \in [\theta_{min}; \theta_{max}]$ ,  $\theta_{min} > 0$ ,  $\theta_{max} \in (\theta_{min}; 1]$ ,  $n > 1$ ,  $m = 1 - \frac{1}{n}$ ;

$s = \frac{\theta - \theta_{min}}{\theta_{max} - \theta_{min}}$  – відносна вологість;  $k_0$  – коефіцієнт фільтрації (у

випадку повного насичення при  $s = 1$  і  $h = 0$ ). Далі

$$\beta(h) = \frac{d\theta}{dh} = \alpha n m (\theta_{max} - \theta_{min}) \left(1 + (-\alpha h)^n\right)^{-m-1} (-\alpha h)^{n-1}.$$

Для модельної задачі розглянуто шар ґрунту товщиною  $l = 2 \text{ m}$ . Глибина залягання включення  $\xi = 1 \text{ m}$ , а його товщина  $d = 0.2 \text{ m}$ . Крок по змінній  $x$  становив  $0.01 \text{ m}$ . Крок по часу  $\tau = 0.1 \text{ day}$ . Початковий розподіл напорів  $h_0(x) = -10 \text{ m}$ . На нижній межі ґрунту задавалась гранична умова першого роду із значенням напорів  $-0.1 \text{ m}$ .



Национальный университет  
водного хозяйства  
та природоохорони

В табл. 1–3 наведено значення вологості зліва ( $\theta^-$ ) та справа ( $\theta^+$ ) від включення в різні моменти часу при числових схемах урахування модифікованої умови спряження згідно з способами I–III.

Таблиця 1

Значення вологості на включенні (Спосіб I)

$t, \text{ day}$	$\theta^-$	$\theta^+$
20	0,263522	0,077708
25	0,330338	0,182952
30	0,332120	0,191174
40	0,333319	0,202238
50	0,333923	0,209558
60	0,334350	0,215028
70	0,334684	0,219402
80	0,334957	0,223048
90	0,335188	0,226174
100	0,335389	0,228910
110	0,335565	0,231341
120	0,335724	0,233569
130	0,335903	0,236294
140	0,336159	0,240252



Национальный университет  
водного хозяйства  
та природоохорони

Таблиця 2

Значення вологості на включенні (Спосіб II)

$t, \text{ day}$	$\theta^-$	$\theta^+$
20	0,263519 (0,001%)	0,077717 (0,012%)
25	0,330342 (0,001%)	0,184679 (0,944%)

продовження табл. 2

30	0,332091 (0,009%)	0,192295 (0,586%)
40	0,333289 (0,009%)	0,202993 (0,373%)
50	0,333900 (0,007%)	0,210160 (0,287%)
60	0,334333 (0,005%)	0,215539 (0,238%)
70	0,334670 (0,004%)	0,219850 (0,204%)
80	0,334946 (0,003%)	0,223450 (0,180%)
90	0,335179 (0,003%)	0,226539 (0,161%)
100	0,335381 (0,002%)	0,229246 (0,147%)
110	0,335558 (0,001%)	0,231653 (0,135%)
120	0,335719 (0,002%)	0,233880 (0,133%)
130	0,335906 (0,001%)	0,236697 (0,171%)
140	0,336173 (0,004%)	0,240767 (0,214%)



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

Якщо прийняти значення в табл. 1 за еталонні, то в табл. 2 та табл. 3 в дужках наведені абсолютні значення відносних різниць між поточними та шаблонними значеннями вологості. Як видно із табл. 2, відносні відмінності у значеннях вологості, що отримані згідно з способами I та II, не перевищують 1%. Тобто для попередньої оцінки впливу нелінійних залежностей параметрів включення від фізико-хімічних факторів, достатньо провести обрахунки із модифікованою умовою спряження, де інтеграл замінений значенням підінтегральної функції згідно теореми про середнє. Водночас, як видно з табл. 3, при введенні одного внутрішнього вузла у включенні та апроксимації невідомої функції квадратичною залежністю, відносні відмінності в певний момент часу досягають 5.5%, а в середньому лежать в межах 3%. Теоретично не можливо довести, що якийсь із способів дає точніші результати. Однак на практичному рівні можна припустити, що спосіб III все-таки більш наближений до реальних даних. Тому для попередніх прогнозів досить застосовувати спосіб II. Однак у разі необхідності, для уточнення прогнозів, потрібно все ж розглядати внутрішні вузли всередині включення.



## Значення вологості на включенні (Спосіб III)

$t, \text{ day}$	$\theta^-$	$\theta^+$
20	0,263501 (0,008%)	0,077767 (0,076%)
25	0,329508 (0,251%)	0,193108 (5,551%)
30	0,331161 (0,289%)	0,199347 (4,275%)
40	0,332553 (0,230)	0,208851 (3,270%)
50	0,333318 (0,181%)	0,215400 (2,788%)
60	0,333849 (0,150%)	0,220354 (2,477%)
70	0,334254 (0,129%)	0,224341 (2,251%)
80	0,334581 (0,112%)	0,227680 (2,077%)
90	0,334853 (0,100%)	0,230554 (1,937%)
100	0,335086 (0,090%)	0,233075 (1,820%)
110	0,335290 (0,082%)	0,235334 (1,726%)
120	0,335502 (0,066%)	0,237907 (1,857%)
130	0,335803 (0,030%)	0,241745 (2,307%)
140	0,336199 (0,012%)	0,246738 (2,700%)

1. Martyniuk P. M., Michuta O. R., Ulianchuk-Martyniuk O. V., Kuzlo M. T. Numerical investigation of pressure head jump values on a thin inclusion in one-dimensional non-linear soil moisture transport problem. *International Journal of Applied Mathematics*. 2018. 31(4). Pp. 649–660.
2. Chui Y. V., Moshynskiy V. S., Martyniuk P. M., Stepanchenko O. M. On conjugation conditions in the filtration problems upon existence of semipermeable inclusions. *JP Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018. Vol. 15. Iss. 3. Pp. 609–619.
3. Chui Y., Martyniuk P., Kuzlo M., Ulianchuk-Martyniuk O. The conditions of conjugation in the tasks of moisture transfer on a thin clay inclusion taking into account salt solutions and temperature. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics (Bulgaria)*. 2019. 49(1). Pp. 28–38.
4. Ulianchuk-Martyniuk O. V. Numerical simulation of the effect of semi-permeable properties of clay on the value of concentration jumps of contaminants in a thin geochemical barrier. *Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications*. 2020. 8(1). Pp. 91–104.
5. Ulyanchuk-Martyniuk O., Michuta O., Ivanchuk N. Biocolmatation and the finite element modeling of its influence on changes in the head drop in a geobarrier. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologiethis*. 2020. 4(10–106). Pp. 18–26.
6. Ulianchuk-Martyniuk O. V., Michuta O. R. Numerical Simulation of the Effect of Chemical Osmosis on the Value of the Jumps of Pollution in the Geochemical Barrier. *International Journal of Applied Mathematics*. 2020. 33(6). Pp. 1067–1082.
7. Ulianchuk-Martyniuk O., Michuta O.

Conjugation conditions in the problem of filtering chemical solutions in the case of structural changes to the material and chemical suffusion in the geobarrier. *JP Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020. 19(1). Pp. 141–154. **8.** Ulianchuk-Martyniuk O. V., Michuta O. R., Ivanchuk N. V. Finite element analysis of the diffusion model of the bioclogging of the geobarrier. *Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications*. 2021. Vol. 9. Iss. 4. Pp. 100–114. **9.** Уляньчук-Мартинюк О. В. Моделювання впливу концентрації розчину на значення стрибків вологості в тонкому геохімічному бар'єрі. *Матем. методи та фіз.-мех. поля*. 2021. № 2. Т. 64. С. 145–154. **10.** Сергиенко І. В., Скопецкий В. В., Дейнека В. С. Математическое моделирование и исследование процессов в неоднородных средах. Киев : Наук. думка, 1991. 432 с. **11.** Дейнека В. С., Сергиенко І. В., Скопецкий В. В. Модели и методы решения задач с условиями сопряжения. Киев : Наук. думка, 1998. 614 с. **12.** Sergienko I. V., Deineka V. S. Models with conjugation conditions and high-accuracy methods of their discretization. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2000. Vol. 36. Iss. 1. Pp. 83–101. **13.** Herus V. A., Ivanchuk N. V., Martyniuk P. M. A System Approach to Mathematical and Computer Modeling of Geomigration Processes Using Freefem++ and Parallelization of Computations. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2018. Vol. 54. Iss. 2. Pp. 284–294. **14.** Šimůnek J., van Genuchten M. T., Šejna M. Recent developments and applications of the HYDRUS computer software packages. *Vadose Zone Journal*. 2016. 15. Pp. 1–25. **15.** van Genuchten M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1980. Vol. 44. No. 5. Pp. 892–898.

## REFERENCES:

1. Martyniuk P. M., Michuta O. R., Ulianchuk-Martyniuk O. V., Kuzlo M. T. Numerical investigation of pressure head jump values on a thin inclusion in one-dimensional non-linear soil moisture transport problem. *International Journal of Applied Mathematics*. 2018. 31(4). Pp. 649–660. **2.** Chui Y. V., Moshynskiy V. S., Martyniuk P. M., Stepanchenko O. M. On conjugation conditions in the filtration problems upon existence of semipermeable inclusions. *JP Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018. Vol. 15. Iss. 3. Pp. 609–619. **3.** Chui Y., Martyniuk P., Kuzlo M., Ulianchuk-Martyniuk O. The conditions of conjugation in the tasks of moisture transfer on a thin clay inclusion taking into account salt solutions and temperature. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics (Bulgaria)*. 2019. 49(1). Pp. 28–38. **4.** Ulianchuk-Martyniuk O. V. Numerical simulation of the effect of semi-permeable properties of clay on the value of concentration jumps of contaminants in a thin geochemical barrier. *Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications*. 2020. 8(1). Pp. 91–104. **5.** Ulyanchuk-Martyniuk O., Michuta O., Ivanchuk N. Biocolmatation and


the finite element modeling of its influence on changes in the head drop in a geobarrier. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologiethis*. 2020. 4(10–106). Pp. 18–26. **6.** Ulianchuk-Martyniuk O. V., Michuta O. R. Numerical Simulation of the Effect of Chemical Osmosis on the Value of the Jumps of Pollution in the Geochemical Barrier. *International Journal of Applied Mathematics*. 2020. 33(6). Pp. 1067–1082. **7.** Ulianchuk-Martyniuk O., Michuta O. Conjugation conditions in the problem of filtering chemical solutions in the case of structural changes to the material and chemical suffusion in the geobarrier. *JP Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020. 19(1). Pp. 141–154. **8.** Ulianchuk-Martyniuk O. V., Michuta O. R., Ivanchuk N. V. Finite element analysis of the diffusion model of the bioclogging of the geobarrier. *Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications*. 2021. Vol. 9. Iss. 4. Pp. 100–114. **9.** Ulianchuk-Martyniuk O. V. Modeliuvannia vplyvu kontsentratsii rozchynu na znachennia strybkiv volohosti v tonkomu heokhimichnomu barieri. *Matem. metody ta fiz.-mekh. polia*. 2021. № 2. T. 64. S. 145–154. **10.** Sergienko I. V., Skopetskiy V. V., Deyneka V. S. Matematicheskoe modelirovanie i issledovanie protsessov v neodnorodnyih sredah. Kiev : Nauk. dumka, 1991. 432 s. **11.** Deyneka V. S., Sergienko I. V., Skopetskiy V. V. Modeli i metody resheniya zadach s usloviyami sopryajeniya. Kiev : Nauk. dumka, 1998. 614 s. **12.** Sergienko I. V., Deineka V. S. Models with conjugation conditions and high-accuracy methods of their discretization. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2000. Vol. 36. Iss. 1. Pp. 83–101. **13.** Herus V. A., Ivanchuk N. V., Martyniuk P. M. A System Approach to Mathematical and Computer Modeling of Geomigration Processes Using Freefem++ and Parallelization of Computations. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2018. Vol. 54. Iss. 2. Pp. 284–294. **14.** Šimůnek J., van Genuchten M. T., Šejna M. Recent developments and applications of the HYDRUS computer software packages. *Vadose Zone Journal*. 2016. 15. Pp. 1–25. **15.** van Genuchten M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1980. Vol. 44. No. 5. Pp. 892–898.

---

**Ulianchuk-Martyniuk O. V., Post-graduate Student** (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

### **ALGORITHMS TO NUMERICALLY ACCOUNT FOR INTEGRAL CONJUGATION CONDITIONS IN MODELING ENVIRONMENTS WITH GEOBARRIERS**

**In this paper, we consider algorithmic aspects of mathematical and computer modeling of physical and chemical processes in porous**



**media with thin inclusions on the example of unsaturated water flow problem. In case conductivity characteristics (thermal, saturated and unsaturated hydraulic conductivity, diffusion coefficient) of the thin inclusion material depend on effect functions (temperature, moisture, chemicals concentration, porosity), the classical conjugation conditions have to be modified. The presented literature review contains works that implemented such modifications and works that present the possible impact of these modifications on process simulation in porous media. With the use of the modified conjugation conditions, a mathematical model of unsaturated water flow in the soil containing one thin inclusion is formulated. We also present the numerical scheme for solving the corresponding initial-boundary value problem with the finite element method and prove the theorem of the accuracy of the approximate general solutions. The paper is focused on algorithmic aspects of implementing modified conditions in numerical solving schemes of the corresponding nonlinear initial-boundary value problems. We further consider numerical schemes for integral conjugation condition in the pressure head distribution problem under unsaturated conditions. Three types of algorithms are proposed. The first algorithm is based on linear approximation of pressure head field in the thin inclusion, involving the calculated boundary values to its (inclusion's) right and left sides. The second algorithm relies on calculating the integral in the integral conjugation condition with the use of mean value theorem. In the third algorithm, we propose to introduce an internal node, calculate the pressure head value on it using the finite difference method, and approximate the pressure head values with quadratic interpolation. The third algorithm type allows (as generalization) for introduction of an arbitrary number of internal nodes in the inclusion. Numerical experiments show that moisture values on the inclusion while applying either the first or the second algorithm vary by less than 1%. The relative difference of moisture results while applying the first and the second algorithm are generally within 3%, although sometimes can reach 5.5%.**

***Keywords:* numerical algorithm; conjugation condition; pressure head leap; geobarrier.**

---

**Турбал Ю. В., д.т.н., професор** (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, [y.v.turbal@nuwm.edu.ua](mailto:y.v.turbal@nuwm.edu.ua)), **Тулашвілі Ю. Й., д.п.н., професор** (Луцький національний технічний університет, [y.tulashvili@lutsk-ntu.com.ua](mailto:y.tulashvili@lutsk-ntu.com.ua))



## ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМУ ПОБУДОВИ ТУРИСТИЧНОГО МАРШРУТУ ТА ЙОГО ІНФОРМАЦІЙНОГО СУПРОВІДУ

У статті запропоновано алгоритм, що забезпечує на основі інформації про туристичні об'єкти, побудову туристичних маршрутів. Побудова оптимального туристичного маршруту реалізується шляхом аналізу даних, які можна відобразити у вигляді шляхів деяких неорієнтованих графів. За описом алгоритму запропонована бізнес логіка його програмної реалізації у формі вебдодатка. Розроблений вебдодаток функціонує на засадах туристичних рекомендаційних систем, які шляхом отримання даних після аналізу зацікавлень споживачів туристичної продукції, дозволяють визначати їх потреби та пропонувати оптимальні туристичні маршрути для подорожей містами України. Основне завдання вебдодатка є інформаційний супровід турів міського культурного туризму. Додаток шляхом визначення геолокації місцеположення користувача генерує туристичні маршрути на основі розробленого алгоритму.

**Ключові слова:** міський туризм; алгоритм; оптимальний туристичний маршрут; вебдодаток; інформаційний супровід.

Проблема вибору туристичного маршруту завжди пов'язана з привабливістю українських міст як культурних осередків міського туризму. Характерним завданням, що розв'язується туристом після першого приїзду у будь-яке місто, є пошук інформації щодо культурно-історичних пам'яток цього міста, знаходження їх місце розташування та визначення оптимального маршруту для проведення туристичної екскурсії.

Рівень інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ), що є основою сучасних туристичних рекомендаційних систем (TRS), сьогодні забезпечує туристам полегшення пошуку потрібної їм інформації [1].

Розроблений підхід для TRS ґрунтується на отриманні даних після аналізу популярних для споживачів туристичних об'єктів, за результатами якого можна визначати їх потреби та пропонувати оптимальні туристичні маршрути для подорожей містами України. Тому сьогодні дослідження в галузі використання продуктів ІКТ у сфері туризму, що забезпечують просування туристичних послуг, є актуальними та спрямовані на підвищення рівня інформаційної, консультативної підтримки туристів, що сприяє ефективному економічному зростанню всіх видів туризму.

Всесвітня туристична організація UNWTO у 2015 році вперше визначила використання ІКТ серед сімнадцяти цілей у сфері сталого розвитку світового туризму як ознаку SMART-туризму [2]. SMART-туризм передбачає широке використання різноманітних TRS як механізмів онлайн-пошуку, що сприяють передбаченню «рейтингу» або «переваг», які користувач туристичної продукції буде віддавати туристичному об'єкту [3]. Це особливо помітно для такого напрямку туристичної індустрії, як міський культурний туризм.

Автори дослідження «Огляд алгоритмічних підходів до розв'язування задач проєктування туристичної подорожі» завдання вибору туристичного маршруту відносять до проблеми планування маршруту при зацікавленості туристів відвідувати більше одного об'єкта під час туристичного туру. Основна мета обговорюваної проблеми полягає в тому, щоб вибрати об'єкти, які відповідають уподобанням туристів, максимізуючи таким чином їх задоволення від туристичного маршруту [4].

Сучасні тенденції проєктування та розвитку інтелектуальних інформаційних технологій, впровадження процесу генерування туристичних маршрутів проаналізовано у дослідженнях [3–4].

У публікаціях, присвячених SMART-туризму, широко аналізуються персоналізовані електронні туристичні путівники та піднімаються проблеми пошуку туристичного маршруту на основі інформації зі спеціалізованих сайтів.

Однак слід зазначити, що в цих працях не піднімалося питання знаходження оптимальних туристичних маршрутів за даними щодо популярності туристичних об'єктів з використанням TRS як засобу SMART-туризму.

Метою цього дослідження є розробка алгоритму побудови оптимального туристичного маршруту для підтримки SMART-туризму

по містах України та формування бізнес-логіки його програмної реалізації.

Для цього потрібно вирішити такі завдання:

- окреслити функцію побудови оптимального туристичного маршруту;

- розробити математичну модель генерування послідовності туристичних маршрутів на основі знань про туристичні об'єкти, їх характеристики та популярність;

- розробити алгоритм напрацювання рекомендацій щодо найбільш оптимальних туристичних об'єктів;

- окреслити бізнес-логіку, необхідну для програмної реалізації алгоритму.

Кожен турист в межах TRS, яка розробляється, стає автономною одиницею споживання рекомендацій щодо туристичних маршрутів міського туризму і користувачем системи, що працює з розширеними інформаційними потоками, програмними та іншими ресурсами [1].

Алгоритм побудови оптимального туристичного маршруту пропонується у такій послідовності. Функція побудови оптимального туристичного маршруту реалізується шляхом аналізу даних, які можна відобразити у вигляді шляхів деяких неорієнтованих графів. Отримуємо деякий неорієнтований граф  $G = (V, E)$ , вершини якого визначають сукупність туристичних об'єктів деякого міста, а ребра – шляхи між туристичними об'єктами. Поставимо у відповідність кожному ребру  $(u, v)$  деяке число  $\rho(u, v)$ , яке визначає відстань між туристичними об'єктами чи час руху. Якщо пряме сполучення між туристичними об'єктами немає, відповідне значення рівне 0. Поставимо у відповідність кожній вершині деяке число, яке означає туристичну привабливість вершини. Тоді функцію туристичної привабливості  $Attr(v), v \in V$  визначимо так:

$$Attr(v) = \gamma Int(v) + (1 - \gamma) Vis(v) \in V,$$

де  $Int(v)$  – це нормоване значення функції зацікавленості до відповідної вершини (туристичного об'єкта),  $Vis(v)$  – нормоване значення функції відвідуваності відповідної вершини (туристичного об'єкта) у нашій системі,  $\gamma \in (0, 1)$  – деякий параметр.

Алгоритм побудови оптимального туристичного маршруту розкривається у такій послідовності: для заданої вершини  $v \in V$

необхідно знайти цикл, початок та кінець якого співпадає з вершиною  $v \in V$ , для якого сумарна привабливість усіх вершин є максимальною та сумарна довжина шляху (втрата часу) мінімальна. Для формального запису задачі усі вершини графа пронумеруємо числами від 1 до  $n = |V|$ . Тоді формально відповідну задачу можемо записати у вигляді:



$$\sum_{k=1}^n Attr(v_{i_k}) \chi(i_k \neq i_1, i_k \neq i_2, \dots, i_k \neq i_{k-1}) \rightarrow \max_{[v=v_{i_1}, v_{i_2}, \dots, v_{i_{n-1}}, v_{i_n}=v]} ; \quad (1)$$

$$\sum_{k=1}^{n-1} \rho(v_{i_k}, v_{i_{k+1}}) \rightarrow \min_{[v=v_{i_1}, v_{i_2}, \dots, v_{i_{n-1}}, v_{i_n}=v]} ; \quad (2)$$

$$n \leq |V|, v_{i_1}, v_{i_2}, \dots, v_{i_{n-1}}, v_{i_n} \in V ; \quad (3)$$

$$\rho(v_{i_k}, v_{i_{k+1}}) > 0, k = \overline{1, n}. \quad (4)$$

Зауважимо, що цикл може бути довільним, вершини у ньому можуть повторюватись. Наявність множника  $\chi(i_k \neq i_1, i_k \neq i_2, \dots, i_k \neq i_{k-1})$  забезпечує врахування туристичної привабливості заходу в туристично привабливу вершину лише один раз. Якщо здійснюється захід у неї ще раз, то вважаємо, що вершина вже не має туристичної привабливості і є лише транспортним вузлом. Як бачимо, дана задача є багатокритеріальною. Виходячи з загальної стратегії розв'язку багатокритеріальних задач, зведемо її до однокритеріальної, ввівши деякі вагові коефіцієнти критеріїв.

$$\alpha \sum_{k=1}^{n-1} \tilde{\rho}(v_{i_k}, v_{i_{k+1}}) - (1-\alpha) \sum_{k=1}^n Attr(v_{i_k}) \chi(i_k \neq i_1, i_k \neq i_2, \dots, i_k \neq i_{k-1}) \rightarrow \min_{[v=v_{i_1}, v_{i_2}, \dots, v_{i_{n-1}}, v_{i_n}=v]} . \quad (5)$$

$$n \leq |V|, v_{i_1}, v_{i_2}, \dots, v_{i_{n-1}}, v_{i_n} \in V . \quad (6)$$

$$\rho(v_{i_k}, v_{i_{k+1}}) > 0, k = \overline{1, n}$$

$$\tilde{\rho}(v_{i_k}, v_{i_{k+1}}) = \rho(v_{i_k}, v_{i_{k+1}}) / \max_{i, j: (v_i, v_j) \in E} (\rho(v_i, v_j)) .$$

Запропонована математична модель покладена в основу алгоритму, який здійснює опрацювання даних вибраних із бази даних, що накопичуються за рахунок визначення геолокацій туристів та їх переглядів інформації щодо туристичних об'єктів. Алгоритм розв'язку розкривається такою послідовністю дій:

При  $\alpha = 1$  наша задача зводиться до задачі пошуку найкоротшого циклу і очевидно, має тривіальний розв'язок – це цикл, що утворений початковою та найближчою до неї вершиною. При  $\alpha = 0$  необхідно знайти цикл з максимальною сумарною



функцією туристичної привабливості. Очевидно, що розв'язком такої задачі буде довільний цикл, що містить усі вершини з ненульовою привабливістю. При  $0 < \alpha < 1$  маємо певну комбінацію критеріїв (1)–(2), яка визначає задачу коректно: адже задача у постановці (1)–(4) не визначає однозначно, яким чином вибрати оптимальний шлях.

Для опису алгоритму розв'язання задачі (1) введемо для довільного шляху  $v_{i_1}, v_{i_2}, \dots, v_{i_m}$  значення цільової функції

$$L(v_{i_1}, v_{i_2}, \dots, v_{i_m}) = \alpha \sum_{k=1}^{m-1} \rho(v_{i_k}, v_{i_{k+1}}) - (1 - \alpha) \sum_{k=1}^m Attr(v_{i_k}) \chi(i_k \neq i_1, i_k \neq i_2, \dots, i_k \neq i_{k-1}). \quad (7)$$

Припустимо, що якийсь цикл  $v = v_{i_1}, v_{i_2}, \dots, v_{i_n} = v$  оптимальний за критерієм (7). Розглянемо довільну вершину циклу  $v_{i_l}$ . Очевидно, що шлях до неї  $v = v_{i_1}, v_{i_2}, \dots, v_{i_l}$  також оптимальний (бо якщо існує інший з меншим значенням цільової функції, то отримуємо протиріччя з тим, що вихідний цикл оптимальний). Розглянемо шлях  $v_{i_l}, \dots, v_{i_n} = v$  як частину нашого оптимального циклу. За аналогічними міркуваннями він також оптимальний. А тому, якщо якась вершина на зворотному шляху відвідується повторно, її туристична привабливість рівна 0.

Отже, на кожному кроці будемо знаходити для кожної вершини, відмінної від початкової, оптимальне значення цільової функції (7) та відмічати ту вершину, для якої це значення мінімальне. При цьому будемо аналізувати всі ребра, що виходять з множини вже відмічених вершин в усі інші (в тому числі і відмічені) вершини. Якщо мінімум досягнутий на невідміченій вершині туристично-привабливу – відмічаємо її. Якщо на відміченій – то знаходимо мінімум біжучого значення цільової функції та її попередньої відмітки і вибираємо мінімальне значення з двох. При цьому фіксуємо також відповідні шляхи до вершин. Таким чином, результатом роботи нашого алгоритму є пошук оптимальних за критерієм (7) шляхів з початкової вершини в усі інші.

Наступним етапом роботи нашого алгоритму є пошук оптимального шляху з кожної відміченої вершини в початкову (оптимального зворотного шляху). При цьому туристичні привабливості прямого шляху у відповідну вершину обнуляємо. В результаті отримуємо шляхи та значення критерію (7). Отже, для кожної вершини матимемо цикл, що її містить, та оптимальне значення критерію (7) як суму значень функції для двох відповідних шляхів: перший, що веде до неї з початкової вершини, другий, що

веде від неї до початкової вершини. Тоді з усіх вершин вибираємо ті, які мають мінімальні значення критерію (7) та відповідні цикли.

Функціональне наповнення вебдодатка розкрито через об'єктну модель мовою UML (рисунок). Завдання інформаційного супроводу турів міського культурного туризму розв'язується шляхом надання інформації щодо туристичних маршрутів у місті на основі визначення геолокації місцеположення користувача або з використанням сервісів пошуку за номером маршруту, за назвою району міста для обрання пропонованих сформованих туристичних маршрутів або від визначеного користувачем місця за назвою. Після чого користувач отримує опис туристичного маршруту на стороні клієнта – front-end.

Робота з інформацією супроводу в базі даних відбувається на серверному рівні back-end, на якому у режимі адміністрування доступом, що надається адміністратором, менеджер контенту реалізує чотири базові функції CRUD: створення (англ. create), читання (read), модифікація (update), видалення (delete) контенту.

Дані визначення геолокацій туристів та переглядів інформації щодо туристичних об'єктів накопичуються автоматично під час роботи вебдодатка у контенті бази даних.

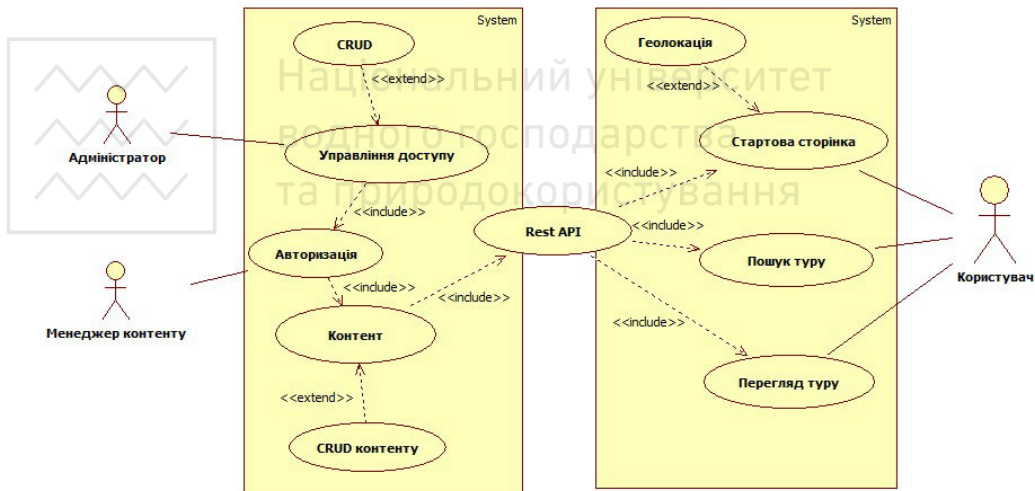


Рисунок. UML діаграма прецедентів вебдодатка

Технологія розробки вебдодатка – стек MERN. База даних, що формує дані інформаційного супроводу, вміщує знання щодо туристичних об'єктів, їх особливості та параметри огляду.

Системні вимоги до вебдодатка такі:

- на стороні сервера (back-end) застосовується фреймворк Express.js, документно-орієнтована база даних з відкритим вихідним кодом MongoDB;

- на стороні клієнта (front-end) вебдодаток будується на засадах односторінкової реалізації (Single-Page Applications, SPA) з використанням JavaScript-бібліотеки React.js. SPA завантажується як одна HTML-сторінка, що динамічно оновлюється при її взаємодії з користувачем. Дизайн шаблону сайту повинен бути виконаний з використанням мови HTML, CSS та JS. Сайт повинен коректно відображатися в браузерях Microsoft Internet Explorer 6.0, 7.0; Mozilla FireFox, Google Chrome;

- взаємодія клієнтського вебдодатка із сервером реалізується методом REST API. Де API (англ. Application Programming Interface) – це код, який дозволяє обмінюватися даними сторони сервера зі стороною клієнта. REST (англ. Representational State Transfer – «передача репрезентативного стану») являє набір правил того, як організувати написання коду, щоб усі системи вебдодатка легко обмінювалися даними.

За результатами дослідження розкрито алгоритм побудови туристичного маршруту, який здійснює опрацювання даних вибраних із контенту бази даних, що накопичуються за рахунок визначення геолокацій туристів та їхніх переглядів інформації щодо туристичних об'єктів.

За рахунок визначення функції туристичної привабливості кожного туристичного об'єкта в отриманому деякому неорієнтованому графі запропонований алгоритм серед множини найбільш популярних туристичних об'єктів визначається оптимальний маршрут їх відвідування.

За описом алгоритму запропонована бізнес-логіка його програмної реалізації у формі вебдодатка. Бізнес-логіка побудована для двох рівнів функціонування додатку – back-end та front-end. Робота з інформаційним супроводом, що використовує дані з бази даних відбувається на серверному рівні – back-end. Користувач отримує опис туристичного маршруту на стороні клієнта – front-end.

Розроблений вебдодаток функціонує на засадах туристичних рекомендаційних систем, які шляхом отримання даних після аналізу зацікавлень споживачів туристичної, дозволяє визначати їх потреби

та пропонувати оптимальні туристичні маршрути для подорожей містами України.

Перспективою подальших досліджень є визначення засад використання сучасних програмних додатків інформаційного супроводу туристичних турів, що розроблені з використанням алгоритму побудови оптимальних маршрутів туристичних об'єктів, для аналізу та узгодження рекламних матеріалів туристичних агентств.



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

1. Artemenko O., Kunanets O., Pasichnyk V. E-tourism recommender systems: a survey and development perspectives. *Econtechmod : an international quarterly journal on economics in technology, new technologies and modelling processes*. Lublin ; Rzeszow, 2017. Vol. 6, number 2. P. 91–95. URL: <http://ena.lp.edu.ua:8080/handle/ntb/39426> (дата звернення: 12.02.2022).
2. World Summit On Sustainable Tourism + 20. 26–27 November, 2015. URL: <http://www.institutoturismoresponsable.com/events/sustainabletourismcharter2015/wp-content/uploads/2016/04/ST-20CharterMR.pdf> (дата звернення: 12.02.2022).
3. Кормягина Н. Н. Smart-туризм как часть Smart-концепции. *Маркетинг и логистика : научно-практический журнал*. 2017. № 6 (14). С. 45–57. URL: <http://marklog.ru/smart-turizm-kak-chast-smart-koncepcii> (дата звернення: 12.02.2022).
4. Damianos Gavalas, Charalampos Konstantopoulos, Konstantinos Mastakas, and Grammati Pantziou. *A Survey on Algorithmic Approaches for Solving Tourist Trip Design Problems : Journal of Heuristics*. June 2014, Vol. 20, Issue 3. Pp. 291–328. URL: [https://www.researchgate.net/publication/271921760\\_A\\_survey\\_on\\_algorithmic\\_approaches\\_for\\_solving\\_tourist\\_trip\\_design\\_problems](https://www.researchgate.net/publication/271921760_A_survey_on_algorithmic_approaches_for_solving_tourist_trip_design_problems) (дата звернення: 12.02.2022).

## REFERENCES:

1. Artemenko O., Kunanets O., Pasichnyk V. E-tourism recommender systems: a survey and development perspectives. *Econtechmod : an international quarterly journal on economics in technology, new technologies and modelling processes*. Lublin ; Rzeszow, 2017. Vol. 6, number 2. P. 91–95. URL: <http://ena.lp.edu.ua:8080/handle/ntb/39426> (data zvernennia: 12.02.2022).
2. World Summit On Sustainable Tourism + 20. 26–27 November, 2015. URL: <http://www.institutoturismoresponsable.com/events/sustainabletourismcharter2015/wp-content/uploads/2016/04/ST-20CharterMR.pdf> (data zvernennia: 12.02.2022).
3. Kormyagina N. N. Smart-turizm kak chast Smart-kontseptsii, *Marketing i logistika : nauchno-prakticheskii jurnal*. 2017. № 6 (14). S. 45–57. URL: <http://marklog.ru/smart-turizm-kak-chast-smart-koncepcii> (data

zvernennia: 12.02.2022). 4. Damianos Gavalas, Charalampos Konstantopoulos, Konstantinos Mastakas, and Grammati Pantziou. *A Survey on Algorithmic Approaches for Solving Tourist Trip Design Problems* : Journal of Heuristics. June 2014, Vol. 20, Issue 3. Pp. 291–328. URL: [https://www.researchgate.net/publication/271921760\\_A\\_survey\\_on\\_algorithmic\\_approaches\\_for\\_solving\\_tourist\\_trip\\_design\\_problems](https://www.researchgate.net/publication/271921760_A_survey_on_algorithmic_approaches_for_solving_tourist_trip_design_problems) (data zvernennia: 12.02.2022).



Модернізація управління  
водного господарства  
та природокористування

**Turbal Yu. V., Doctor of Engineering, Professor** (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne) **Tulashvili Yu. Y., Doctor of Pedagogic Sciences, Professor** (Lutsk National Technical University)

## SOFTWARE IMPLEMENTATION OF THE ALGORITHM FOR BUILDING A TOURIST ROUTE AND ITS INFORMATION SUPPORT

The article proposes an algorithm that provides, based on information about tourist sites, the construction of tourist routes. The construction of a rational tourist route is implemented by the method of data analysis, which can be reflected through the paths of some undirected graphs. According to the algorithm, at each step for each vertex other than the initial one, the optimal value of the objective function is found and the vertex of the undirected graph is determined for which this is the minimum value. In this way, all edges going out of the set of already marked vertices to all other vertices are analyzed. Thus, the result of the algorithm's work is the search for optimal paths from the initial vertex to all the others by a certain criterion.

According to the description of the algorithm, the business logic of its software implementation in the form of a Web application is proposed. Business logic is built for two levels of application functioning – back-end and front-end. Work with information support using data from the database occurs at the server level – back-end. The user receives a description of the tourist route on the client side – front-end.

The developed Web application operates on the principle of a tourist recommender system, which, receiving data after analyzing the interests of consumers of a tourist product, allows you to determine their needs and offer the best tourist routes for traveling around the cities of Ukraine. The main task of the Web-application is

**informational support of tours of urban cultural and educational tourism. The application, determining the geolocation of the user's location, generates tourist routes based on the developed algorithm. The result of the work of the web application according to the developed algorithm is a set of the most popular tourist sites that form the optimal route for visiting them.**

**Keywords:** urban tourism; algorithm; optimal tourist route; Web-application; information support.



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

**Бомба А. Я., д.т.н., професор, Мороз І. П., к.ф.-м.н., доцент**  
(Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)



**ЧИСЕЛЬНО-АСИМПТОТИЧНИЙ МЕТОД РОЗВ'ЯЗАННЯ СИНГУЛЯРНО  
ЗБУРЕНИХ МОДЕЛЬНИХ ЗАДАЧ ПРО СТАЦІОНАРНИЙ РОЗПОДІЛ  
НОСІЇВ ЗАРЯДУ В АКТИВНІЙ ОБЛАСТІ P-I-N-ДІОДІВ**

Розроблено метод прогнозування стаціонарного розподілу концентрації електронно-діркової плазми в *i*-області об'ємних *p-i-n*-діодів, який забезпечує можливість адекватно описувати стан плазми не тільки всередині активної області діода (відтворюючи результати застосування наближення амбіполярної дифузії), але й, що важливо, поблизу зон *p-i*- та *n-i*-контактів. Побудовано відповідну математичну модель у вигляді нелінійної сингулярно збуреної крайової задачі для системи рівнянь неперервності струму носіїв заряду та Пуассона. Отримано її наближений розв'язок у вигляді відповідних асимптотичних рядів за степенями малого параметра. Проведено комп'ютерний експеримент.

**Ключові слова:** метод збурень; сингулярно збурена задача; асимптотичний ряд; примежова функція; дифузійно-дрейфовий процес; об'ємний *p-i-n*-діод.

**Вступ. Базова математична модель**

*P-i-n*-діоди – нелінійні активні елементи надвисокочастотної (НВЧ) техніки, які широко використовуються для комутації електромагнітного поля. Робота такого пристрою ґрунтується на зміні провідності *i*-області (активної області) діода під дією струму управління. Базові характеристики *p-i-n*-діода – згасання, що вноситься у лінію передач, швидкодію – визначає накопичений в *i*-області заряд (електронно-діркова плазма) [1; 2].

Для оцінки інтегральних характеристик *p-i-n*-діода (провідність, ємність, індуктивність) широко використовується метод еквівалентних схем (наприклад, [3; 4]). Більш інформативними є дифузійно-дрейфові математичні моделі (наприклад, [5; 6]), які дозволяють отримати базові характеристики діода на основі дослідження (у межах гідродинамічного наближення) процесу

протікання електронно-діркового струму через пристрій з урахуванням фізичних властивостей напівпровідникового матеріалу, рекомбінаційно-генераційних ефектів, розігріву тощо.

У загальному випадку математична модель р-і-n-діода у гідродинамічному наближенні подається нелінійною системою диференціальних рівнянь в частинних похідних, які доповнюються відповідними граничними умовами.

В основу базової математичної моделі, яка описує розподіл концентрації дірок ( $n$ ), електронів ( $p$ ) та потенціалу ( $\varphi$ ) в активній області р-і-n-діодів (області  $\Omega = \{(\rho, \theta, z) : 0 < \rho < R, 0 < \theta < 2\pi, 0 < z < H\}$ ) у стаціонарному режимі роботи пристрою, покладено рівняння неперервності струмів дірок, електронів та рівняння Пуассона [1; 6; 7]:

$$\begin{cases} \Delta n = \frac{e}{kT} (\nabla n \nabla \varphi + n \Delta \varphi) + \frac{1}{D_n \tau_n^*} n, \\ \Delta p = \frac{e}{kT} (-\nabla p \nabla \varphi - p \Delta \varphi) + \frac{1}{D_p \tau_p^*} p, \\ \frac{\varepsilon \varepsilon_0}{e} \Delta \varphi = -(p - n + N_l), \end{cases} \quad (1)$$

де  $\tau_p^*$ ,  $\tau_n^*$  – характерні релаксаційні часи життя дірок та електронів в і-області (у загальному випадку залежні від локальної концентрації електронів та дірок і визначаються певним механізмом рекомбінації носіїв заряду);  $N_l = N_a - N_d \equiv N_l(z)$  – задана функція профілю легування (описує різницю концентрацій акцепторів і донорів в активній області);  $D_p$ ,  $D_n$  – коефіцієнти дифузії відповідно дірок та електронів;  $k$  – постійна Больцмана;  $T$  – температура;  $e$  – заряд електрона;  $\varepsilon$ ,  $\varepsilon_0$  – відносна діелектрична проникність напівпровідника та діелектрична стала.

Граничні умови на інжекційних контактах (поверхні  $\partial\Omega_n$ ,  $\partial\Omega_p$ ) записують з урахуванням припущення про те, що через межу  $\partial\Omega_n$  струм переносять лише електрони, відповідно через  $\partial\Omega_p$  – дірки (при широкій активній області більша частина інжекттованих носіїв заряду рекомбінує в і-області і не встигає потрапити в область протилежного контакту) [2; 6]:

$$\left( (\vec{j}_n - \vec{j}_{nr}) \cdot \vec{\nu} \right)_{\partial\Omega_n} = J, \quad \left( (\vec{j}_p - \vec{j}_{pr}) \cdot \vec{\nu} \right)_{\partial\Omega_p} = 0, \quad (2)$$



$$\left. \left( \vec{j}_p - \vec{j}_{pr} \right) \cdot \vec{v} \right|_{\partial\Omega_p} = J, \quad \left. \left( \vec{j}_n - \vec{j}_{nr} \right) \cdot \vec{v} \right|_{\partial\Omega_p} = 0, \quad (3)$$

де  $J$  – стала, що визначає густину інжекційного струму (струму управління);  $\vec{v}$  – вектор нормалі до границі області;  $\vec{j}_{n,p}$  – густина струму електронів і дірок;  $\vec{j}_{rn,rp}$  – густина рекомбінаційного струму.

Враховуючи співвідношення  $\vec{j}_p = e\mu_p p \vec{E} - eD_p \text{grad} p$ ,  $\vec{j}_n = e\mu_n n \vec{E} + eD_n \text{grad} n$ ,  $\vec{j}_{rp} = e\alpha_p p \vec{v}$ ,  $\vec{j}_{rn} = e\alpha_n n \vec{v}$ , можна показати, що умови (2, 3) еквівалентні наступним:

$$\left. \frac{\partial n}{\partial v} - \gamma_n n \right|_{\partial\Omega_n} = \frac{J}{eD_n}, \quad \left. \frac{\partial p}{\partial v} \right|_{\partial\Omega_n} = 0, \quad (4)$$

$$\left. \frac{\partial p}{\partial v} - \gamma_p p \right|_{\partial\Omega_p} = -\frac{J}{eD_p}, \quad \left. \frac{\partial n}{\partial v} \right|_{\partial\Omega_p} = 0, \quad (5)$$

де  $\gamma_n = \left( \frac{\alpha_n}{\mu_n} - \frac{\alpha_p}{\mu_p} \right) \frac{\mu_n}{D_n}$ ,  $\gamma_p = \left( \frac{\alpha_n}{\mu_n} - \frac{\alpha_p}{\mu_p} \right) \frac{\mu_p}{D_p}$ ,  $\alpha_{n,p}$  – коефіцієнти

поверхневої рекомбінації відповідно електронів і дірок.

Для потенціалу використовують наступні граничні умови:

$$\left. \varphi \right|_{\partial\Omega_n} = 0, \quad \left. \varphi \right|_{\partial\Omega_p} = U, \quad (6)$$

де  $U$  – стала, що визначає напругу на р-і-п-структурі. Припускається (за умови дії високочастотного сигналу), що напруга у основному прикладена до високоомної ділянки р-і-п-структури, падінням напруги на інжектуючих контактах нехтують.

Аналогічним способом визначають граничні умови для потенціалу і концентрації дірок та електронів на бічній поверхні р-і-п-діода:

$$\left. \frac{\partial \varphi}{\partial v} \right|_{\partial\Omega_0} = 0, \quad \left. \frac{\partial p}{\partial v} - \beta_p p \right|_{\partial\Omega_0} = 0, \quad \left. \frac{\partial n}{\partial v} - \beta_n n \right|_{\partial\Omega_0} = 0 \quad \left( \beta_p = \frac{\alpha_p}{D_p} \right). \quad (7)$$

Відмітимо, що стаціонарна математична модель р-і-п-діода (1–7) є однією із найпростіших і широко використовуваних моделей, проте вона не враховує генераційні, теплові ефекти у напівпровіднику, особливості протікання інжекційних процесів на контактах. Очевидно, що пошук розв'язку навіть спрощеної системи

нелінійної рівнянь (1) з граничними умовами (4–7) є складною математичною задачею.

Розв'язок задачі (1–7) отримують чисельними методами або шукають способи лінеаризації системи рівнянь (1). Наприклад, при аналітичному моделюванні використовується наближення амбіполярної дифузії носіїв заряду [1; 7], в межах якого припускають наближену рівність концентрації електронів і дірок в активній області діода. При цьому система рівнянь (1) приводиться до лінійного рівняння дифузії, розв'язок якого можна легко знайти в аналітичному вигляді. Очевидно, що умова рівності концентрацій порушується поблизу інжектуючих контактів і отриманий результат у кінцевому підсумку не забезпечує належного рівня адекватності моделі.

Відомо також, що для розв'язання нелінійних рівнянь математичної фізики розроблено та широко використовуються асимптотичні методи [8–13]. Так, зазначені методи використовуються для моделювання процесів в напівпровідникових р-п-діодах [14; 15]. Постановка задачі (1–7) відрізняється від висвітлених у літературних джерелах геометрією області (р-і-п-діоди – це напівпровідникові діоди з широкою базою, а в р-п-діодах наявний різкий перехід між областями з різними типами провідності), граничними умовами. Авторам не відоме застосування асимптотичних підходів розрахунку характеристик р-і-п-діодів.

Мета роботи – розробити підхід до розв'язання нелінійної системи рівнянь неперервності струму та Пуассона з відповідними граничними умовами у аналітичному вигляді на основі застосування методології теорії збурень.

### **Постановка задачі**

Характерні лінійні розміри об'ємних р-і-п-діодів такі, що справедливе співвідношення  $R \gg H$ . При цьому дифузійно-рекомбінаційні процеси на бічній поверхні діода практично не впливають на накопичення об'ємного заряду. Тому доцільним є вивчення одновимірної моделі досліджуваної системи.

Після застосування процедури нормування ( $\tilde{z} = \frac{z}{H}$  ( $0 < \tilde{z} < 1$ ),

$$\tilde{\varphi}(z) = \frac{e\varphi(z)}{kT}, \quad \tilde{U}(z) = \frac{eU(z)}{kT}, \quad \tilde{n}(z) = \frac{n(z)}{N_i} \quad (0 \leq \tilde{n}(z) \leq \frac{n_{\max}}{N_i}), \quad \tilde{p}(z) = \frac{p(z)}{N_i}$$

(  $0 \leq \tilde{p}(z) \leq \frac{P_{\max}}{N_i}$  ),  $\tilde{N}_d(z) = \frac{N_d(z)}{N_i}$  , де  $N_i$  – стала, визначає

концентрацію електронів у власному напівпровіднику, залежить від обраного матеріалу напівпровідника;  $T$  – стала, визначає температуру (300° К);  $k$  – стала Больцмана) система рівнянь (1) набуває вигляду (знак “~” надалі опущено):



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

$$\begin{cases} \mu \varphi'' = -(p - n + N_d), \\ n'' = n' \varphi' + n \varphi'' + A_n n, \\ p'' = -p' \varphi' - p \varphi'' + A_p p. \end{cases} \quad (8)$$

В (8) використано позначення:  $\mu = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 k T}{e^2 H^2 N_i}$  (малий параметр

$$\mu \sim 10^{-6} \div 10^{-8}), \quad A_n = \frac{H^2}{D_n \tau_n^*}, \quad A_p = \frac{H^2}{D_p \tau_p^*}.$$

При цьому умови (4–7) набувають вигляду:

$$\left. \frac{\partial n}{\partial z} - \gamma_n H n \right|_{z=0} = \frac{J}{e D_n} \frac{H}{N_i}, \quad \left. \frac{\partial p}{\partial z} \right|_{z=0} = 0, \quad (9)$$

$$\left. \frac{\partial p}{\partial z} - \gamma_p H p \right|_{z=1} = -\frac{J}{e D_p} \frac{H}{N_i}, \quad \left. \frac{\partial n}{\partial z} \right|_{z=1} = 0, \\ \left. \varphi \right|_{z=0} = 0, \quad \left. \varphi \right|_{z=1} = U.$$

### Побудова асимптотичного розв'язку

Задача (8–9) містить природним чином сформований малий параметр  $\mu$ , який є множником біля похідної в рівнянні Пуассона. Наявність малого параметра в постановці задачі дозволяє залучити асимптотичні методи теорії збурень для її розв'язання.

Виходячи із постановки задачі та беручи до уваги те, що на структуру розв'язку в основному впливають умови на контактних ділянках (точки околу точок  $z=0$ ,  $z=1$ ), через які здійснюється наповнення  $i$ -області неосновними носіями заряду, пропонуємо шукати розв'язок у вигляді наступних асимптотичних рядів [9–13]:

$$\varphi = \varphi(z, \mu) = \Phi_{(m)}(z, \mu) + \underline{\Phi}_{(m)}(\underline{\xi}, \mu) + \overline{\Phi}_{(m)}(\overline{\xi}, \mu) + R_{\varphi(m)}(z, \mu) = \quad (10)$$

$$= \sum_{i=0}^m \mu^i \varphi_i(z) + \sum_{i=0}^m \mu^i \underline{\Phi}_i(\underline{\xi}) + \sum_{i=0}^m \mu^i \overline{\Phi}_i(\overline{\xi}) + R_{\varphi(m)}(z, \mu),$$

$$n = n(z, \mu) = N_{(m)}(z, \mu) + \underline{N}_{(m)}(\underline{\xi}, \mu) + \overline{N}_{(m)}(\overline{\xi}, \mu) + R_{n(m)}(z, \mu) =$$

$$= \sum_{i=0}^m \mu^i n_i(z) + \sum_{i=0}^m \mu^i \underline{N}_i(\underline{\xi}) + \sum_{i=0}^m \mu^i \overline{N}_i(\overline{\xi}) + R_{n(m)}(z, \mu),$$



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

$$p = p(z, \mu) = P_{(m)}(z, \mu) + \underline{P}_{(m)}(\underline{\xi}, \mu) + \overline{P}_{(m)}(\overline{\xi}, \mu) + R_{p(m)}(z, \mu)$$

$$= \sum_{i=0}^m \mu^i p_i(z) + \sum_{i=0}^m \mu^i \underline{P}_i(\underline{\xi}) + \sum_{i=0}^m \mu^i \overline{P}_i(\overline{\xi}) + R_{p(m)}(z, \mu),$$

де  $\Phi_{(m)}(z, \mu)$ ,  $N_{(m)}(z, \mu)$ ,  $P_{(m)}(z, \mu)$  – регулярна частина асимптотики;  $\underline{\Phi}_{(m)}(\underline{\xi}, \mu)$ ,  $\underline{N}_{(m)}(\underline{\xi}, \mu)$ ,  $\underline{P}_{(m)}(\underline{\xi}, \mu)$ ,  $\overline{\Phi}_{(m)}(\overline{\xi}, \mu)$ ,  $\overline{N}_{(m)}(\overline{\xi}, \mu)$ ,  $\overline{P}_{(m)}(\overline{\xi}, \mu)$  – примежові поправки асимптотики відповідно в околах точок  $z=0$  та  $z=l$  ( $\underline{\xi} = \frac{z}{\sqrt{\mu}}$ ,  $\overline{\xi} = \frac{1-z}{\sqrt{\mu}}$  – відповідні регуляризуючі розтяги);  $R_{\varphi(m)}(z, \mu)$ ,  $R_{n(m)}(z, \mu)$ ,  $R_{p(m)}(z, \mu)$  – залишкові члени.

Підставляючи (10) в рівняння (8) та умови (9) та застосувавши стандартну процедуру «прирівнювання» [8–13], формуємо, аналогічно до [14; 15], задачі для пошуку членів розкладу. Зокрема, для знаходження головних членів асимптотики ( $\varphi_0(z)$ ,  $n_0(z)$ ,  $p_0(z)$ ,  $\underline{\Phi}_0(\underline{\xi})$ ,  $\underline{N}_0(\underline{\xi})$ ,  $\underline{P}_0(\underline{\xi})$ ,  $\overline{\Phi}_0(\overline{\xi})$ ,  $\overline{N}_0(\overline{\xi})$ ,  $\overline{P}_0(\overline{\xi})$ ) маємо:

$$\begin{cases} n_0 = p_0, \\ n_0'' - (n_0 \varphi_0')' - A_n n_0 = 0, \\ p_0'' + (p_0 \varphi_0')' - A_p p_0 = 0, \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \underline{\Phi}_0}{\partial \underline{\xi}^2} = -(\underline{P}_0 - \underline{N}_0), \\ \frac{\partial^2 \underline{N}_0}{\partial \underline{\xi}^2} - \frac{\partial}{\partial \underline{\xi}} \left( \underline{N}_0 \frac{\partial \underline{\Phi}_0}{\partial \underline{\xi}} \right) = 0, \\ \frac{\partial^2 \underline{P}_0}{\partial \underline{\xi}^2} + \frac{\partial}{\partial \underline{\xi}} \left( \underline{P}_0 \frac{\partial \underline{\Phi}_0}{\partial \underline{\xi}} \right) = 0, \end{cases} \quad (12)$$



$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \bar{\Phi}_0}{\partial \bar{\xi}^2} = -(\bar{P}_0 - \bar{N}_0), \\ \frac{\partial^2 \bar{N}_0}{\partial \bar{\xi}^2} - \frac{\partial}{\partial \bar{\xi}} \left( \bar{N}_0 \frac{\partial \bar{\Phi}_0}{\partial \bar{\xi}} \right) = 0, \\ \frac{\partial^2 \bar{P}_0}{\partial \bar{\xi}^2} + \frac{\partial}{\partial \bar{\xi}} \left( \bar{P}_0 \frac{\partial \bar{\Phi}_0}{\partial \bar{\xi}} \right) = 0, \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \left. \frac{dn_0}{dz} - \gamma_n H n_0 - \gamma_n H N_0 \right|_{z=0} &= \frac{J}{eD_n} \frac{H}{N_i}, & \left. \frac{dp_0}{dz} \right|_{z=0} &= 0, \\ \left. \frac{dN_0}{d\xi} \right|_{\xi=0} &= 0, & \left. \frac{dP_0}{d\xi} \right|_{\xi=0} &= 0, & \varphi_0 + \Phi_0 \Big|_{z=0} &= 0, \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \left. \frac{dp_0}{dz} - \gamma_p H p_0 - \gamma_p H P_0 \right|_{z=1} &= -\frac{J}{eD_p} \frac{H}{N_i}, & \left. \frac{dn_0}{dz} \right|_{z=1} &= 0, \\ \left. \frac{dP_0}{d\xi} \right|_{\xi=0} &= 0, & \left. \frac{dN_0}{d\xi} \right|_{\xi=0} &= 0, & \varphi_0 + \bar{\Phi}_0 \Big|_{y=1} &= U, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \lim_{\bar{\xi} \rightarrow \infty} \bar{\Phi}_0(\bar{\xi}) &= \lim_{\bar{\xi} \rightarrow \infty} \bar{N}_0(\bar{\xi}) = \lim_{\bar{\xi} \rightarrow \infty} \bar{P}_0(\bar{\xi}) = \lim_{\bar{\xi} \rightarrow \infty} \bar{\Phi}_0(\bar{\xi}) = \lim_{\bar{\xi} \rightarrow \infty} \bar{N}_0(\bar{\xi}) = \\ &= \lim_{\bar{\xi} \rightarrow \infty} \bar{P}_0(\bar{\xi}) = 0. \end{aligned} \quad (15)$$

Зауважимо, що умови (15) повинні виконуватись для того, щоб відповідні функції мали властивості примежових.

Шляхом виключення із системи рівнянь (11) функції потенціалу отримуємо еквівалентне системі лінійне диференціальне рівняння

$$\frac{d^2 n_0}{dz^2} - \frac{1}{2}(A_n + A_p)n_0 = 0, \quad (16)$$

яке також отримують і в рамках наближення амбіполярної дифузії (режим самоузгодженого поля) [1; 6; 7] теорії р-і-п-діодів.

Загальний розв'язок рівняння (16) подаємо у вигляді:

$$p_0(z) = n_0(z) = C_1 \exp\left(-\frac{z}{L}\right) + C_2 \exp\left(\frac{z}{L}\right), \quad \frac{1}{L^2} = \frac{1}{2}(A_n + A_p). \quad (17)$$

Знайдемо загальні розв'язки системи рівнянь (12) (аналогічно розглядається система рівнянь (13)). Введемо заміни  $V = \underline{P}_0 - \underline{N}_0$ ,  $W = \underline{P}_0 + \underline{N}_0$ . Тоді (12) набуває вигляду:

$$\begin{cases} \underline{\Phi}''_0 = V, \\ W'' + (V\underline{\Phi}'_0)' = 0, \\ V'' + (W\underline{\Phi}'_0)' = 0. \end{cases}$$



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

Отриману систему рівнянь приводимо до системи рівнянь першого порядку

$$\begin{cases} \underline{\Phi}'_0 = \Pi, \\ \Pi' = V, \\ W' + (V\Pi) = C_W, \\ V' + (W\Pi) = C_V, \end{cases} \quad (18)$$

де  $C_W, C_V$  – сталі інтегрування.

Система рівнянь (18) доповнюється граничними умовами на межі  $\underline{\xi} = 0$  і при  $\underline{\xi} \rightarrow \infty$ . Граничні умови записуємо на основі співвідношень (14) і (15) у вигляді:

$$\begin{aligned} \left. \frac{dV}{d\underline{\xi}} \right|_{\underline{\xi}=0} = 0, \quad \left. \frac{dW}{d\underline{\xi}} \right|_{\underline{\xi}=0} = 0, \quad (19) \\ \lim_{\underline{\xi} \rightarrow \infty} V(\underline{\xi}) = \lim_{\underline{\xi} \rightarrow \infty} W(\underline{\xi}) = 0. \end{aligned}$$

Для встановлення характеру поведінки функції  $\Pi(\underline{\xi})$  скористаємось її фізичним змістом. Згідно (18) ця функція має зміст напруженості електричного поля, що створене примежовими зарядами. На межі області ( $z = 0$ ) значення потенціалу стале, тому

$$\left. \frac{d\underline{\Phi}'_0}{d\underline{\xi}} \right|_{\underline{\xi}=0} = \Pi|_{\underline{\xi}=0} = 0. \text{ У глибині активної області (при } \underline{\xi} \rightarrow \infty) \text{ значення}$$

напруженості поля стале ( $\lim_{\underline{\xi} \rightarrow \infty} \Pi = \Pi_\infty$ ).

Здійснивши підстановку  $V$  з другого рівняння системи (18) у третє, виконавши інтегрування і скориставшись граничними умовами (19), отримуємо:

$$W = -\frac{\Pi^2}{2} + \frac{\Pi_\infty^2}{2}, \quad C_W = 0. \quad (20)$$

З (3) і (4) рівнянь системи (18) слідує характер зв'язку між функціями  $V(\xi)$ ,  $W(\xi)$ :  $V^2 = W^2 \Rightarrow V = \pm W$ . Із фізичних міркувань та із врахуванням способу введення цих функцій в останньому виразі обирається знак "-". Остаточню:

$$V = \frac{\Pi^2}{2} - \frac{\Pi_\infty^2}{2}. \quad (21)$$

Підстановка (21) у друге рівняння системи (18) дозволяє отримати диференціальне рівняння для визначення функції  $\Pi(\xi)$ :

$$\Pi' = \frac{\Pi^2}{2} - \frac{\Pi_\infty^2}{2}. \quad (22)$$

У результаті інтегрування (22) отримуємо одну із невідомих системи (18) у вигляді:

$$\Pi(\xi) = -\Pi_\infty \frac{\operatorname{sh}\left(\frac{\Pi_\infty \xi}{2}\right)}{\operatorname{ch}\left(\frac{\Pi_\infty \xi}{2}\right)}. \quad (23)$$

Таким чином, примежові концентрації носіїв заряду з співвідношень (23), (20), (21) та  $V = \underline{P}_0 - \underline{N}_0$ ,  $W = \underline{P}_0 + \underline{N}_0$  отримуємо у наступному вигляді:

$$\underline{P}_0 = 0, \quad (24)$$

$$\underline{N}_0(\xi) = \Pi_\infty^2 \left( 1 - \operatorname{th}^2 \left( \frac{\Pi_\infty \xi}{2} \right) \right).$$

Розв'язки задачі (13-14) знаходимо аналогічним способом. В результаті отримуємо примежові функції при  $z = 1$ :

$$\overline{P}_0(\xi) = \Pi_\infty^2 \left( 1 - \operatorname{th}^2 \left( \frac{\Pi_\infty \xi}{2} \right) \right), \quad (25)$$

$$\overline{N}_0 = 0.$$

Зауважимо, що у функціях (24), (25) фігурує однакова стала  $\Pi_\infty$ , оскільки у глибині активної області (при  $\xi \rightarrow \infty$  та  $\bar{\xi} \rightarrow \infty$ ) значення відповідних потенціалів електричного поля у системі співпадають.

Для побудови частинного розв'язку задачі потрібно знайти сталі  $C_1, C_2, \Pi_\infty$  з граничних умов (14).

В результаті отримуємо наступну систему алгебраїчних рівнянь відносно невідомих сталих:

$$\left(-\frac{1}{L}C_1 + \frac{1}{L}C_2\right) - \gamma_n H(C_1 + C_2) - \gamma_n H \Pi_\infty^2 = \frac{J}{eD_n} \frac{H}{N_i}, \quad (26)$$

$$\frac{1}{L} \left(-C_1 \exp\left(-\frac{1}{L}\right) + C_2 \exp\left(\frac{1}{L}\right)\right) - \gamma_p H \left(C_1 \exp\left(-\frac{1}{L}\right) + C_2 \exp\left(\frac{1}{L}\right)\right) -$$

$$-\gamma_p H \Pi_\infty^2 = -\frac{J}{eD_p} \frac{H}{N_i},$$

$$\int_0^1 \left( th \left( \frac{\Pi_\infty z}{2\sqrt{\mu}} \right) + th \left( \frac{\Pi_\infty (1-z)}{2\sqrt{\mu}} \right) \right) dz = \frac{U}{\Pi_\infty}.$$

Аналогічно до [10] знаходимо наступні поправки (регулярні та примежові) до одержаної головної частини розв'язку та оцінюємо залишкові члени, а саме, при додаткових умовах гладкості та їх узгодженості встановлюємо, що всі вони ( $R_{\varphi(m)}(z, \mu), R_{n(m)}(z, \mu), R_{p(m)}(z, \mu)$ ) мають порядок малості  $O(\mu^i)$ .

### Результати чисельного моделювання

Наближеним розв'язком нелінійної задачі (8–9) є функція розподілу концентрації носіїв заряду в  $i$ -області  $p$ - $i$ - $n$ -діода виду (містить головні члени асимптотичних рядів (10)):

$$p(z) + n(z) = 2C_1 \exp\left(-\frac{z}{L}\right) + 2C_2 \exp\left(\frac{z}{L}\right) + \Pi_\infty^2 \left( \left( 1 - th^2 \left( \frac{\Pi_\infty z}{2\sqrt{\mu}} \right) \right) + \left( 1 - th^2 \left( \frac{\Pi_\infty (1-z)}{2\sqrt{\mu}} \right) \right) \right),$$

$$C_2 = \frac{B(1 + \gamma_n HL) - A(1 + \gamma_p HL) e^{-\frac{1}{L}}}{(1 + \gamma_n HL)(1 + \gamma_p HL) e^{\frac{1}{L}} - (1 - \gamma_n HL)(1 + \gamma_p HL) e^{-\frac{1}{L}}}, \quad (27)$$

$$C_1 = \frac{-A(1 + \gamma_n HL) + (1 - \gamma_n HL)C_2}{(1 + \gamma_n HL)},$$

$$\ln ch \left( \frac{\Pi_\infty}{2\sqrt{\mu}} \right) = \frac{U}{4\sqrt{\mu}},$$



$$A = \frac{J}{eD_n} \frac{HL}{N_i} + \gamma_n HL \Pi^2_{\infty}, \quad B = -\frac{J}{eD_p} \frac{HL}{N_i} + \gamma_p HL \Pi^2_{\infty}.$$

Функція розподілу концентрації носіїв заряду, що отримана у результаті розв'язання рівняння амбіполярної дифузії має наступний вигляд:

$$p(z) + n(z) = 2\tilde{C}_1 \exp\left(-\frac{z}{L}\right) + 2\tilde{C}_2 \exp\left(\frac{z}{L}\right), \quad (28)$$

$$\tilde{C}_2 = \frac{B(1 + \gamma_n HL) - A(1 + \gamma_p HL) e^{-\frac{1}{L}}}{(1 + \gamma_n HL)(1 + \gamma_p HL) e^{\frac{1}{L}} - (1 - \gamma_n HL)(1 + \gamma_p HL) e^{-\frac{1}{L}}},$$

$$\tilde{C}_1 = \frac{-A(1 + \gamma_n HL) + (1 - \gamma_n HL) \tilde{C}_2}{(1 + \gamma_n HL)},$$

$$A = \frac{J}{eD_n} \frac{HL}{N_i}, \quad B = -\frac{J}{eD_p} \frac{HL}{N_i}.$$

Відмітимо, що в результаті застосування асимптотичного методу традиційний розв'язок природнім чином з'являється на одному зі етапів розв'язання задачі як один із головних членів асимптотики. Знайдені примежові функції уточнюють традиційну модель [1]. Окрім цього, відмінність між (27) та (28) забезпечують граничні умови різного виду. У запропонованій моделі розподілу концентрації плазми (27) з'являється додатковий параметр – напруга на контактах  $U$ , що також певною мірою забезпечує підвищення рівня адекватності побудованої моделі.

Результати чисельного моделювання показано на графіках залежності концентрації електронів і дірок в активній області р-і-п-діода (рис. 1–3). В експериментах використано наступні значення сталих:  $N_i = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ,  $T = 300 \text{ }^\circ\text{K}$ ,  $k = 1,38 \cdot 10^{23} \text{ Дж/К}$ ,  $J = 0,4 \text{ мА/см}^2$ ,  $U = 5 \text{ мВ}$ ,  $H = 30 \text{ мкм}$ ,  $D_n = 30 \text{ см}^2/\text{с}$ ,  $D_p = 6 \text{ см}^2/\text{с}$ ,  $\tau_n^* = 20 \text{ мкс}$ ,  $\tau_p^* = 25 \text{ мкс}$ .

Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

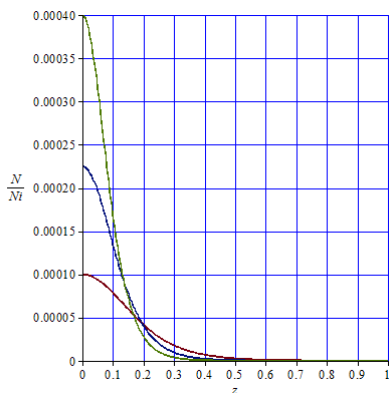


Рис. 1. Залежність примежової концентрації електронів від координати при різних відносних напругах на контактах

Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

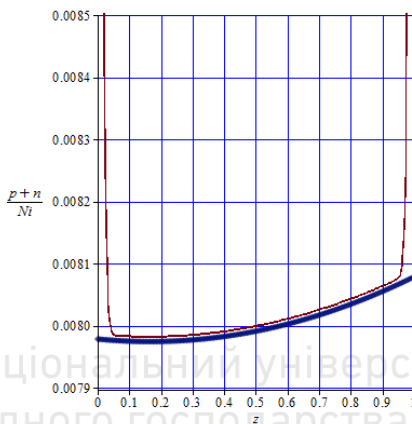


Рис. 2. Залежність сумарної концентрації електронів і дірок (потовщена лінія – модель амбіполярної дифузії)

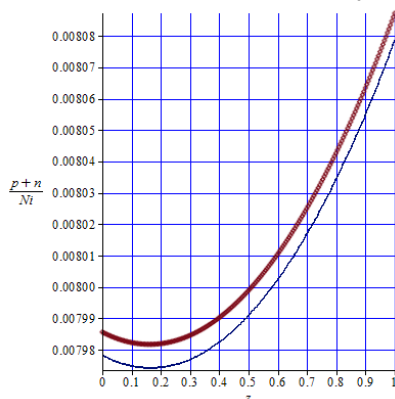



Рис. 3. Залежність концентрації електронів і дірок (регулярні члени розкладу) від координати. Тонка лінія – модель амбіполярної дифузії



На рис. 2 показано розподіли концентрації носіїв заряду в  $i$ -області. Тонка крива відображає результати моделювання асимптотичними методами, потовщена – результати моделювання в рамках наближення амбіполярної дифузії. На рис. 3 відображено аналогічні залежності (без урахування вкладу примежових функцій): тонкою лінією показано розподіл концентрації носіїв заряду, що подається головними членами регулярної частини асимптотики; потовщеною – результат розв'язання рівняння амбіполярної дифузії. Величини накопиченого заряду у активній області при зазначених вище густині струму та напрузі на контактах, що оцінені з використанням удосконаленої моделі та в рамках наближення амбіполярної дифузії, відрізняються в межах 3%. Із зростанням значення густини струму та прикладеної напруги різниця оцінок величини накопиченого заряду також зростає. Така поведінка пояснюється зростанням концентрації носіїв заряду у контактних зонах, яку не можна відслідкувати в рамках застосування інших модельних підходів.

### Висновки

Розроблено математичну модель у вигляді нелінійної сингулярно збуреної крайової задачі для системи рівнянь неперервності струму носіїв заряду та Пуассона для прогнозування стаціонарного розподілу концентрації електронно-діркової плазми в  $i$ -області об'ємних  $p$ - $i$ - $n$ -діодів, яка забезпечує можливість адекватно описувати стан плазми не тільки у внутрішності активної області діода (відтворюючи результати застосування наближення амбіполярної дифузії), а і, що важливо, поблизу зон  $p$ - $i$ - та  $n$ - $i$ -контактів.

Знайдені аналітичні функціональні залежності удосконалюють традиційну модель, розроблену в рамках застосування наближення амбіполярної дифузії, введенням примежових поправок. Показано, що навіть головні члени асимптотик (регулярні частини та примежові поправки) адекватно моделюють стаціонарний розподіл носіїв заряду в активній області  $p$ - $i$ - $n$ -діодів.

Згідно з даними чисельних експериментів – концентрація носіїв заряду у приконтактних областях діода значно перевищує концентрацію носіїв внутрішньої області. Цей факт добре узгоджується із фізичним уявленням про роботу  $p$ - $i$ - $n$ -діода – в областях інжекції носіїв заряду певного типу концентрація цих носіїв значно перевищує концентрацію носіїв заряду протилежного типу,

тут не забезпечуються умови рівності концентрацій дірок та електронів, в межах якої працює наближення амбіполярної дифузії. Таким чином, запропонована модель вирішує протиріччя, закладене традиційною моделлю, з'являється можливість вивчати поведінку електронно-діркової плазми у приконтактних областях. Як і очікувалось, запропонований підхід навіть в межах головних частин розв'язку більш природно (у порівнянні з традиційними підходами) відображає суть досліджуваного процесу.



та природокоористування

1. Sze S., Kwok K. *Physics of Semiconductor Devices*. New York : Wiley-Interscience, 2006. 815 p.
2. Гусятинер М. С., Горбачев А. И. Полупроводниковые сверхвысокочастотные диоды. М. : Радио и связь, 1985. 262 с.
3. Lebedev I. V., Shnitnikov A. S., Dyakov I. V., Borisova N. A. Impedance properties of high-frequency PIN diodes. *Solid-State Electronics*. 1998. Vol. 41. № 1. P. 121–128.
4. Grimalsky V. V., Kishenko Ya. I., Koshevaya S. V., Moroz I. P. The Interaction of Powerful Electromagnetic Waves With Integrated p-i-n-structures. *Physics and Engineering of Mm and Submm Waves : Doc. of Int. Symp.*, June 7–10, 1994. Kharkov, Ukraine. Vol. 1. P. 238–239.
5. Haine M. E., Rose F. W. G. On the conductance of p-i-n junctions at high microwave fields. *Solid-State Electron*. 1972. Vol. 15. No. 6. P. 687–705.
6. Адирович Э. И., Карагеоргий-Алкалаев П. М., Лейдерман А. Ю. Токи двойной инжекции в полупроводниках / под ред. Гальперина. М. : Советское радио, 1978. 320 с.
7. Бонч-Бруевич В. Л., Калашников С. Г. Физика полупроводников. М. : Наука, 1990. 685 с.
8. Тихонов А. Системы дифференциальных уравнений, содержащие малые параметры. *Математический сборник*. 1952. № 3. Т. 31(73). С. 575–586.
9. Вишик М. И., Люстерник Л. А. Регулярное вырождение и пограничный слой для линейных дифференциальных уравнений с малым параметром. *УМН*. 1957. Т. 12. № 5. С. 3–122.
10. Васильева А. Б. Бутузов В. Ф. Асимптотические методы в теории сингулярных возмущений. М. : Высш. шк., 1990. 208 с.
11. Бомба А. Я., Присяжнюк І. М., Присяжнюк О. В. Методи теорії збурень прогнозування процесів тепломасоперенесення в пористих та мікропористих середовищах. Рівне : О. Зень, 2017. 291 с.
12. Бомба А. Я. Про асимптотичний метод наближеного розв'язання однієї задачі масопереносу при фільтрації в пористому середовищі. *Український математичний журнал*. 1982. № 4. Т. 34. С. 37–40.
13. Smith D. R. *Singular-Perturbation Theory. An Introduction with Applications*. Cambridge : Cambridge Univ. Press, 1985. 520 p.
14. Беянин М. П. Об асимптотическом решении одной модели p-n- перехода. *Вычислительная математика и математическая физика*. 1986. № 2. Т. 26. С. 306–311.
15. Васильева А. Б., Стельмах В. Г. Сингулярно возмущенные системы теории

полупроводниковых приборов. *Вычислительная математика и математическая физика*. 1977. Т. 17. № 2. С. 339–348.

## REFERENCES:

1. Sze S., Kwok K. *Physics of Semiconductor Devices*. New York : Wiley-Interscience, 2006. 815 p.
2. Gusyatiner MS, Gorbachev AI *Semiconductor microwave diodes*. M. : Radio and communication, 1985. 262 p.
3. Lebedev I. V., Shnitnikov A. S., Dyakov I. V., Borisova N. A. Impedance properties of high-frequency PIN diodes. *Solid-State Electronics*. 1998. Vol. 41. № 1. P. 121–128.
4. Grimalsky V. V., Kishenko Ya. I., Koshevaya S. V., Moroz I. P. The Interaction of Powerful Electromagnetic Waves With Integrated p-i-n-structures. *Physics and Engineering of Mm and Submm Waves : Doc. of Int. Symp.*, June 7–10, 1994. Kharkov, Ukraine. Vol. 1. P. 238–239.
5. Haine M. E., Rose F. W. G. On the conductance of p-i-n junctions at high microwave fields. *Solid-State Electron*. 1972. Vol. 15. No. 6. P. 687–705.
6. Adirovich E. I., Karageorgiy-Alkalaev P. M., Leyderman A. Yu. Toki dvoynoy injektsii v poluprovodnikah / pod red. Galperina. M. : Sovetskoe radio, 1978. 320 s.
7. Bonch-Bruevich V. L., Kalashnikov S. G. *Fizika poluprovodnikov*. M. : Nauka, 1990. 685 s.
8. Tihonov A. Sistemy differentsialnykh uravneniy, soderjaschie малыe parametryi. *Matematicheskii sbornik*. 1952. № 3. Т. 31(73). S. 575–586.
9. Vishik M. I., Lyusternik L. A. Regulyarnoe vyirojdenie i pogranichnyiy sloy dlya lineynykh differentsialnykh uravneniy s malym parametrom. *UMN*. 1957. Т. 12. № 5. S. 3–122.
10. Vasileva A. B. Butuzov V. F. Asimptoticheskie metody v teorii singulyarnykh vozmuscheniy. M. : Vyssh. shk., 1990. 208 s.
11. Bomba A. Ya., Prysiazhniuk I. M., Prysiazhniuk O. V. Metody teorii zburon prohnozuvannia protsesiv teplomasoperenesennia v porystykh ta mikroporystykh seredovyschakh. Rivne : O. Zen, 2017. 291 s.
12. Bomba A. Ya. Pro asymptotychnyi metod nablyzhenoho rozviazannia odniiei zadachi masoperenosu pry filtratsii v porystomu seredovyschi. *Ukrainskyi matematychnyi zhurnal*. 1982. № 4. Т. 34. S. 37–40.
13. Smith D. R. *Singular-Perturbation Theory. An Introduction with Applications*. Cambridge : Cambridge Univ. Press, 1985. 520 p.

**Bomba A. Ya., Doctor of Engineering, Professor, Moroz I. P., Candidate of Physico-Mathematical Sciences (Ph.D.), Associate Professor**  
(National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

**NUMERICAL-ASYMPTOTIC METHOD FOR SOLVING SINGULARLY  
PERTURBED MODEL PROBLEMS ON THE STATIONARY DISTRIBUTION  
OF CHARGE CARRIERS IN THE ACTIVE REGION OF  
P-I-N-DIODES**



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

**The method has been developed for predicting the electron-hole plasma concentration stationary distribution in the i-region of bulk p-i-n-diodes, which makes it possible to adequately describe the state of the plasma not only inside the active region of the diode (reproducing the results of applying the ambipolar diffusion approximation), but also, which is important, near the p-i- and n-i- contacts. The corresponding mathematical model in the form of a nonlinear singularly perturbed boundary value problem for the system of equations of the charge carriers current continuity and Poisson`s is constructed. Its approximate solution in the form of the corresponding asymptotic series in powers of a small parameter is obtained. The computer experiment is carried out.**

**Keywords:** the perturbation method; singularly perturbed problem; asymptotic series; the boundary functions; diffusion-drift process; bulk p-i-n-diode.

**Сорока В. С., к.с.-г.н., доцент** (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне), **Лагоднюк О. А., к.т.н., доцент** (Український Католицький Університет, м. Львів), **Корбутяк В. І., к.т.н., доцент, Клімова А. В., доктор філософії, Ровенець Т. О., к.е.н.** (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)



## **ОРГАНІЗАЦІЙНО-ІНФОРМАЦІЙНЕ ТА ДОКУМЕНТНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЦИФРОВОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ ОСВІТЬНОГО ПРОЦЕСУ У НАЦІОНАЛЬНОМУ УНІВЕРСИТЕТІ ВОДНОГО ГОСПОДАРСТВА ТА ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ**

**В статті досліджено організаційно-інформаційне та документне забезпечення цифрової трансформації освітнього процесу НУВГП. Проаналізовано цифрові інструменти, запроваджені в університеті. Розкрито вплив кожного з них на функціонування внутрішньої системи забезпечення якості освіти. Систематизовано внутрішні нормативні документи університету, які регламентують застосування цифрових інструментів. Виокремлено критерії оцінювання якості освітньої програми, які забезпечуються завдяки впровадженню та застосуванню кожного цифрового інструменту.**

**Ключові слова:** цифровізація освіти; цифрові інструменти; цифровий університет; внутрішня система забезпечення якості освіти; якість освітньої програми.

**Актуальність теми.** Головними трендами на вітчизняному і міжнародному ринках праці є цифрові компетенції, оскільки саме вони забезпечують підґрунтя для більш ефективного набуття низки інших важливих компетенцій в різних сферах. Відповідно цифровізацію вищої освіти можна вважати базовою основою конкурентоспроможності закладів вищої освіти, а не лише викликом сучасності. На законодавчому рівні актуальність цифрової трансформації вищої освіти обумовлена такими принципами державної політики у сфері вищої освіти, як відкритість формування структури і обсягу освітньої та професійної підготовки фахівців з вищою освітою, сприяння сталому розвитку суспільства шляхом

підготовки конкурентоспроможного людського капіталу і створення умов для освіти протягом життя, міжнародна інтеграція та інтеграція системи вищої освіти України у Європейській простір вищої освіти тощо [1].

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Дослідження цифрової трансформації вищої освіти є відносно новим напрямом у науці. Цю проблематику досліджували Лук'яненко Д., Степаненко О. [2], Єгорченкова Н., Кичань О., Тесля Ю., Хлевна Ю. [3] та ін. Однак такі дослідження є актуальними як через недостатнє наукове розроблення, так і через те, що цифрова трансформація, крім спільних рис для усіх закладів вищої освіти, відрізняється темпами та специфікою у кожному окремому закладі.

**Мета статті** – проаналізувати організаційно-інформаційне та документне забезпечення впровадження і застосування цифрових інструментів в освітньому процесі, а також визначити їхній вплив на функціонування внутрішньої системи забезпечення якості освіти НУВГП.

**Викладення основного матеріалу.** Цифровізація вищої освіти передбачає не лише впровадження сучасних інформаційно-комунікаційних технологій в освітній процес університетів, а є значно ширшим за змістом та обсягом процесом. Науковці здебільшого розглядають сучасний цифровий університет як докорінно змінений за структурою, змістом освіти, підходами до адміністрування, розвитку людського капіталу, наукової діяльності, системою управління якістю освіти навчальний заклад [2, С. 245].

Першочергові сфери, ключові політики, ініціативи та проекти «цифровізації» України на найближчі 3 роки визначає «Цифрова адженда України – 2020». Даний документ акцентує увагу на першочерговості цифровізації сфери освіти в цілому та вищої освіти зокрема [4].

Враховуючи сучасні тенденції, керівництвом Національного університету водного господарства та природокористування було визначено і затверджено внутрішнім нормативним документом візію, місію, цінності та стратегічні напрями розвитку університету на 2020–2025 рр. [5]. Візія НУВГП – Digital University (Цифровий Університет) – побудова системи, яка сама є інтелектом, породжує інтелект і впливає на розвиток та гармонізацію суспільства. Місія НУВГП – генерація інтелектуальної еліти в середовищі інновацій. Мета діяльності і розвитку НУВГП – формування привабливої та



конкурентоспроможної системи функціонування університету, інтегрованої у світовий, у тому числі європейський, освітній та дослідницький простір. Стратегія НУВГП передбачає забезпечення сучасними інструментами управління адміністрації університету; розробку та впровадження зручних і зрозумілих інструментів для забезпечення навчального процесу всіх учасників; формування іміджу університету як сучасного відкритого цифрового університету. Серед принципів діяльності НУВГП важливим є принцип інноваційності, що полягає у реагуванні на виклики часу через створення і використання новітніх технологій та продуктів [5].

В 2014 році у переліку цифрових інструментів НУВГП були лише домен сайту та елементи електронної системи ДЕКАНАТ. Цифрова трансформація університету впродовж 2014–2021 рр. не тільки значно розширила даний перелік, але й здійснила вагомий вплив на забезпечення якості вищої освіти. Зокрема кожен впроваджений цифровий інструмент на разі дозволяє забезпечити дотримання критеріїв оцінювання освітніх програм, визначених Національним агентством із забезпечення якості вищої освіти [6].

Цифровізація управління НУВГП здійснюється через елементи управління: планування та адміністрування (рис. 1), відкриті ресурси (рис. 2), допомогу, моніторинг, безпеку даних (рис. 3).



Рис. 1. Цифрові інструменти для трансформації планування та адміністрування НУВГП

Відповідно до «Положення про організацію освітнього процесу у НУВГП (нова редакція)» [7] для організації та зручності навчального

процесу, безпеки усіх учасників навчального процесу, ефективної роботи і комунікації НУВГП використовує *Google Workspace for Education*. Це набір інструментів та сервісів Google, розроблених спеціально для закладів освіти. Він містить декілька, подібних до традиційних, офісних наборів, включаючи Gmail (корпоративна пошта), Meet, Google Календар, Диск, Документи тощо. Використання цього цифрового інструменту забезпечує освітню, організаційну, інформаційну, консультативну та соціальну підтримку здобувачів вищої освіти, що є одним з елементів внутрішньої системи забезпечення якості освіти (ВСЗЯО).

*Корпоративна пошта НУВГП* – ключовий цифровий інструмент, який використовується для планування та адміністрування. Вона базується на Google Gmail, складовій частині хмарного комплексу *Google Workspace for Education*. Призначена для службового листування всередині університету та за його межами, а також є ключем доступу до ряду сервісів (наприклад, для входу в iDoc, Навчальну платформу Moodle і ін.). Відповідно до «Положення про організацію та користування корпоративною електронною поштою НУВГП» [8] працівники отримують у користування корпоративну пошту на підставі наказу про прийняття на роботу на період роботи в університеті. Студенти, аспіранти, докторанти – на підставі наказу про зарахування на період навчання (плюс 5 років для можливості здійснення моніторингу за якістю освітніх програм). Використання корпоративної пошти як цифрового інструменту дозволяє забезпечити такі елементи ВСЗЯО: 1. Своєчасне надання усім учасникам освітнього процесу доступної та зрозумілої інформації щодо цілей, змісту і програмних результатів навчання, порядку та критеріїв оцінювання в межах окремих освітніх компонентів. 2. Запровадження практики збирання, аналізу та врахування інформації щодо кар'єрного шляху випускників освітньої програми.

*Система електронного документообігу (далі – СЕДО)* – запроваджена відповідно до Наказу «Про впровадження системи електронного документообігу», розроблена компанією «iCoge», має назву «iDoc НУВГП», розміщена на серверних потужностях НУВГП.

Організація електронного документообігу в НУВГП здійснюється відповідно до вимог Закону України «Про електронні документи та електронний документообіг» [9], Постанови Кабінету Міністрів України «Деякі питання документування управлінської діяльності» [10] та регламентується «*Положенням про організацію*

освітнього процесу у НУВГП (нова редакція)» [7], «Положенням про публічну інформацію в НУВГП» [11]. Відповідальність за організацію електронного документообігу в університеті покладено на загальний відділ, за технічну експлуатацію СЕДО та забезпечення захисту інформації в системі – на відділ інформаційних технологій інформаційно-обчислювального центру НУВГП. iDoc дозволяє організувати та забезпечити чіткі бізнес-процеси в університеті. Для реєстрації або вилучення користувачів у системі електронного документообігу керівники підрозділів подають заявки через єдиний сервіс надання інформаційних послуг НУВГП у категорію «Електронний документообіг». Через систему електронного документообігу також відбувається затвердження методичних рекомендацій, робочих програм, розгляд та затвердження навчальних посібників, моніторинг виконання рішень через протоколи наради, що регламентується «Порядком розгляду та затвердження розміщення силабусів і методичних вказівок через електронний документообіг iDoc (нова редакція)» [12] і «Положенням про моніторинг, оновлення, модернізацію та закриття освітніх програм в НУВГП» [13].

Серед переваг використання СЕДО слід відмітити суттєву економію часу та оперативність у прийнятті управлінських рішень, можливість віддаленої роботи з масивами документів, оперативність пошуку документів, делегування повноважень, надійне збереження документів (не губляться), захищеність документів (не переглядаються неуповноваженими користувачами), неможливість підготувати документ «заднім числом» [3, С. 35]. СЕДО охоплює всіх працівників, а також представників студентського самоврядування.

Досвід НУВГП стосовно впровадження і використання СЕДО в організації навчального процесу визнано МОН України і включено до «Методичних рекомендацій щодо впровадження змішаного навчання у закладах фахової передвищої та вищої освіти» [14]. СЕДО забезпечує такі елементи ВСЗЯО: 1. Формування в академічній спільноті закладу вищої освіти культури якості. 2. Визначення чітких та зрозумілих правил і процедур, які є доступними та яких послідовно дотримуються під час реалізації освітньої програми. 3. Впровадження та функціонування документальної комунікації.

*Політек-СОФТ* – програмне забезпечення для закладів вищої освіти. Використовується усіма деканатами навчально-наукових інститутів (ПС-Деканат, ПС-Електронний журнал) та навчально-

методичним відділом університету для планування навчального процесу: розробки навчальних планів, робочих навчальних планів, формування навчального навантаження науково-педагогічних працівників, складання розкладу тощо. Функціонує з використанням власного спеціального серверного обладнання та інтегрований з ЄДБО. Внутрішня регламентація впровадження і використання здійснюється відповідно до «Положення про навчальний план освітньої програми в НУВГП» [15], «Положення про форми навчання, форми організації освітнього процесу та види навчальних занять у НУВГП» [16], «Положення про організацію вибору освітніх компонентів для здобувачів першого та другого рівнів вищої освіти НУВГП» [17], «Положення про запобігання плагіату випускних кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти» [18]. Політек-СОФТ забезпечує:

1. Надання можливості для формування індивідуальної освітньої траєкторії, що передбачено структурою освітньої програми, зокрема через індивідуальний вибір здобувачами вищої освіти навчальних дисциплін в обсязі, визначеному законодавством.
2. Здійснення моніторингу навчального процесу.

Платформа Moodle – використовується для організації навчального процесу, вільного вибору дисциплін здобувачами, організації поточного та підсумкового контролю, комунікації та ін. Регламентується «Положенням про організацію вибору освітніх компонентів для здобувачів першого та другого рівнів вищої освіти НУВГП» [17], «Положенням про силабус (нова редакція)» [19], «Положенням про запобігання плагіату випускних кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти» [18]. Дозволяє забезпечити такі елементи ВСЗЯО:

1. Можливість формування індивідуальної освітньої траєкторії, що передбачено структурою освітньої програми, зокрема через індивідуальний вибір здобувачами вищої освіти навчальних дисциплін в обсязі, визначеному законодавством.
2. Своєчасне надання усім учасникам освітнього процесу доступної і зрозумілої інформації.
3. Здійснення перевірки випускних кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на плагіат.



Рис. 2. Цифрові інструменти для трансформації відкритих ресурсів НУВГП

*Вебпортал НУВГП* – офіційний сайт університету, який було оновлено наприкінці 2021 року. Зокрема на вимогу МОН України відкрито новий розділ «Публічна інформація», метою якого було стисло, але структуровано зібрати всю інформацію про університет, яка є необхідною для прозорості діяльності. Функціонування вебпорталу НУВГП регламентується «*Положенням про організацію освітнього процесу у НУВГП (нова редакція)*» [7] та «*Положенням про публічну інформацію в НУВГП*» [11]. Вебпортал НУВГП забезпечує такі елементи ВСЗЯО: 1. Освітня, організаційна, інформаційна, консультативна та соціальна підтримка здобувачів вищої освіти. 2. Своєчасне надання усім учасникам освітнього процесу доступної та зрозумілої інформації. 3. Забезпечення безоплатного доступу до відповідної інфраструктури та інформаційних ресурсів.

*Цифровий репозиторій* – використовується для накопичення, систематизації і зберігання в електронному вигляді освітніх програм, всіх внутрішніх нормативних документів (зокрема, які необхідні для проходження акредитації), навчально-методичних матеріалів, рідкісної та цінної літератури (яка сканується та описується), наукових публікацій науково-педагогічних працівників, а також матеріалів наукових конференцій, які проводяться в університеті тощо, надання відкритого доступу до розміщених інтелектуальних

продуктів засобами інтернет-технологій, поширення матеріалів у середовищі світового науково-освітнього товариства (індексація Google Scholar). Регламентується «Положенням про започаткування, розроблення та затвердження освітніх програм в НУВГП» [20], «Положенням про силабус (нова редакція)» [19], «Методичними рекомендаціями до створення силабусів освітніх компонентів в НУВГП» [21]. Серед позитивних результатів запровадження варто відмітити те, що саме цифровий репозиторій у 2020 році допоміг «безболісно» для всіх учасників освітнього процесу перейти на дистанційну форму навчання після запровадження карантину. Цифровий репозиторій забезпечує: 1. Своєчасне надання усім учасникам освітнього процесу доступної та зрозумілої інформації. 2. Гарантування досягнення визначених освітньою програмою цілей та програмних результатів навчання за допомогою матеріально-технічних ресурсів (бібліотека, інша інфраструктура, обладнання тощо), а також навчально-методичного забезпечення освітньої програми. 3. Забезпечення безоплатного доступу до відповідної інфраструктури та інформаційних ресурсів.

*Платформа силабусів* – застосовується для оприлюднення, накопичення, систематизації і зберігання силабусів освітніх програм навчальних дисциплін, які є новими інформаційними інструментами та базуються на принципах академічної доброчесності, а також відповідають вимогам студентоцентрованого підходу. Силабус є засобом комунікації між викладачем і здобувачем, а також містить нові важливі елементи, яких не було в робочих програмах (наприклад, правила академічної доброчесності, вимоги до відвідування, неформальна та інформальна освіта і ін.). Платформа систематизує силабуси в розрізі навчальних років, форм навчання, навчально-наукових інститутів, освітніх рівнів, освітніх програм. Регламентується: «Положенням про силабус (нова редакція)» [19], «Методичними рекомендаціями до створення силабусів освітніх компонентів в НУВГП» [21], «Положенням про семестровий поточний та підсумковий контроль навчальних досягнень здобувачів вищої освіти (нова редакція)» [22]. Платформа силабусів забезпечує: 1. Відповідність форм і методів навчання та викладання вимогам студентоцентрованого підходу. 2. Визначення чітких та зрозумілих правил проведення контрольних заходів.

*Електронна енциклопедія WIKіситет* – власна Вікіпедія, яка містить інформацію про усіх викладачів, усі кафедри, усі інститути,

усі структурні підрозділи тощо. Регламентується «Положенням про організацію освітнього процесу у НУВГП (нова редакція)» [7] та «Положенням про публічну інформацію в НУВГП» [11]. Для внесення інформації використовується корпоративний вхід. Забезпечує такі елементи ВСЗЯО: 1. Своєчасне надання усім учасникам освітнього процесу доступної та зрозумілої інформації. 2. Забезпечення безоплатного доступу до відповідної інфраструктури та інформаційних ресурсів.



Национальный университет  
водного хозяйства и  
та природокористуванн



Рис. 3. Цифрові інструменти для трансформації допомоги, моніторингу та безпеки даних НУВГП

*Мобільний додаток «Мій НУВГП»* – містить розклад, ID картку, забезпечує пошук, функціонування особистого кабінету, інтерактивну стрічку повідомлень та ін. Дозволяє забезпечити: освітню, організаційну, інформаційну, консультативну та соціальну підтримку здобувачів вищої освіти, що навчаються за освітньою програмою.

*Єдиний сервіс надання інформаційних послуг (Helpdesk)* – сервісна структура, яка розділяє проблеми користувачів за напрямками та типами. Призначена для оптимізації вирішення технічних проблем, які пов'язані з інтерактивними ресурсами


університету, а також передбачає можливість електронних звернень здобувачів вищої освіти та науково-педагогічних працівників, з метою внесення пропозицій, скарг, зауважень відповідно до «Положення про семестровий поточний та підсумковий контроль навчальних досягнень здобувачів вищої освіти (нова редакція)» [22]. Забезпечує такі елементи ВСЗЯО: 1. Використання процедур запобігання і врегулювання конфлікту інтересів, впровадження порядку оскарження результатів контрольних заходів та їх повторного проходження. 2. Освітню, організаційну, інформаційну, консультативну та соціальну підтримку здобувачів вищої освіти. 3. Забезпечення дотримання політики і процедур вирішення конфліктних ситуацій, які є доступними для всіх учасників освітнього процесу та яких послідовно дотримуються під час реалізації освітньої програми.

*Платформа для обговорення Експертум* – використовується як платформа, на якій обов'язково розміщуються освітні програми або зміни до них з метою отримання зауважень та пропозицій заінтересованих сторін (не пізніше, ніж за місяць до затвердження освітньої програми або змін до неї). Регламентується «Порядком опитування здобувачів вищої освіти та випускників стосовно якості освіти та освітньої діяльності у НУВГП» [23], «Положенням про започаткування, розроблення та затвердження освітніх програм у НУВГП» [20], «Положенням про моніторинг, оновлення, модернізацію та закриття освітніх програм у НУВГП» [13], «Положенням про публічну інформацію у НУВГП» [11]. Даний інструмент забезпечує: 1. Оприлюднення на своєму офіційному сайті проєкту освітньої програми з метою отримання зауважень та пропозицій заінтересованих сторін. 2. Своєчасне надання усім учасникам освітнього процесу доступної і зрозумілої інформації.

Цифрова трансформація системи якості НУВГП включає формування системи незалежного оцінювання, системи якості та студентоцентрований підхід (силабус, перевантаження системи з липня 2020 року).

Ключова роль у ході формування системи незалежного оцінювання відводиться *Навчально-науковому центру незалежного оцінювання (ННЦНО)* – структурному підрозділу НУВГП, який проводить державну атестацію бакалаврів, вступні фахові випробування для магістрів, здійснює поточний (модульний) контроль і підсумковий контроль всіх курсів та форм навчання (у





спеціалізованих аудиторіях), використовуючи спеціальне серверне обладнання. Забезпечує знеособлене оцінювання на платформі MOODLE (усі іспити та модулі здобувачі здають на комп'ютерах, без участі викладачів), має інтегровані рішення з системою ПС-Деканат (журнал оцінок) та здійснює моніторинг якості засобів оцінювання. Є вагомим інструментом розбудови системи якості. Здійснює контроль за дотриманням «Положення про запобігання плагіату випускних кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти» [18]. ННЦНО створено у 2016 році відповідно до «Положення про Навчально-науковий центр незалежного оцінювання» [24]. Функціонування ННЦНО забезпечує: 1. Розробку форм контрольних заходів, чітких та зрозумілих критеріїв оцінювання здобувачів вищої освіти. 2. Визначення чітких та зрозумілих правил проведення контрольних заходів, а також політики, стандартів і процедур дотримання академічної доброчесності.

Координуючою ланкою, що на циклічній основі розвиває процес внутрішнього забезпечення якості відповідно до ESG та забезпечує функціонування системи СВЗЯВО є відділ якості освіти. Важливу роль у забезпеченні функціонування системи якості відіграє оцінка якості, яка, зокрема, здійснюється за допомогою системи опитування, що регламентується «*Порядком опитування здобувачів вищої освіти та випускників стосовно якості освіти та освітньої діяльності у НУВГП*» [23], а також «*Положенням про організацію та користування корпоративною електронною поштою НУВГП*» [8]. Цифровим інструментом, який використовується в системі опитування з метою оцінки якості освіти є Google forms, що забезпечує залучення здобувачів вищої освіти до процесу перегляду освітньої програми. З метою покращення функціонування системи якості в університеті в межах цифрової трансформації планується розробка власної системи опитування, якщо НАЗЯВО не надасть спеціальне програмне забезпечення для проведення опитувань.

**Висновки.** Проведене дослідження дозволяє стверджувати, що впродовж 2014–2021 рр. досягнення НУВГП в напрямку цифрової трансформації є більш, ніж суттєвими. Розроблено внутрішні нормативні документи, які регламентують організаційно-інформаційне забезпечення цифрової трансформації освітнього процесу університету. Досвід НУВГП стосовно впровадження і використання окремих цифрових інструментів в організації навчального процесу визнано МОН України. Впроваджені на сьогодні

цифрові інструменти не лише сприяють формуванню іміджу НУВГП як сучасного відкритого цифрового університету, але й безпосередньо підвищують якість освіти. Так, цифрова трансформація освітнього процесу НУВГП дозволяє забезпечити дотримання критеріїв оцінювання освітніх програм, визначених Національним агентством із забезпечення якості вищої освіти, що в свою чергу сприяє успішному проходженню університетом акредитації освітніх програм.



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

1. Про вищу освіту : Закон України від 01.07.2014 року № 1556-VII. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1556-18#Text> (дата звернення: 14.04.2022).
2. Лук'яненко Д. Г., Степаненко О. П. Digital university: проєкт розбудови цифрового університету в ДВНЗ «Київський національний економічний університет імені Вадима Гетьмана». *Цифрова економіка* : зб. матеріалів Національної науково-методичної конференції, 4–5 жовтня 2018 р. С. 245–249. Київ : КНЕУ. URL: [https://ir.kneu.edu.ua/bitstream/handle/2010/25986/ZE\\_2018\\_71.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://ir.kneu.edu.ua/bitstream/handle/2010/25986/ZE_2018_71.pdf?sequence=1&isAllowed=y) (дата звернення: 14.04.2022).
3. Єгорченкова Н. Ю., Тесля Ю. М., Хлевна Ю. Л., Кичань О. М., Методологічні аспекти створення цифрового університету. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Сер. Стратегічне управління, управління портфелями, програмами та проєктами.* 2020. № 1. С. 31–36. URL: <https://doi.org/10.20998/2413-3000.2020.1.4> (дата звернення: 14.04.2022).
4. Цифрова адженда України – 2020. («Цифровий порядок денний»–2020). Концептуальні засади (версія 1.0). Першочергові сфери, ініціативи, проєкти «цифровізації» України до 2020 року (проєкт). 2016. URL: <https://uccr.org.ua/uploads/files/58e78ee3c3922.pdf> (дата звернення: 14.04.2022).
5. Місія, візія, цінності та стратегічні напрями розвитку Національного університету водного господарства та природокористування на 2020–2025 рр. URL: <http://ep3.nuwm.edu.ua/16749/> (дата звернення: 14.04.2022).
6. Рекомендації щодо застосування критеріїв оцінювання якості освітньої програми/ Затверджено Національним агентством із забезпечення якості вищої освіти 17 листопада 2020 року / ТОВ «Український освітянський видавничий центр «Оріон»». К., 2020. 66 с.
7. *Положення про організацію освітнього процесу у НУВГП (нова редакція).* URL: <http://ep3.nuwm.edu.ua/4088/> (дата звернення: 14.04.2022).
8. *Положення про організацію та користування корпоративною електронною поштою НУВГП.* URL: <http://ep3.nuwm.edu.ua/6139/> (дата звернення: 14.04.2022).
9. Про електронні документи та електронний документообіг : Закон України від 22.05.2003 № 851-IV. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/851-15#Text> (дата звернення:

- 14.04.2022). **10.** Деякі питання документування управлінської діяльності : Постанова КМУ від 17.01.2018 року № 55. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/55-2018-%D0%BF#Text> (дата звернення: 14.04.2022). **11.** Положення про публічну інформацію в НУВГП. URL: <http://ep3.nuwm.edu.ua/6139/> (дата звернення: 14.04.2022). **12.** Порядок розгляду та затвердження розміщення силабусів і методичних вказівок через електронний документообіг iDoc (нова редакція). URL: <http://ep3.nuwm.edu.ua/20183/> (дата звернення: 14.04.2022). **13.** Положення про моніторинг, оновлення, модернізацію та закриття освітніх програм в НУВГП. URL: <http://ep3.nuwm.edu.ua/15915/> (дата звернення: 14.04.2022). **14.** Рекомендації щодо впровадження змішаного навчання у закладах фахової передвищої та вищої освіти. Методичні рекомендації МОН України від 24.06.2020 року № 1\_9-344. URL: <http://eprints.mdpu.org.ua/id/eprint/11493/1/zmishanenanavchannia-bookletsreads-2.pdf> (дата звернення: 14.04.2022). **15.** Положення про навчальний план освітньої програми в НУВГП. URL: <http://ep3.nuwm.edu.ua/20635/> (дата звернення: 14.04.2022). **16.** Положення про форми навчання, форми організації освітнього процесу та види навчальних занять у НУВГП. URL: <http://ep3.nuwm.edu.ua/6366/> (дата звернення: 14.04.2022). **17.** Положення про організацію вибору освітніх компонентів для здобувачів першого та другого рівнів вищої освіти НУВГП. URL: <http://ep3.nuwm.edu.ua/20051/> (дата звернення: 14.04.2022). **18.** Положення про запобігання плагіату випускних кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти. URL: <http://ep3.nuwm.edu.ua/6316/> (дата звернення: 14.04.2022). **19.** Положення про силабус (нова редакція). URL: <http://ep3.nuwm.edu.ua/18509/> (дата звернення: 14.04.2022). **20.** Положення про започаткування, розроблення та затвердження освітніх програм в НУВГП. URL: <http://ep3.nuwm.edu.ua/14287/> (дата звернення: 14.04.2022). **21.** Методичні рекомендації до створення силабусів освітніх компонентів в НУВГП. URL: <http://ep3.nuwm.edu.ua/20390/> (дата звернення: 14.04.2022). **22.** Положення про семестровий поточний та підсумковий контроль навчальних досягнень здобувачів вищої освіти (нова редакція). URL: <http://ep3.nuwm.edu.ua/15311/> (дата звернення: 14.04.2022). **23.** Порядок опитування здобувачів вищої освіти та випускників стосовно якості освіти та освітньої діяльності у НУВГП. URL: <http://ep3.nuwm.edu.ua/17224/> (дата звернення: 14.04.2022). **24.** Положення про Навчально-науковий центр незалежного оцінювання. URL: <http://ep3.nuwm.edu.ua/4184/> (дата звернення: 14.04.2022).

## REFERENCES:

1. Pro vyshchu osvitu : Zakon Ukrainy vid 01.07.2014 roku № 1556-VII. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1556-18#Text> (data zvernennia: 14.04.2022).
2. Lukianenko D. H., Stepanenko O. P. Digital university: proiekt rozbudovy tsyfrovoho universytetu v DVNZ «Kyivskiy natsionalnyi ekonomichnyi universytet imeni Vadyma Hetmana». Tsyfrova ekonomika : zb. materialiv Natsionalnoi naukovo-metodychnoi konferentsii, 4–5 zhovtnia 2018 r. S. 245–249. Kyiv: KNEU. URL: [https://ir.kneu.edu.ua/bitstream/handle/2010/25986/ZE\\_2018\\_71.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://ir.kneu.edu.ua/bitstream/handle/2010/25986/ZE_2018_71.pdf?sequence=1&isAllowed=y) (data zvernennia: 14.04.2022).
3. Yehorchenkova N. Yu., Teslia Yu. M., Khlevna Yu. L., Kychan O. M., Metodolohichni aspekty stvorennia tsyfrovoho universytetu. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnogo universytetu «Kharkivskiy politekhnichnyi instytut». Ser. Stratehichne upravlinnia, upravlinnia portfeliamy, prohramamy ta proektamy.* 2020. № 1. S. 31–36. URL: <https://doi.org/10.20998/2413-3000.2020.1.4> (data zvernennia: 14.04.2022).
4. Tsyfrova adzhenda Ukrainy – 2020. («Tsyfrovyi poriadok denniy»–2020). Kontseptualni zasady (versiia 1.0). Pershocherhovi sfery, initsiatyvy, proekty «tsyfrovizatsii» Ukrainy do 2020 roku (proekt). 2016. URL: <https://ucci.org.ua/uploads/files/58e78ee3c3922.pdf> (data zvernennia: 14.04.2022).
5. Misiia, viziia, tsinnosti ta stratehichni napriamy rozvytku Natsionalnoho universytetu vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannia na 2020–2025 rr. URL: <http://ep3.nuwm.edu.ua/16749/> (data zvernennia: 14.04.2022).
6. Rekomendatsii shchodo zastosuvannia kryteriiv otsiniuvannia yakosti osvitnoi prohramy / Zatverdzheno Natsionalnym ahentstvom iz zabezpechennia yakosti vyshchoi osvity 17 lystopada 2020 roku / TOV «Ukrainskyi osvitianskyi vydavnychiy tsentr «Orion»». K., 2020. 66 s.
7. Polozhennia pro orhanizatsiiu osvitnoho protsesu u NUVHP (nova redaktsiia). URL: <http://ep3.nuwm.edu.ua/4088/> (data zvernennia: 14.04.2022).
8. Polozhennia pro orhanizatsiiu ta korystuvannia korporatyvnoiu elektronnoiu poshtoiu NUVHP. URL: <http://ep3.nuwm.edu.ua/6139/> (data zvernennia: 14.04.2022).
9. Pro elektronni dokumenty ta elektronnyi dokumentoobih : Zakon Ukrainy vid 22.05.2003 № 851-IV. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/851-15#Text> (data zvernennia: 14.04.2022).
10. Deiaki pytannia dokumentuvannia upravlinskoï diialnosti : Postanova KМУ vid 17.01.2018 roku № 55. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/55-2018-%D0%BF#Text> (data zvernennia: 14.04.2022).
11. Polozhennia pro publichnu informatsiiu v NUVHP. URL: <http://ep3.nuwm.edu.ua/6139/> (data zvernennia: 14.04.2022).
12. Poriadok rozghliadu ta zatverdzhennia rozmishchennia sylabusiv i metodychnykh vkazivok cherez elektronnyi dokumentoobih iDoc (nova redaktsiia). URL: <http://ep3.nuwm.edu.ua/20183/> (data zvernennia: 14.04.2022).

14.04.2022). **13.** Polozhennia pro monitorynh, onovlennia, modernizatsiiu ta zakryttia osvitnikh prohram v NUVHP. URL: <http://ep3.nuwm.edu.ua/15915/> (data zvernennia: 14.04.2022). **14.** Rekomendatsii shchodo vprovadzhennia zmishanoho navchannia u zakladakh fakhovoi peredvyshchoi ta vyshchoi osvity. Metodychni rekomendatsii MON Ukrainy vid 24.06.2020 roku № 1\_9-344. URL: <http://eprints.mdpu.org.ua/id/eprint/11493/1/zmishanenavchannia-bookletspreads-2.pdf> (data zvernennia: 14.04.2022). **15.** Polozhennia pro navchalnyi plan osvitnoi prohramy v NUVHP. URL: <http://ep3.nuwm.edu.ua/20635/> (data zvernennia: 14.04.2022). **16.** Polozhennia pro formy navchannia, formy orhanizatsii osvitnoho protsesu ta vydy navchalnykh zaniat u NUVHP. URL: <http://ep3.nuwm.edu.ua/6366/> (data zvernennia: 14.04.2022). **17.** Polozhennia pro orhanizatsiiu vyboru osvitnikh komponentiv dlia zdobuvachiv pershoho ta druhoho rivniv vyshchoi osvity NUVHP. URL: <http://ep3.nuwm.edu.ua/20051/> (data zvernennia: 14.04.2022). **18.** Polozhennia pro zapobihannia plahiatu vypusknnykh kvalifikatsiinykh robit zdobuvachiv vyshchoi osvity. URL: <http://ep3.nuwm.edu.ua/6316/> (data zvernennia: 14.04.2022). **19.** Polozhennia pro sylabus (nova redaktsiia). URL: <http://ep3.nuwm.edu.ua/18509/> (data zvernennia: 14.04.2022). **20.** Polozhennia pro zapochatkuвання, rozroblennia ta zatverdzhennia osvitynykh prohram v NUVHP. URL: <http://ep3.nuwm.edu.ua/14287/> (data zvernennia: 14.04.2022). **21.** Metodychni rekomendatsii do stvorennia sylabusiv osvitnikh komponentiv v NUVHP. URL: <http://ep3.nuwm.edu.ua/20390/> (data zvernennia: 14.04.2022). **22.** Polozhennia pro semestrovyyi potochnyi ta pidsumkovyy kontrol navchalnykh dosiahnen zdobuvachiv vyshchoi osvity (nova redaktsiia). URL: <http://ep3.nuwm.edu.ua/15311/> (data zvernennia: 14.04.2022). **23.** Poriadok opytuvannia zdobuvachiv vyshchoi osvity ta vypusknnykh stosovno yakosti osvity ta osvitnoi diialnosti u NUVHP. URL: <http://ep3.nuwm.edu.ua/17224/> (data zvernennia: 14.04.2022). **24.** Polozhennia pro Navchalno-naukovyyi tsentr nezalezhnogo otsiniuvannia. URL: <http://ep3.nuwm.edu.ua/4184/> (data zvernennia: 14.04.2022).

---

**Soroka V. S., Candidate of Agricultural Sciences (Ph.D.), Associate Professor** (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne), **Lahodniuk O. A., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor** (Ukrainian Catholic University, Lviv), **Korbutiak V. I., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor,** **Klimova A. V., Ph.D., Rovenets T. O., Candidate of Economics (Ph.D.)** (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

## **ORGANIZATIONALLY-INFORMATIVE AND DOCUMENTARY ENSURING THE DIGITAL TRANSFORMATION OF THE EDUCATIONAL PROCESS IN NATIONAL UNIVERSITY OF WATER AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING**

**The article examines organizationally-informative and documentary ensuring the digital transformation of the educational process of NUWEE. Note the emphasis that Digital University is a vision and one of the strategic directions of development of NUWEE. The digital tools introduced at University are analyzed. The influence of each of them on the functioning of the internal system of quality assurance of education is revealed. The digitalization management of NUWEE and the digital tools that provide it are considered through management elements. In addition, digital tools for the transformation of planning and administration, open resources, assistance, monitoring, data security have been studied. The internal normative documents, regulating the organizationally informative support of the digital transformation of the educational process are systematized. The digital transformation of NUWEE quality system is described. Furthermore, the formation of an independent assessment system, quality system and the approach aims the students, is considered. Criteria for evaluating the quality of the educational program, provided through the implementation and application of each digital tool, are highlighted. These criteria are defined by the National Agency for Higher Education Quality Assurance, and their compliance contributes to the successful completion of the University's Accreditation of educational programs. It is emphasized that the experience of NUWEE regarding the implementation and use of certain digital tools in the organization of the educational process is**

**recognized by the Ministry of Education and Science of Ukraine. It is proved that the digital tools introduced today not only contribute to the formation of the image of NUWEE as a modern open digital university, but also directly improve the quality of education.**

***Keywords:* digitalization of education; digital tools; digital university; internal quality assurance system of education; the quality of the educational program.**



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

---



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

Стрілець О. Р., к.т.н., доцент, Сергійчук В. Ю., здобувач вищої освіти першого рівня, Щучик В. О., здобувач вищої освіти першого рівня (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)




### **БУДОВА, ПРИНЦИП РОБОТИ ТА РОЗРАХУНКИ МУФТИ РЕВЕРСИВНОЇ З W-ПОДІБНИМИ ПРУЖИНАМИ**

Розглянуто будову муфти пружної реверсивної, яка складається з двох півмуфт – зовнішньої і внутрішньої. Зовнішня півмуфта містить маточину, обойму з внутрішніми виступами. Внутрішню півмуфту виконано у вигляді маточини та зовнішніх виступів. Між внутрішніми виступами і зовнішніми виступами поставлені W-подібні пружини з центральною і зовнішніми ділянками. Описано технологію з'єднання валів і принцип роботи такої муфти. Розроблено методику розрахунку W-подібної пружини з центральною і зовнішніми ділянками, виходячи з деформації її ділянок при передаванні обертового моменту в прямому і зворотному напрямках. Розглянуто питання, яким чином розроблена реверсивна муфта з W-подібними пружинами впливає на динамічні властивості механізмів при навантаженні їх періодичним обертовим моментом.

**Ключові слова:** муфта; півмуфта; W-подібна пружина; центральна і зовнішня ділянки; обертовий момент; деформація; динаміка.

**Постановка проблеми.** Для з'єднання валів вантажопідйомних, транспортуючих, транспортних та інших машин і обладнання широко використовуються різноманітні муфти. Вони є достатньо відповідальними механічними пристроями, що часто визначають надійність і довговічність всієї машини. При передаванні руху та обертових моментів від одного вала до другого муфти, крім з'єднання валів, виконують ще багато відповідальних функцій, на деякі з них ми звертаємо увагу, а саме: компенсацію шкідливого впливу зміщення осей валів, що виникають унаслідок неточностей





виготовлення, монтажу та умов експлуатації; амортизацію вібрацій і динамічних навантажень та інші. Такі різноманітні вимоги сприяли появі великої кількості муфт у вітчизняному [1–3] і зарубіжному [4; 5] машинобудуванні. У даній статті ставиться проблема удосконалення некерованих муфт з метою виконання ними вказаних вище функцій, тобто компенсацію зміщення осей валів і амортизацію вібрацій і динамічних навантажень. Тому пропонується нова муфта пружна реверсивна, розроблена на рівні патенту України на корисну модель [6], яка поліпшує умови роботи подібних пружних муфт.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Муфтам механічних приводів машин і пристроїв, які згідно з ДСТУ 2278:1993 поділені на чотири класи, присвячена велика кількість робіт, з яких тут розглянуті [7–13].

В [7] описано будову та принцип передавання обертального моменту пружними муфтами з радіальними підковоподібними пружинами, досліджено їх напружений стан.

В [8] наведено нові способи передавання обертального моменту інерційними муфтами. Описано конструкції інерційних муфт для реалізації нових способів передавання обертального моменту.

В [9] наведено нові способи передавання обертального моменту інерційно-вакуумними муфтами за рахунок інертності мас їх елементів та з'єднання валів способом адгезії півмуфт. Описано конструкції таких муфт для реалізації цих способів та особливості динамічних характеристик в різних формах їх виконання.

В [10] приведено будову та принцип передавання обертального моменту пружними муфтами з підковоподібними пружинами з защемленими кінцями, розміщеними вздовж осі валів, та досліджено їх напружений стан.

В [11] описано конструкцію та принцип передавання обертального моменту інерційно-відцентровою пружною муфтою, визначено маси інертності її елементів для створення поперечних та поздовжніх сил на канати і моменту їх закручування.

В [12] розглянуто будову запобіжної пружної муфти, яка містить внутрішню і зовнішню півмуфти, з'єднані між собою зіркоподібною пружиною з виступами параболічної форми. Описано принцип її роботи, отримано аналітичні вирази, які дозволяють робити висновки про роботоздатність таких муфт.

В [13] описано конструкцію та принцип передавання обертального моменту реверсивною пружною муфтою, де пружина

виконана профільною, наприклад квадратною з підковоподібними вершинами, і з такими профільними ділянками виконані вали, що з'єднуються. Приведено аналітичні залежності її розмірів від обертового моменту, що передається.

Із аналізу останніх публікацій видно, що науковці, проєктувальники і конструктори продовжують шукати шляхи покращення конструкцій і принципу роботи муфт, але пружним реверсивним муфтам приділено мало уваги.

**Метою роботи** є опис будови, принципу роботи та розрахунків нових пружних реверсивних муфт та зробити висновки про можливість і доцільність застосування їх у вантажопідійомній, транспортуючій, транспортній та іншій техніці.

**Виклад основного матеріалу.** На рис. 1 показана муфта пружна реверсивна [6], яка складається з двох півмуфт зовнішньої 1 і внутрішньої 2. Зовнішня півмуфта 1 містить маточину 3, обойму 4 з внутрішніми виступами 5. Внутрішня півмуфта 2 виконана у вигляді маточини 6 та зовнішніх виступів 7. Між внутрішніми виступами 5 і зовнішніми виступами 7 поставлені W-подібні пружини 8 з центральною ділянкою 9 і зовнішніми ділянками 10.

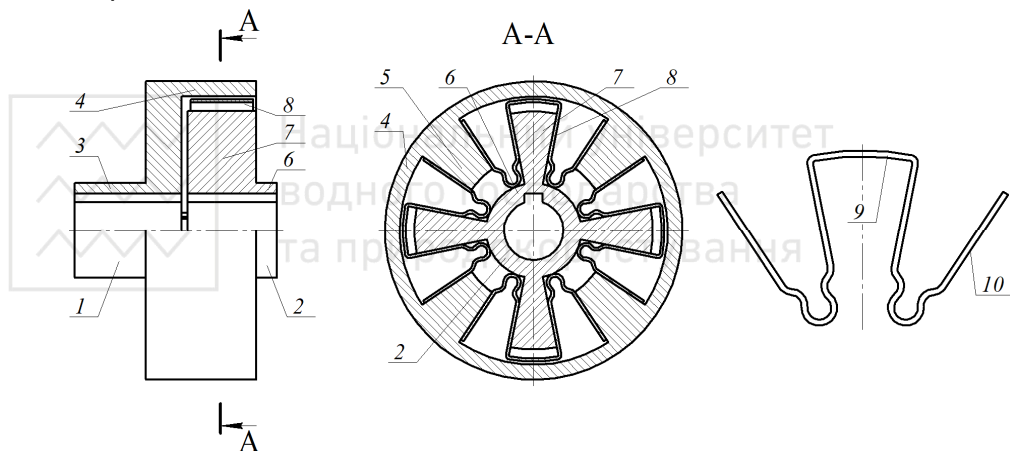


Рис. 1. Муфта пружна реверсивна

Муфту пружну реверсивну збирають у такій послідовності. Внутрішню півмуфту 2 вставляють у зовнішню півмуфту 1. Далі по чергово ставимо W-подібні пружини 8 центральною ділянкою 9 на зовнішні виступи 7 внутрішньої півмуфти 2, а зовнішні ділянки 10 опираються на внутрішні виступи 5 зовнішньої півмуфти 1. По закінченні установки W-подібних пружин 8 муфта готова до роботи.

Муфта пружна реверсивна працює так. Обертальний момент з півмуфти 1 передається через внутрішні виступи 5, *W*-подібні пружини 8 на зовнішні виступи 7 півмуфти 2. За рахунок пружних властивостей *W*-подібних пружин 8 компенсуються динамічні навантаження і осьові, радіальні та кутові неточності з'єднання валів, що показано на рис. 2.

Запропонована муфта пружна реверсивна має простішу конструкцію та є більш надійною при передаванні динамічних обертальних моментів. За рахунок деформації *W*-подібних пружин обертальний момент передається м'якше і гасяться радіальні коливання, які виникають через незначні неспівпадання збігання осей валів при їх з'єднанні.

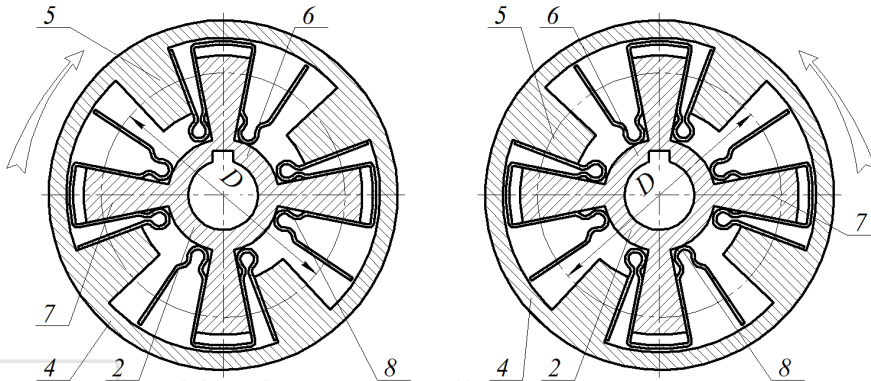


Рис. 2. Схеми деформації пружин при передачі обертального моменту в прямому і зворотному напрямках

Розглядається напружений стан деталей муфти, навантажувальну схему якої при передаванні обертального моменту показано на рис. 3. При вирішенні поставленої задачі прийняті наступні допущення: деформуються тільки *W*-подібні пружини, оскільки розміри їх поперечного перетину найменші; навантаження  $F$  рівномірно розподілене по поверхні контакту пружини з виступами і рівне по величині; навантаження на пружини розподіляється однаково.

$$F = \frac{2Tk_p}{zD}, \quad (1)$$

де  $T$  – обертальний момент, що передається муфтою;  $D$  – діаметр прикладання колової сили;  $z$  – число пружин;  $k_p$  – коефіцієнт режиму

роботи, залежить від приведеної в рух машини.

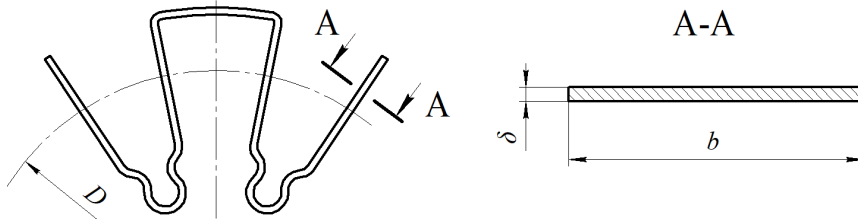


Рис. 3. Схема W-подібної пружини у ненавантаженому стані

Задача є статично визначеною. Умова міцності згинання балки має вигляд [14].

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W} \leq \sigma_{adm}, \quad (2)$$

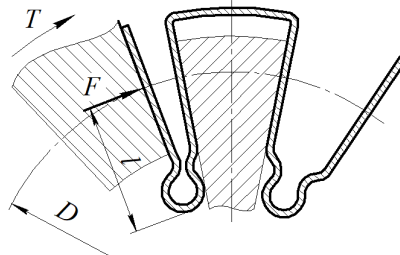


Рис. 4. Розрахункова схема W-подібної пружини

Умова міцності згинання балки

$$\sigma_{\max} = \frac{32Fl}{b\delta^2} \leq \sigma_{adm}, \quad (3)$$

З умови (4) можна визначити необхідну товщину стінки пружини

$$\delta \geq \sqrt{\frac{32Fl}{b\sigma_{adm}}}. \quad (4)$$

Якщо ж товщина стінки пружини задана, тоді із умови (4) можна визначити значення сили  $F$  або обертальний момент  $T$

$$F = \frac{b\delta^2\sigma_{adm}}{32l}. \quad (5)$$

$$T = \frac{FzD}{2}. \quad (6)$$

Вивчаються динамічні процеси пружного з'єднання валів, які зводяться до визначення основної характеристики – жорсткості муфти

$$C_{\varphi} = \frac{T}{\varphi_3}. \quad (7)$$

Розглянемо, яким чином запропонована муфта пружна впливає на динамічні властивості механізму на прикладі схеми поданий на рис. 5, де прийняті такі позначення:  $J_1$  – приведений до вала 1 динамічний момент інерції мас муфти;  $J_2$  – приведений до вала 2 динамічний момент інерції мас механізму;  $\omega_1$  і  $T_{\kappa 1}$  – кутова швидкість і обертальний момент на валу 1;  $\omega_2$  і  $T_{\kappa 2}$  – кутова швидкість і обертальний момент на валу 2;  $C_{\varphi}$  – жорсткість пружного з'єднання валів.

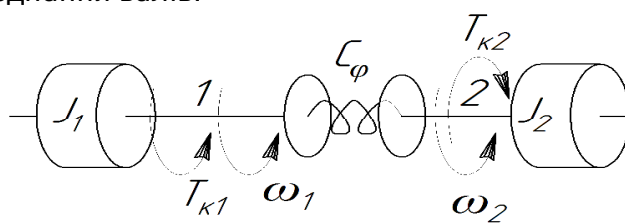


Рис. 5. Схема до вивчення динамічних процесів пружної муфти

Додаткові умови: муфта має постійну жорсткість ( $C_{\varphi} = const$ ), а жорсткість всіх інших деталей привода значно більша. Тому в розрахунках коливань враховується тільки  $C_{\varphi}$ ; муфта має малу демпфуючу здатність, що дозволяє не враховувати втрати при складанні рівнянь руху; муфта здатна сприймати обертальний момент  $T_{\kappa 1}$  у широких межах без зміни кутової швидкості  $\omega_1$ , тобто  $\omega_1 = const$ .

Перераховані умови дозволяють розглянути систему на рис. 5, як просту, з одним ступенем вільності [15]. Розмістимо центр полярних координат на осі вала та прийmemo, що ці осі координат обертаються з кутовою швидкістю  $\omega_0$  зможемо описати рух системи за допомогою однієї змінної. Такою змінною буде кут  $\varphi_M$  повороту

одного вала відносно другого в площині їх обертання, а рівняння руху маси  $J_M$  запишеться у вигляді

$$J_M \frac{d^2 \varphi_M}{dt^2} + C_\varphi \varphi_M = T_M. \quad (8)$$

Розглянемо рішення рівняння (8) для випадку, коли навантаження виконавчого механізму, змінюється періодично на протязі тривалого часу.

Періодична зміна навантаження є найбільш розповсюджена на практиці. Приймаємо, що з достатньою точністю це навантаження можна виразити за допомогою гармонічної функції у вигляді

$$T_M = T_0 + T_{am} \sin \omega t, \quad (9)$$

де  $T_0$  – постійна складова навантаження, номінальний обертальний момент, що передається. Графік такого навантаження показаний на рис. 6.

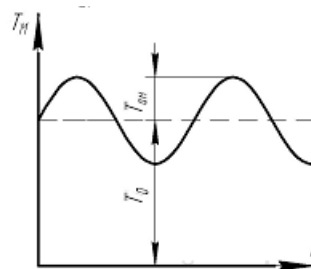


Рис. 6. Схема до вивчення динамічних процесів пружної муфти

Далі позначимо  $\varphi_M = \varphi_0 + \varphi$  і продиференціюємо двічі, маємо

$$\frac{d^2 \varphi_M}{dt^2} = \frac{d^2 \varphi_0}{dt^2}, \quad (10)$$

де  $\varphi_0$  – кут повороту одного вала відносно другого в площині їх обертання постійною складовою навантаження.

Враховуючи рівняння (11), після нескладних перетворень отримаємо:

$$J_M \cdot \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + C_\varphi \cdot \varphi = T_{am} \cdot \sin \omega t, \quad (11)$$

або

$$\frac{d^2 \varphi}{dt^2} + p^2 \cdot \varphi = q \cdot \sin \omega t, \quad (12)$$

де 
$$p = \sqrt{\frac{C_\varphi}{J_m}} \quad \text{і} \quad q = \frac{T_{ам}}{J_m} . \quad (13)$$

Рівняння (13) або (15) є рівнянням вимушених гармонічних коливань. Загальне рішення цього рівняння має вигляд:

$$\varphi_3 = A \sin pt + B \cos pt + \frac{q}{p^2 - \omega^2} \sin \omega t , \quad (14)$$

У рівнянні (14) перші два члени виражають вільні, а третій – вимушені коливання системи. Якщо не враховувати перші два члени рівняння (14), що часто виконується на практиці, будемо мати

$$\varphi = \frac{q}{p^2 - \omega^2} \cdot \sin \omega t . \quad (15)$$

Рішення рівняння (15) з урахуванням (13) перетворимо до виду

$$\varphi C_\varphi = \frac{T_{ам}}{1 - \left(\frac{\omega}{p}\right)^2} \cdot \sin \omega t . \quad (16)$$

У рівнянні (16)  $\varphi C_\varphi$  є динамічною складовою навантаження, яке виникає від зміни зовнішнього навантаження виконавчого механізму.

Позначимо амплітуду динамічного навантаження через  $T_{ав}$ , отримаємо

$$T_{ав} = \frac{T_{ам}}{1 - \left(\frac{\omega}{p}\right)^2} . \quad (17)$$

Залежність між  $T_{ав}$  і  $\frac{\omega}{p}$  виражається відомою резонансною кривою показаною на рис. 7.

На основі аналізу отриманої кривої можна зробити висновок, що при значеннях  $\frac{\omega}{p} > \sqrt{2}$  завжди значення  $T_{ав} < T_{ам}$ .

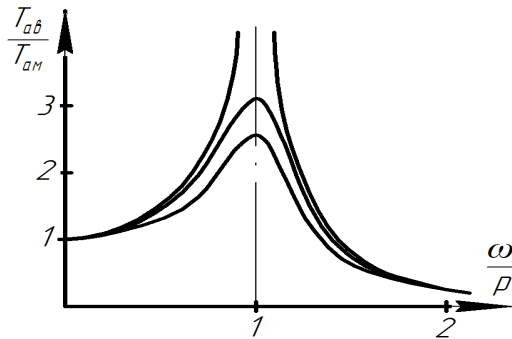


Рис. 7. Графіки резонансних кривих

Це означає, використовуючи формулу (15) і нерівність  $\frac{\omega}{p} > \sqrt{2}$ ,

що запропоноване з'єднання валів забезпечить плавну роботу при періодичному навантаженні, коли жорсткість муфти буде задовольняти умові (17).

#### Висновки:

1. Обґрунтована конструкція та принцип роботи нової муфти пружної реверсивної.

2. Запропоновані аналітичні вирази для статичних розрахунків W-подібної пружини нової муфти.

3. Проведеним аналізом динамічних властивостей передачі періодичного обертального моменту виявлено, що в такій муфті пом'якшується процес передачі обертального моменту і залежить від жорсткості пружної ділянки.

4. Розглянута нова муфта пружна реверсивна проста за конструкцією, компенсує шкідливий вплив зміщення осей валів, що виникають унаслідок неточностей виготовлення, монтажу та умов експлуатації, амортизує вібрації і динамічні навантаження, має простішу технологію з'єднання валів, тому рекомендується до використання у механічних приводах машин.

1. Малащенко В. О. Муфти приводів. Конструкції та приклади розрахунків : навч. посіб. Львів : НУ «Львівська політехніка», 2006. 196 с. 2. Малащенко В. О., Стрілець В. М., Стрілець О. Р., Федорук В. А. Нові муфти механічних приводів машин : монографія. Рівне : НУВГП, 2019. 198 с. 3. Проценко В. О., Малащенко В. О., Настасенко В. О., Бабій М. В. Муфти з канатними елементами торцевої установки : монографія. Херсон : ХДМА, 2021. 248 с. 4. Bhandary V. B. Design of Machine Elements. New Dheli : Tata McGrew-Hill Education Private Ltd., 2007. 934 p. 5. Miller S. Układy kinematyczne. 332



Podstawy Projektowania. WNT. Warszawa, 1988. 316 s. **6.** Муфта пружна двостороння: пат. 140641 Україна. МПК F16D 3/52. u № 2019 07749; заявл. 09.07.19; опубл. 10.03.20, Бюл. № 5. 3 с. **7.** Стрілець В. М., Федорук В. А., Стрілець О. Р., Герасимчук А. Л. Муфти з підковоподібними радіальними пружинами та їх розрахунки. *Вісник НУВГП. Сер. Технічні науки*. Рівне : НУВГП, 2011. Вип. 3 (55). С. 93–108. **8.** Малащенко В. О., Федорук В. А., Стрілець В. М. Новий напрямок в конструюванні муфт – інерційно-фрикційні муфти. *Вісник НУВГП. Сер. Технічні науки*. Рівне : НУВГП, 2011. Вип. 4(56). С. 106–118. **9.** Малащенко В. О., Федорук В. А., Стрілець В. М. Принцип передавання енергії двигунів інерційно-фрикційними муфтами та їх аналіз. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. Херсон : ХДМУ, 2012. № 2(7). С. 176–182. **10.** Малащенко В. О., Федорук В. А., Стрілець В. М. Інерційно-фрикційні муфти без веденої напівмуфти, їх принцип роботи та деякі динамічні характеристик. *Підйомно-транспортна техніка* : журнал. Одеса : ОНПУ, 2013. № 1. С. 76–85. **11.** Стрілець В. М., Федорук В. А., Стрілець О. Р., Ковальчук Р. В. Будова, принцип роботи та розрахунки інерційно-відцентрової пружної муфти. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки* : науковий журнал. Хмельницький : ХНУ, 2013. Вип. 6. С. 22–28. **12.** Стрілець В. М., Стрілець О. Р., Завальський В. В. Напружений стан підковоподібних пружин з защемленими кінцями у пружних муфтах. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки* : науковий журнал. Хмельницький : ХНУ, 2014. Вип. 6. С. 12–17. **13.** Стрілець В. М., Лисанець О. В., Стрілець О. Р. Обґрунтування кінематико-силових параметрів зіркоподібної пружини запобіжної пружної муфти. *Збірник наукових праць Полтавського національного технічного університету. Сер. Галузеве машинобудування, будівництво*. Полтава : ПНТУ, 2015. Вип. 3(45). С. 40–46. **14.** Писаренко Г. С., Квітка О. Л., Уманський Е. С. Опір матеріалів : підручник. К. : Вища шк., 2004. 655 с. **15.** Комаров М. С. Динамика механізмів и машин. М. : Машиностроение, 1969. 296 с. **16.** Сергійчук В. Ю., Щучик В. О. Конструкція і принцип роботи муфти пружної двохсторонньої. *Проблеми та перспективи сучасної науки* : тези Міжнародної науково-практичної конференції молодих науковців, аспірантів і здобувачів вищої освіти, 11–12 травня 2022 року. Рівне : НУВГП, 2022. С. 26–28. **17.** Иванов М. Н. Детали машин. М. : Высш. шк., 1964. 447 с.

## REFERENCES:

**1.** Malashchenko V. O. Mufty pryvodiv. Konstruktsii ta pryklady rozrakhunkiv : navch. posib. Lviv : NU «Lvivska politehnika», 2006. 196 s. **2.** Malashchenko V. O., Strilets V. M., Strilets O. R., Fedoruk V. A. Novi mufty mekhanichnykh pryvodiv mashyn : monohrafiia. Rivne : NUVHP, 2019. 198 s. **3.** Protsenko V. O.,

Malashchenko V. O., Nastasenko V. O., Babii M. V. Mufty z kanatnymi elementamy tortsevoi ustanovky : monohrafiia. Kherson : KhDMA, 2021. 248 s.

**4.** Bhandary V. B. Design of Machine Elements. New Dheli : Tata McGrew-Hill Education Private Ltd., 2007. 934 p.

**5.** Miller S. Uklady kinematyczne. Podstawy Projektowania. WNT. Warszawa, 1988. 316 s.

**6.** Mufta pruzhna dvostoronnia: pat. 140641 Ukraina. MPK F16D 3/52. u № 2019 07749; zaiavl. 09.07.19; opubl. 10.03.20, Biul. № 5. 3 s.

**7.** Strilets V. M., Fedoruk V. A., Strilets O. R., Herasymchuk A. L. Mufty z pidkovopodibnymy radialnymy pruzhynamy ta yikh rozrakhunky. *Visnyk NUVHP. Ser. Tekhnichni nauky*. Rivne : NUVHP, 2011. Vyp. 3 (55). S. 93–108.

**8.** Malashchenko V. O., Fedoruk V. A., Strilets V. M. Novyi napriamok v konstruiuvanni muft – inertiino-fryktsiini mufty. *Visnyk NUVHP. Ser. Tekhnichni nauky*. Rivne : NUVHP, 2011. Vyp. 4(56). S. 106–118.

**9.** Malashchenko V. O., Fedoruk V. A., Strilets V. M. Pryntsyp peredavannia enerhii dvyhuniv inertiino-fryktsiiny my muftamy ta yikh analiz. *Naukovyi visnyk Khersonskoi derzhavnoi morskoi akademii*. Kherson : KhDMU, 2012. № 2(7). S. 176–182.

**10.** Malashchenko V. O., Fedoruk V. A., Strilets V. M. Inertiino-fryktsiini mufty bez vedenoi napivmufty, yikh pryntsyp roboty ta deiaki dynamichni kharakterystyk. *Pidiomno-transportna tekhnika : zhurnal*. Odesa : ONPU, 2013. № 1. S. 76–85.

**11.** Strilets V. M., Fedoruk V. A., Strilets O. R., Kovalchuk R. V. Budova, pryntsyp roboty ta rozrakhunky inertiino-vidtsentrovoy pruzhnoy mufty. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky : naukovi zhurnal*. Khmelnytskyi : KhNU, 2013. Vyp. 6. S. 22–28.

**12.** Strilets V. M., Strilets O. R., Zaval'skyi V. V. Napruzhenyi stan pidkovopodibnykh pruzhyn z zashchemlenymy kintsiamy u pruzhnykh muftakh. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky : naukovi zhurnal*. Khmelnytskyi : KhNU, 2014. Vyp. 6. S. 12–17.

**13.** Strilets V. M., Lysanets O. V., Strilets O. R. Obgruntuvannia kinematyko-sylovykh parametriv zirkopodibnoy pruzhyny zapobizhnoy pruzhnoy mufty. *Zbirnyk naukovykh prats Poltavskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Ser. Haluzeve mashynobuduvannia, budivnytstvo*. Poltava : PNTU, 2015. Vyp. 3(45). S. 40–46.

**14.** Pysarenko H. S., Kvitka O. L., Umanskyi E. S. Opir materialiv : pidruchnyk. K. : Vyshcha shk., 2004. 655 s.

**15.** Komarov M. S. Dinamika mehanizmov i mashin. M. : Mashinostroenie, 1969. 296 s.

**16.** Serhiichuk V. Yu., Shchuchyk V. O. Konstruktsiia i pryntsyp roboty mufty pruzhnoy dvokhstoronnoi. Problemy ta perspektyvy suchasnoi nauky : tezy Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii molodykh naukovtsiv, aspirantiv i zdobuvachiv vyshchoi osvity, 11–12 travnia 2022 roku. Rivne : NUVHP, 2022. S. 26–28.

**17.** Ivanov M. N. Detali mashin. M. : Vyssh. shk., 1964. 447 s.

**Strilets O. R., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor,  
Serhiichuk V. Yu., Senior Student, Shchuchyk V. O., Senior Student**  
(National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

## **THE STRUCTURE, PRINCIPLE OF OPERATION AND CALCULATION OF THE REVERSIBLE COUPLING WITH W-SHAPE SPRINGS**



**The structure of the elastic reversible coupling, which consists of two outer and inner coupling halves have been considered. The outer coupling contains a hub and a clip with internal protrusions. The internal coupling is made in the form of a hub with external protrusions. Between the inner protrusions and the outer protrusions W-shaped springs with central and outer sections are placed. The shaft connection technology and the principle of operation of such a coupling have been described. A method for calculating a W-shape spring with a central and outer sections based on its deformation during torque transmission has been developed. The problem of how a reversible clutch with W-shape springs affects the dynamic properties of mechanisms when loading them with periodic torque has been considered. Using the method of materials resistance, analytical expressions have been obtained to estimate the stress state of W-shape springs. With the help of the analytical expressions obtained it is possible to determine the stress of W-shape springs and assess their strength and performance by methods known. Such couplings improve the performance of mechanical drives of machines – smoothly transmit dynamic torque, compensate for inconsistencies and improve the manufacturability of the shaft connection.**

***Keywords:* coupling; coupling half; W-shape spring; inner and outer protrusions; torque; deformation; dynamics.**

---

## ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ

УДК 661.525:614.833:614.841 <https://doi.org/10.31713/vt1202227>

**Кусковець С. Л., к.т.н., доцент, Филипчук В. Л., д.т.н., професор**  
(Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне), **Кусковець А. С.** (Рівненський науково-дослідний експертно-криміналістичний центр МВС України)



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

### ВИБУХОПОЖЕЖОНЕБЕЗПЕКА АМІАЧНОЇ СЕЛІТРИ В УМОВАХ ЇЇ ТРИВАЛОГО ЗБЕРІГАННЯ

Незважаючи на наявність ряду нормативних документів щодо тривалого зберігання аміачної селітри у великих об'ємах, на складах трапляються пожежі та вибухи, а це вимагає дотримання особливих вимог безпеки. Оскільки Україна є одним із лідерів виробництва аміачної селітри у світі, існує небезпека її зберігання. Проведено аналіз фізико-хімічних властивостей аміачної селітри, умов та наслідків її поводження за різних показників температур, сумісного зберігання з іншими речовинами та домішками. Показано, що дія підвищених температур, вологості, наявності сміття та різних домішок призводить до самозаймання аміачної селітри з наступним вибухом. З'ясовано, що при тривалому зберіганні у великій кількості селітра може стати небезпечною сама по собі, оскільки має тенденцію накопичувати у своїй товщі сторонні домішки із повітря приміщення. Встановлено, що у непоодиноких випадках гарантійний строк зберігання селітри шість місяців перевищується, що може призвести до небажаних наслідків. Розглянуто можливі варіанти утилізації аміачної селітри, термін зберігання якої вичерпано, хоча нормативними документами не передбачено чіткого визначення «утилізації» і вимог до неї. Запропоновано заходи щодо зниження вибухопожежної небезпеки селітри шляхом ведення ретельного контролю її фізико-хімічного стану (температура, наявність сторонніх домішок та продуктів розпаду у товщі матеріалу, стан упаковки). Розглянуто можливі шляхи утилізації селітри, у якої закінчився гарантійний термін зберігання.

**Ключові слова:** аміачна селітра; тривале зберігання; екзотермічні реакції; критичне самонагрівання;

## пожежовибухонебезпека; утилізація.

**Вступ.** У серпні 2020 року на території порту ліванської столиці Бейрута, де зберігалось понад 2,7 тисячі тонн аміачної селітри, стався її вибух. Потужна вибухова хвиля вщент зруйнувала сам порт, а також заподіяла значних руйнувань у центральній частині міста на відстані до 10 км. В результаті вибуху загинуло 157 осіб, ще майже 5000 людей дістали поранення [1].

Окрім цього, в історії зафіксовано непоодинокі випадки нищівної дії наслідків пожеж та потужних вибухів в місцях зберігання селітри.

Україна є одним із лідерів виробництва аміачної селітри у світі.

У зарубіжних країнах імпорту і обороту аміачної селітри, на відміну від нашої держави, обмежений і ретельно контролюється державою.

Зберігання аміачної селітри – процес, що вимагає суворої відповідності технологічним правилам та стандарту [2]. Найбільш небезпечним є не стільки процес виробництва, за яким ведеться суворий контроль, скільки тривале зберігання аміачної селітри.

**Існуючий стан.** Аміачна селітра ( $\text{NH}_4\text{NO}$ ) (азотнокислий амоній, нітрат амонію) – це кристалічна речовина білого або блідо-жовтого кольору, яка існує в декількох кристалічних формах, гігроскопічна. Вона добре розчиняється у воді, активно взаємодіє з оксидами металів, в результаті чого утворюється аміак і вода. Цей процес відбувається з поглинанням тепла. До і під час Другої світової війни селітру використовували для виготовлення вибухівки.

Селітра є сильним окисником, яка за ступенем дії на організм людини відноситься до помірно небезпечних речовин 3-го класу небезпечності за [3]. Класифікація згідно з [4] відносить цю речовину до окисників 3-ї категорії небезпеки (Ox. Sol. 3) H272. Вона може підсилювати горіння, викликати серйозне пошкодження очей відповідно до 2-ї категорії небезпеки (Eye irrit 2).

При горінні аміачна селітра плавиться і розкладається, а під дією детонаторів вибухає. При її нагріванні у замкнутому просторі, коли відсутня можливість вільного видалення продуктів термічного розкладання – аміачна селітра здатна вибухати. Аміачній селітрі притаманна здатність вибухати і за нижчих температур під впливом сильних ударів, у тому числі ударів вибухової хвилі, а також детонувати внаслідок впливу високої температури, наприклад в

умовах пожежі або під дією інших детонаторів [5]. Отже, селітра не може вибухнути без чинника зовнішньої дії.

Методи належного зберігання завжди відіграють важливу роль у забезпеченні безпеки. З метою збереження вихідних фізико-механічних властивостей аміачної селітри, її необхідно зберігати у спеціальних закритих сухих і чистих складах, які забезпечують захист від впливу погодних умов (сонячних променів, дощу і т.п.).

Спільне зберігання аміачної селітри і будь-яких інших хімічних продуктів і матеріалів в одному відсіку приміщення не допускається. Заборонено зберігання на складі аміачної селітри змащувальних і обтиральних матеріалів.

Аміачна селітра насипом зберігається у буртах, а устаткування складів має забезпечувати можливість її механічного перемішування. Максимальна висота складування селітри не повинна перевищувати 6 метрів.

Температура повітря у складі не повинна перевищувати 30° С, а відносна вологість повітря – 50%. Не допускається підвищення температури всередині бурту, внаслідок самонагрівання, більше ніж до 50° С.

Не дозволяється, у разі злежування аміачної селітри, її рихлення інструментом, який може давати іскри під час ударів, або шляхом підриву навіть незначною кількістю вибухової речовини [6].

На аміачні селітри, що використовуються для виготовлення вибухових речовин (ВР) і зберігаються на складах вибухових матеріалів ВМ разом з ВР, поширюються вимоги до зберігання та обліку як до ВР групи D (виріб, що містить первинну ВР) [7].


Саме під час зберігання аміачної селітри відбувається її накопичення на складах у великих об'ємах, а це вимагає дотримання особливих вимог її безпеки.

Однак, незважаючи на наявність широкого спектру нормативних документів щодо зберігання та використання аміачної селітри під час її тривалого накопичення на складах, відбуваються пожежі та вибухи, що потребує подальшого аналізу і оцінки факторів, які негативно впливають на вибухопожежонебезпеку цієї речовини.

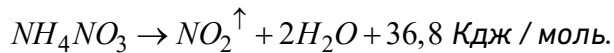
В національному нормативному документі [6] встановлена гарантійна тривалість зберігання селітри не більше шести місяців. Якщо ж термін збільшується, то необхідно проводити утилізацію селітри.

**Метою** даної роботи є аналіз вибухопожежонебезпеки аміачної селітри в умовах її тривалого зберігання.

### **Результати аналізу та досліджень**



Речовина залишається стійкою (незмінна кристалічна форма) лише в температурних межах від  $-16^{\circ}\text{C}$  до  $+32^{\circ}\text{C}$ . Аміачна селітра та її суміші схильні до термічного розкладання. При зміні температури – змінюється кристалічна структура аміачної селітри, в результаті чого відбувається зв'язування її маси в суцільний моноліт. При температурі  $165^{\circ}\text{C}$  нітрат амонію плавиться, а при  $200^{\circ}\text{C}$  – розкладається на оксид азоту ( $\text{N}_2\text{O}$ ) і воду. Під час зберігання аміачної селітри повільно протікає процес розкладу селітри з виділенням тепла згідно екзотермічної реакції, в результаті чого утворюються двоокис азоту та водяна пара [5]



Поступово, після закінчення початкового індукційного періоду, внаслідок виділення тепла та відповідного підвищення температури, починається реакція автокаталізу, яка викликана головним чином двоокисом азоту й меншою мірою водяною парою. При температурі близько  $100^{\circ}\text{C}$  починається автокаталітичне розкладання аміачної селітри, в результаті якого органічні продукти розігріваються до температури їх самозаймання. Процес розкладання селітри значно пришвидшується, оскільки реакція автокаталізу протікає з прогресивно збільшуваною швидкістю.

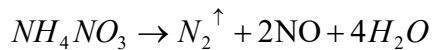
Одночасно під час тривалого зберігання селітри протікає процес перекристалізації нітрату амонію і руйнування гранул продукту [5]. Вже при температурі  $32,3^{\circ}\text{C}$  починається фазовий перехід кристалів від IV системи зі стану  $\beta$ -ромбічного (біпірамідального) до кристалів III системи зі станом  $\alpha$ -ромбічним (моноклінним), внаслідок чого об'єм нітрату амонію збільшується на 0,8%. Поступово щільність аміачної селітри змінюється, зменшуються розміри кристалів, чутливість аміачної селітри до вибуху підвищується. Крім того, вона здатна злежуватись та ущільнюватись також під тиском шарів мішків чи шарів насипів, перетворюючись у моноліт.

Це особливо небезпечно в умовах зберігання селітри у великих кількостях при підвищених температурах навколишнього середовища, коли на нітрат амонію діють циклічні зміни, що

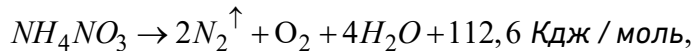
призводять до інтенсифікації руйнування гранул, злежування, підвищеного пилення і ризику виникнення вибуху.

В результаті ці процеси можуть призвести до значного накопичення продуктів розкладання, критичного самонагрівання і, в кінцевому підсумку, до раптової детонації при досягненні критичної температури саморозпаду [5].

У разі її нагрівання до температури 210° С перебігають окисно-відновні реакції з сіркою, сірчанам колчеданом, кислотами, суперфосфатом, хлорним вапном, порошкоподібними металами з утворенням оксиду азоту (I) та кисню, що обумовлює загоряння горючих матеріалів і в кінцевому наслідку – виникнення пожежі. При температурі 250–300° С починається бурхливий розпад аміачної селітри згідно реакції



з виділенням азоту та оксиду азоту, а при температурі більше 300° С з виділенням кисню і тепла



які є каталізаторами подальшого її розкладання та детонації.

У цих двох процесах виділяється не тільки велика кількість тепла, але й окисник, який сприяє вибуху селітри. Тому наявність замкненого простору і відсутність вільного виходу для газоподібних продуктів розкладання у складському приміщенні, де зберігається селітра, сприяє їх накопиченню в об'ємі речовини і підвищує ризик виникнення пожежі та вибуху.

Суміші аміачної селітри з горючими матеріалами (дерево, солома, торф, льон, мішкотара і ін.) схильні до теплового самозаймання. Особливо підвищують пожежо- і вибухонебезпечність аміачної селітри накопичення у товщі селітри сторонніх домішок, схильних до екзотермічних фізико-хімічних перетворень, що самоприскорюються. Такими речовинами можуть бути сировина, сторонні або побічні продукти в газовій, рідкій або твердій фазі.

При накопиченні сторонні домішки можуть давати значну кількість тепла, збільшуючи ймовірність вибуху. Так, у присутності пилу деяких речовин органічного походження (торф, солома, тирса та ін.), сірки, порошоків та оксидів деяких металів (алюмінію, міді, цинку, заліза та ін.) селітра стає особливо вибухонебезпечною.



Попадання різних масел, парафінів і мазутів призводить до утворення нітросполук, дуже чутливих до підвищених температур і ударів. Тканини і папір, просочені розчином аміачної селітри, самозаймаються, оскільки з цими матеріалами селітра утворює нітроклітковини, здатні займатися навіть при температурі навколишнього середовища і горіти з великою швидкістю [5].

Тому при тривалому зберіганні у великій кількості селітра може стати небезпечною сама по собі, оскільки має тенденцію накопичувати у своїй товщі сторонні домішки із повітря приміщення. Пошкоджена упаковка значно підвищує ймовірність появи забруднюючих речовин. В середині великого насипу може початися самонагрівання, спочатку повільно, а потім швидко.

У місцях, де обслуговуючий персонал перебуває рідко, спекотна погода може стати причиною підвищення температури та зменшення вологості селітри всередині складу до екстремальних відміток, що сприяє підвищенню вибухопожежонебезпеки селітри. І навпаки там, де працівники бувають часто, тривале зберігання може притупити їх почуття небезпеки, підвищивши вірогідність зовнішнього впливу, появі джерел загоряння і особливо можливості накопичення сторонніх домішок. Тому для запобігання можливості самозаймання і вибуху аміачної селітри під час тривалого зберігання необхідно вести ретельний контроль за її фізико-хімічним станом (температурою, наявністю сторонніх домішок та продуктів розпаду у товщі матеріалу, станом упаковки тощо).

Для запобігання самовільного розкладання до селітри додають стабілізатори – речовини, що зв'язують утворені при її розкладанні азотну кислоту і  $\text{NO}_2$  або виділяють при взаємодії з  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  аміак, який нейтралізує азотну кислоту і відновлює оксиди азоту до елементарного азоту. Стабілізаторами можуть бути карбамід (0,05–0,1% від маси селітри), карбонати кальцію і магнію тощо [5].

Однак додавання стабілізаторів не вирішує проблему тривалого зберігання. Тому тривалість зберігання селітри обмежується терміном 6 місяців [6]. Після встановленого терміну селітру необхідно утилізувати, однак нормативним документом [6] не оговорено, яким чином проводити цю операцію. Тому у непоодиноких випадках строк зберігання селітри перевищується, що може призвести до небажаних наслідків.

Найбільш радикальними методами утилізації можна вважати хімічні, коли після додавання різних реагентів утворюються більш

безпечні неактивні речовини, які можна використовувати у промисловості [8]. Зокрема, пропонується змішувати аміачну селітру з кубовим залишком перегонки стиrolу, в результаті чого утворюється вибухова речовина ігданіт з температурою вибуху  $2400^{\circ}\text{C}$ , яка швидко згорає без детонації [9].

Вибухонебезпечність  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  зменшується при збільшенні вологості солі. При вмісті більше 3% води аміачна селітра не вибухає навіть при вибуху детонатора [5]. Тому найбільш прийнятним варіантом утилізації може бути тривале зберігання селітри у рідкому стані з подальшим використанням, за необхідністю, у якості рідкого добрива для поливу зелених насаджень, а також використання в якості живильного середовища для мікроорганізмів при біологічних методах очищення, зокрема від нафтових забруднень [10].

Однак, як показує досвід, саме універсальність такого добрива і не надто висока ціна сприяють його широкому і часто неекономному застосуванню. Це призводить до перенасичення речовиною окремих земельних ділянок і потрапляння у поверхневі та ґрунтові води. Вода у криницях на значній території України забруднена саме через перенасичення нітрату амонію у сільському господарстві. Зокрема, з одного гектара зрошуваних земель виноситься у водні системи 8–10 кілограмів азоту, який у подальшому активізує розвиток процесів евтрофікації водойм [10].

Трапляються випадки, коли ці добрива просто викидають у недозволені місця. Так, десятки тонн селітри та карбаміду вивозяться з полів в інші неконтрольовані місця і можуть лежати там тривалий строк. Як зазначають природоохоронні інспектори, аміачна селітра просто спалює ґрунт і тепер тут багато років нічого не зростатиме. Тобто питання тривалого зберігання та утилізації аміачної селітри залишається відкритим і потребує подальшого більш глибокого вивчення. Для цього потрібні кошти, спеціальна промислова база і матеріальна зацікавленість бізнесменів.

**Таким чином,** за потреби тривалого зберігання аміачної селітри, необхідно враховувати можливість її поступового розкладання з виділенням тепла, підвищенням температури, накопиченням автокаталітичних продуктів розкладання, критичного самонагрівання, що підвищує вірогідність самозаймання і вибуху матеріалу. Для зниження вибухопожежної небезпеки селітри необхідно вести ретельний контроль за її фізико-хімічним станом (температурою, наявністю сторонніх домішок та продуктів розпаду у

товщі матеріалу, станом упаковки тощо). Необхідно у нормативному документі чіткіше визначити поняття «утилізація аміачної селітри» з описом її технології, умов, параметрів, а також юридичної особи (власник або стороння організація, вимоги до нього), яка проводить цю операцію і забезпечує безпечні умови процесу утилізації.

- 1.** Вибухонебезпечна селітра: де і скільки її зберігають в Україні. URL: <https://cutt.ly/ShpdppW> (дата звернення: 10.10.2021).
- 2.** ДСТУ 7370:2013. Нітрат амонію (Селітра аміачна) Технічні умови. URL: <https://cutt.ly/phpdmtV> (дата звернення: 10.10.2021).
- 3.** ГОСТ 12.1.007-76. Система стандартів безпеки праці. Шкідливі речовини. Класифікація і загальні вимоги безпеки. URL: <https://docs.cntd.ru/document/5200233> (дата звернення: 10.10.2021).
- 4.** Регламент Європейського парламенту і Ради (ЄС) № 1272/2008. Про класифікацію, маркування і пакування речовин і сумішей. URL: <https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/55-GOEEI/es-12722008.pdf> (дата звернення: 17.11.2021).
- 5.** Справочник химика 21. URL: <https://chem21.info/info/109870/> (дата звернення: 12.10.2021).
- 6.** НПАОП 0.00-7.19-21. Мінімальні вимоги щодо безпеки та здоров'я працівників на роботі під час зберігання, пакування нітрату амонію та використання його для виготовлення комплексних і рідких мінеральних добрив. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0603-21#Text> (дата звернення: 10.10.2021).
- 7.** НПАОП 0.00-1.66-13. Правила безпеки під час поводження з вибуховими матеріалами промислового призначення. URL: <https://cutt.ly/1hpd6gf> (дата звернення: 12.10.2021).
- 8.** Джаваїд А., Левченко Д. О., Артюхов А. Є. Методи утилізації відходів виробництва аміачної селітри. *Сучасні технології у промисловому виробництві* : матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студ. фак-ту технічних систем та енергоефективних технологій (м. Суми, 14–17 квітня 2015 р. СумДУ, 2015. Ч. 2. С. 122.
- 9.** Способ утилизации твердых токсичных промышленных отходов. URL: <https://www.ecowaste.su/news/2010-10-21-17-43-15> (дата звернення: 03.11.2021).
- 10.** Советую обратиться к местным ученым-химикам. URL: <http://www.solidwaste.ru/publ/view/468.html> (дата звернення: 03.11.2021).
- 11.** Про ліцензування видів господарської діяльності : Закон України. URL: <https://cutt.ly/ehpfr42> (дата звернення: 10.11.2021).

## REFERENCES:

- 1.** Vybukhonebezpechna selitra: de i skilky yii zberihaiut v Ukraini. URL: <https://cutt.ly/ShpdppW> (data zvernennia: 10.10.2021).
- 2.** DSTU 7370:2013. Nitrat amoniiu (Selitra amiachna) Tekhnichni umovy. URL: <https://cutt.ly/phpdmtV> (data zvernennia: 10.10.2021).
- 3.** HOST 12.1.007-76.


Systema standartiv bezpeky pratsi. Shkidlyvi rehovyny. Klasyfikatsiia i zahalni vymohy bezpeky. URL: <https://docs.cntd.ru/document/5200233> (data zvernennia: 10.10.2021). **4.** Rehlament Yevropeiskoho parlamentu i Rady (IeS) № 1272/2008. Pro klasyfikatsiiu, markuvannia i pakuvannia rehovyn i sumishei. URL: <https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/55-GOEEI/es-12722008.pdf> (data zvernennia: 17.11.2021). **5.** Spravochnik himika 21. URL: <https://chem21.info/info/109870/> (data zvernennia: 17.11.2021). **6.** NPAOP 0.00-7.19-21. Minimalni vymohy shchodo bezpeky ta zdorovia pratsivnykiv na roboti pid chas zberihannia, pakuvannia nitratu amoniiu ta vykorystannia yoho dlia vyhotovlennia kompleksnykh i ridkykh mineralnykh dobryv. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0603-21#Text> (data zvernennia: 10.10.2021). **7.** NPAOP 0.00-1.66-13. Pravyla bezpeky pid chas povodzhennia z vybukhovymy materialamy promyslovoho pryznachennia. URL: <https://cutt.ly/1hpd6gf> (data zvernennia: 12.10.2021). **8.** Dzhavaid A., Levchenko D. O., Artiukhov A. Ye. Metody utylizatsii vidkhodiv vyrobnytstva amiachnoi selitry. *Suchasni tekhnolohii u promyslovomu vyrobnytstvi* : materialy naukovo-tekhnichnoi konferentsii vykladachiv, spivrobitnykiv, aspirantiv i stud. fak-tu tekhnichnykh system ta enerhoefektyvnykh tekhnolohii (m. Sumy, 14–17 kvitnia 2015 r. SumDU, 2015. Ch. 2. S. 122). **9.** Sposob utylizatsii tverdyih toksichnyih promyishlennyih othodov. URL: <https://www.ecowaste.eu/news/2010-10-21-17-43-15> (data zvernennia: 17.11.2021). **10.** Sovetuyu obratitsya k mestnym uchenym–himikam. URL: <http://www.solidwaste.ru/publ/view/468.html> (data zvernennia: 17.11.2021). **11.** Pro litsenzuvannia vydiv hospodarskoi diialnosti : Zakon Ukrainy. URL: <https://cutt.ly/ehpfr42> (data zvernennia: 10.11.2021).

---

**Kuskovets S. L., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor, Fylypchuk V. L., Doctor of Engineering, Professor** (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne),  
**Kuskovets A. S.** (Rivne Scientific Research Forensic Center Ministry of Interior of Ukraine)

## **EXPLOSION AND FIRE SAFETY OF AMMONIA NITRATE IN THE CONDITIONS OF ITS LONG-TERM STORAGE**

**The article describes the danger of explosions of ammonium nitrate and their consequences based on examples of emergencies in the world. As Ukraine is one of the leaders in the production of ammonium nitrate in the world, there is a danger of its storage when used in various sectors of the economy. In our country, ammonium**



nitrate is mainly used as a mineral fertilizer, although it was originally intended for the manufacture of explosives. The article analyzes the physicochemical properties of ammonium nitrate, conditions and consequences of its behavior at different temperatures, joint storage with other substances and impurities. It is shown that the action of elevated temperatures, humidity, the presence of debris and various impurities leads to spontaneous combustion of ammonium nitrate, followed by an explosion. Conditions and methods of proper storage of nitrate in accordance with current regulations and documents are assessed. Despite the presence of a wide range of regulations, it is during long-term storage of ammonium nitrate in large volumes in warehouses the fires and explosions can happen, and this requires special safety requirements. During storage of ammonium nitrate, the process of its decomposition with the accumulation of heat and oxidant is slow, which can contribute to the explosion of nitrate, even with a slight increase in ambient temperature. With increasing temperature the sensitivity of ammonium nitrate to explosion increases, and the accumulated impurities can add a significant amount of heat, increasing the likelihood of an explosion. With long-term storage in large quantities, nitrate can become dangerous in itself, as it tends to accumulate in its thickness of impurities from the room air. It is established that in many cases the warranty period of storage of nitrate for six months is exceeded, which can lead to undesirable consequences. Possible variants of utilization of ammonium nitrate the shelf life of which has expired are considered although regulations do not provide a clear definition of "disposal" and requirements for it. Measures to reduce the explosive hazard of nitrate by carefully monitoring its physical and chemical condition (temperature, the presence of impurities and decomposition products in the thickness of the material, the state of packaging. Possible ways of utilization of nitrate in which the warranty period of storage has expired are considered.

**Keywords:** ammonium nitrate; long-term storage; exothermic reactions; critical self-heating; fire and explosion hazard; disposal.

---

**Довбенко Т. О., к. т. н., доцент** (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

## МІЖНАРОДНІ ІМПЕРАТИВИ СИСТЕМИ МЕНЕДЖМЕНТУ ГІГІЄНОЮ ТА БЕЗПЕКОЮ ПРАЦІ



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

**В статті проведено аналіз комплексу міжнародних стандартів ISO, OHSAS, BS IIP у сфері системи менеджменту безпекою праці. Встановлено основні вимоги та принципи міжнародного законодавства щодо умов праці, ризиків, управління, соціальної відповідальності та керування інформаційною безпекою. Визначено призначення та переваги міжнародних стандартів серії ISO, OHSAS, BS IIP щодо якісної побудови та управління інтегрованими системами менеджменту охороною праці. Проаналізовано недоліки стандартів OHSAS 18001 та ISO SR 26000. Виявлено основні принципи Євросоюзу з питань гігієни та безпеки праці, шляхом реалізації Директиви 89/391/ЄЕС, а також адаптацію міжнародних документів до національної політики з охорони та безпеки праці.**

**Ключові слова:** міжнародний стандарт; система менеджменту; безпека; праця; здоров'я; управління; соціальний; економічний; науковий.

Провідні міжнародні організації у сфері охорони праці закликають ділові кола до гуманного ведення бізнес-операцій, дотримання корпоративної етики та культури безпеки шляхом свідомого додержання визначальних аспектів концепції соціального діалогу. Відповідно до міжнародного стандарту ISO 26000 [1], провідною ідеологією соціального діалогу є система пошуку компаніями взаємоприйнятних напрямів вирішення загальних проблем безпеки та гігієни праці та система взаємних домовленостей між всіма суб'єктами охорони праці.

Сучасний підхід в системі менеджменту гігієною праці передбачає безпечне ведення діяльності діловими колами шляхом дотримання основних вимог міжнародних стандартів, а також конвенцій та рекомендацій Міжнародної організації праці. Порядок локального формування умов праці визначається в результаті

досконалої роботи систем управління якістю або гігієною та безпекою праці ISO 9001[2], BS OHSAS18001 [3], ризик-менеджменту ISO 31000 [4], енергетичного менеджменту ISO 50001 [5], охорони здоров'я та безпеки праці ISO 45001 [6] тощо.

Організаційно-методичною основою для створення інтегрованих систем управління якістю є стандарти ISO 9001 Система Менеджменту Якості (ДСТУ ISO 9001), оскільки основні поняття і принципи, які сформульовані у них, найбільше відповідають поняттям і принципам загального менеджменту. Вони призначені для сертифікації систем менеджменту якості, визначають їх головні принципи, надають рекомендації щодо впровадження систем управління якістю, передбачають мотивацію вищого керівництва тощо.

Мета роботи полягає в об'єктивному аналізі номену міжнародних нормативних документів в системі безпеки праці за допомогою методу індукції. Об'єктом досліджень є міжнародні імперативи системи менеджменту гігієною та безпекою праці. Предмет досліджень – підходи, процеси, принципи, переваги системи управління охороною праці.

Міжнародні стандарти серії ISO 9000 – це вимоги до організації робіт із забезпечення гарантії якості продукції і сьогодні система управління якістю ISO 9001 є найавторитетнішою у світі. Сертифікат на відповідність стандартам ISO 9001 дає переваги при участі в тендерах і необхідний для роботи на міжнародному ринку. Сьогодні одержати сертифікат на відповідність вимогам ДСТУ ISO 9001 може будь-яке зацікавлене підприємство.

Увагу до загальнолюдських цінностей відображає стандарт – ISO 14001:2015 «Системи менеджменту навколишнього середовища – вимоги і керівництво щодо використання» [7]. Міжнародний стандарт – ISO SR 26000:2011 «Соціальна відповідальність організацій. Вимоги» має комплексний характер і враховує інтереси більшості груп зацікавлених осіб (персоналу, споживачів, місцевої громади), спрямований на охорону навколишнього середовища, економне витрачання ресурсів.

Окремим аспектам трудових взаємовідносин присвячено два міжнародних стандарти – OHSAS 18001 та SA 8000 Social Accountability [8]. Вони не збігаються за призначенням і містять вимоги щодо усунення дискримінації та забезпечення належних умов праці.

Впровадження міжнародного стандарту BS IIP (British standards Investors in people) надає такі конкурентні переваги, як підвищення продуктивності і конкурентоспроможності, збільшення фінансових показників, забезпечення зростання якості продукції та послуг, поліпшення командної взаємодії, підвищення корпоративного іміджу організації, інвестиційної привабливості.

Перелічені стандарти мають багато спільного і цей список не є повним. Перелік стандартів, що входять до складу інтегрованої системи управління, розробляється з урахуванням потреб і специфіки діяльності підприємства. Названі міжнародні стандарти сприяли поширенню принципів соціальної відповідальності бізнесу в усьому світі.

Окремі з названих міжнародних стандартів мають відповідні національні (українські) версії, зокрема у сфері управління якістю, усунення небезпек у харчових продуктах, охорони навколишнього середовища, умов праці тощо. Саме ці стандарти є основою для проведення сертифікації систем управління на вітчизняних підприємствах.

В таблиці представлено основні міжнародні стандарти, які застосовуються при розбудові інтегрованої системи управління якістю. До основних переваг від впровадження інтегрованої системи управління якістю належать: розробка єдиної гармонізованої структури менеджменту, можливість суміщення ряду процесів (планування, навчання, внутрішнього аудиту тощо), постійне покращення результативності діяльності підприємства щодо досягнення поставлених цілей, зниження витрат на розробку та сертифікацію, підвищення мобільності та можливостей адаптації до умов, що змінюються, велика привабливість для зацікавлених сторін, інвесторів.


При цьому варто відмітити деякі тенденції і суперечності при впровадженні інтегрованих систем управління якістю. Так, разом з наведеними перевагами, недоліком стандарту OHSAS 18001 є відсутність специфічних критеріїв оцінки ефективності гігієни і безпеки праці, а також рекомендацій щодо розробки системи управління. Що стосується стандарту ISO SR 26000, то він не може використовуватися для сертифікації системи управління. Переважна більшість підприємств орієнтується не на весь спектр




Призначення міжнародних стандартів для розбудови інтегрованої системи менеджменту

Стандарт	Призначення стандарту	Переваги від впровадження
ISO 9001 Система Менеджменту Якості	Вимоги до системи організації управління виробництвом (якість продукції і послуг). Сертифікація систем менеджменту якості, визначає головні принципи, надає рекомендації щодо впровадження систем управління якістю, передбачає мотивацію вищого керівництва	Підтвердження професійної компетентності, підвищення престижу і авторитету, переваги при участі в тендерах, необхідний для роботи на міжнародному ринку
ISO 14001 Система Екологічного Менеджменту	Забезпечення ефективної системи управління навколишнім середовищем, досягнення екологічної та економічної ефективності заходів. Цілісність та публічність екологічної політики.	Поліпшення екологічної обстановки, економічних показників, дозволяє оптимізувати систему управління, підвищити довіру до підприємства
OHSAS 18001 Система Управління Гігієною та Безпекою Праці	Встановлює вимоги до системи управління гігієною та безпекою праці (ГіБП). Вимоги щодо усунення дискримінації та забезпечення належних умов праці	Встановлює вимоги до (ГіБП). Вимоги щодо усунення дискримінації та забезпечення належних умов праці
SA 8000 Система Менеджменту соціальної відповідальності	Визначає норми щодо соціального захисту. Дотримання бізнесом вимог щодо прав працівників на працю, в тому числі на охорону праці, і призначений для сертифікації та звітування. Засіб для практичної реалізації моральних і етичних норм в діяльності адміністрації підприємства	Підтверджує зобов'язання з соціальної відповідальності, етичного відношення до персоналу і відповідності міжнародним стандартам, покращує менеджмент і підвищує ефективність ланцюга постачань, підтримує

продовження таблиці

 <p>Національний університет водного господарства та природокористування</p>		<p>корпоративну ідеологію, демонструє високий рівень соціальної відповідальності при укладанні міжнародних договорів і розширення бізнесу всередині країни</p>
<p>ISO SR 26000 Соціальна відповідальність організацій</p>	<p>Враховує інтереси більшості груп зацікавлених осіб (персоналу, споживачів, місцевої громади), спрямований на охорону навколишнього середовища, економне витрачання ресурсів, встановлює вимоги до діяльності бізнес-організацій</p>	<p>Може використовуватися бізнесом, законодавчими органами влади, громадськими організаціями та іншими зацікавленими особами незалежно від їх виду діяльності, розміру або місцезнаходження</p>
<p>ISO/IEC 27001 Система Управління Інформаційною Безпекою</p>	<p>Призначена для розробки, впровадження, функціонування, моніторингу, перегляду, підтримування, вдосконалення інформаційної безпеки Вимоги з управління інформаційною безпекою</p>	<p>Управління ризиками дозволяє визначити, на який напрям інформаційної безпеки необхідно звернути увагу в першу чергу, дозволяє спрогнозувати матеріальні витрати</p>
<p>BS IIP Інвестори в людей</p>	<p>Підвищення якості управління організаційною структурою шляхом використання людського потенціалу для поліпшення фінансових показників і ефективного розвитку організацій</p>	<p>Покращення якості управління шляхом використання людського потенціалу та підвищення економічних показників</p>

соціально-економічних проблем, а обирає для себе окремі напрями і керується відповідним стандартом. При розбудові інтегрованої системи управління якістю слід враховувати важливість і необхідність застосування процесного і системного підходів до управління підприємством, що дозволяє пов'язати в єдине ціле різні процеси і види діяльності.



Політика Європейського Союзу з питань гігієни та безпеки праці спрямована на підвищення рівня умов праці та зниження показників виробничого травматизму. Поставлені цілі досягаються в процесі ведення соціального діалогу та дотримання соціальної відповідальності. Визначальним нормативним документом Євросоюзу є Директива 89/391/ЄЕС, що передбачає запровадження відповідних заходів на виробництві з метою захисту працівників та попередження ризиків. Ключовим принципом директиви є заохочення працівників до підвищення рівня охорони та безпеки праці.

Тенденції ж вітчизняних підприємств, організацій установ прослідковуються у провадженні працезахоронної політики на підставі національних та міжнародних стандартів, а також нормативно-правових актів Європейського Союзу в рамках угоди про асоціацію. Українським законодавством імплементовано ряд директив Євросоюзу, що визначають вимоги до питань безпеки праці та здоров'я під час використання обладнання, роботи з екранними пристроями, на тимчасових будівельних майданчиках, гірничодобувних підприємствах з підземним і відкритим способами видобування, транспортування тощо. Також Україною ратифіковано 71 конвенцію Міжнародної організації праці, з них 8 фундаментальних та 4 пріоритетні, решта – технічні.

Таким чином, на міжнародному рівні стратегія підвищення рівня безпеки орієнтується на економічні, соціальні, політичні та науково-технічні показники. Крім того, постійно проводиться консультування підприємств, організацій, установ щодо питань праці та дотримання правил безпеки, видається технічна література в якості превентивних заходів, проводяться наукові дослідження в сфері безпеки праці. Міжнародний досвід показує, що систему стандартів та правових документів в сфері охорони праці необхідно систематично вдосконалювати, шляхом комплексного аналізу та перегляду, враховуючи статистичні, наукові та практичні дані.

1. ДСТУ ISO 26000:2019. Настанови щодо соціальної відповідальності (ISO 26000:2010, IDT). URL: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=91617](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=91617) (дата звернення: 12.02.2022). 2. ДСТУ ISO 9001:2015. Національний стандарт України. Системи управління якістю (ISO 9001:2015, IDT). URL: [https://nmapo.edu.ua/images/Onas/Pidrozdil/03\\_03\\_18m-3.pdf](https://nmapo.edu.ua/images/Onas/Pidrozdil/03_03_18m-3.pdf). (дата звернення: 12.02.2022). 3. ДСТУ-П OHSAS 18001:2010. Системи управління безпекою та гігієною праці. Вимоги. URL: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=27641](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=27641) (дата звернення: 12.02.2022). 4. ДСТУ IEC/ISO 31010:2013. Керування ризиком. Методи загального оцінювання ризику (IEC/ISO 31010: 2009). URL: <https://khoda.gov.ua/image/catalog/files/dstu%2031010.pdf> (дата звернення: 12.02.2022). 5. ДСТУ ISO 50001:2020. Системи енергетичного менеджменту. Вимоги та настанова щодо використання (ISO 50001:2018, IDT). URL: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=90178](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=90178) (дата звернення: 12.02.2022). 6. ДСТУ ISO 45001:2019. Системи управління охороною здоров'я та безпекою праці. Вимоги та настанови щодо застосування (ISO 45001:2018, IDT). URL: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=88004](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=88004) (дата звернення: 12.02.2022). 7. ДСТУ ISO 14001:2015. Системи менеджменту навколишнього середовища – вимоги і керівництво щодо використання (ISO 14001:2015, IDT). URL: [https://quality.nuph.edu.ua/wpcontent/uploads/2018/10/%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3-ISO\\_14001-2015-.pdf](https://quality.nuph.edu.ua/wpcontent/uploads/2018/10/%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3-ISO_14001-2015-.pdf) (дата звернення: 12.02.2022). 8. SA 8000. Соціальна відповідальність. (Неофіційний переклад). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/n0015697-07#Text> (дата звернення: 12.02.2022).

## REFERENCES:

1. DSTU ISO 26000:2019. Nastanovy shchodo sotsialnoi vidpovidalnosti (ISO 26000:2010, IDT). URL: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=91617](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=91617) (data zvernennia: 12.02.2022). 2. DSTU ISO 9001:2015. Natsionalnyi standart Ukrainy. Systemy upravlinnia yakistiu (ISO 9001:2015, IDT). URL: [https://nmapo.edu.ua/images/Onas/Pidrozdil/03\\_03\\_18m-3.pdf](https://nmapo.edu.ua/images/Onas/Pidrozdil/03_03_18m-3.pdf). (data zvernennia: 12.02.2022). 3. DSTU-P OHSAS 18001:2010. Systemy upravlinnia bezpekoiu ta hihienoiu pratsi. Vymohy. URL: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=27641](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=27641) (data zvernennia: 12.02.2022). 4. DSTU IES/ISO 31010:2013. Keruvannia ryzykom. Metody zahalnoho otsiniuvannia ryzyku (IES/ISO 31010: 2009). URL: <https://khoda.gov.ua/image/catalog/files/dstu%2031010.pdf> (data zvernennia: 12.02.2022). 5. DSTU ISO 50001:2020. Systemy enerhetychnoho menedzhmentu. Vymohy ta nastanova shchodo vykorystannia (ISO 50001:2018, IDT). URL: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=90178](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=90178) (data zvernennia: 12.02.2022). 6. DSTU ISO 45001:2019. Systemy upravlinnia okhoronoiu zdorovia ta bezpekoiu pratsi.

Vymohy ta nastanovy shchodo zastosuvannya (ISO 45001:2018, IDT). URL: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=88004](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=88004) (data zvernennia: 12.02.2022). **7.** DSTU ISO 14001:2015. Systemy menedzhmentu navkolishnoho seredovyshcha – vymohy i kerivnytstvo shchodo vykorystannia (ISO 14001:2015, IDT). URL: [https://quality.nuph.edu.ua/wpcontent/uploads/2018/10/%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3-ISO\\_14001-2015-.pdf](https://quality.nuph.edu.ua/wpcontent/uploads/2018/10/%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3-ISO_14001-2015-.pdf) (data zvernennia: 12.02.2022). **8.** SA 8000. Sotsialna vidpovidalnist. (Neofitsiinyi pereklad). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/n0015697-07#Text> (data zvernennia: 12.02.2022).

---

**Dovbenko T. O., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor**  
(National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

### **INTERNATIONAL IMPERATIVES OF THE HYGIENE AND MANAGEMENT SYSTEM OCCUPATIONAL SAFETY**

The article analyzes the set of international standards ISO, OHSAS, BS IIR in the field of occupational safety management system. The basic requirements and principles of international legislation on working conditions, risks, management, social responsibility and information security management are established. The purpose and advantages of the international standards of the ISO, OHSAS, BS IIR series on the quality construction and management of integrated occupational health and safety management systems are determined. The order of local formation of working conditions is determined as a result of perfect operation of quality management systems or occupational health and safety ISO 9001, BS OHSAS18001, risk management ISO 31000, energy management ISO 50001, health and safety ISO 45001 and more. Attention to universal values is reflected in the standard ISO 14001:2015. The international standard ISO SR 26000: 2011 is comprehensive and takes into account the interests of most stakeholder groups, aimed at environmental protection, resource efficiency. OHSAS 18001 and SA 8000 Social Accountability are designed to build employment relationships. They do not match the purpose and contain requirements to eliminate discrimination and ensure appropriate working conditions. Implementation of the international standard BS II (British standards Investors in people) provides such competitive advantages as increasing productivity and

**competitiveness, increasing financial performance, improving the quality of products and services, improving teamwork, improving the corporate image of the organization, investment attractiveness. These standards have many common rules and this list is not exhaustive. The list of standards that are part of the integrated management system is developed taking into account the needs and specifics of the enterprise. The basic principles of the European Union on occupational health and safety have also been identified through the implementation of Directive 89/391 / EEC and the adaptation of international instruments to national occupational safety and health policy.**

***Keywords:* international standard; management system; safety; labor; health; management; social; economic; scientific.**

---



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

**Бучинський О. А., Филипчук В. Л., Кусковець С. Л.** (Національний університет водного господарства та природокористування м. Рівне),  
**Нос М. В., Тимкіна О. Л.** (Управління Держпраці у Рівненській області м. Рівне)



## ВПРОВАДЖЕННЯ РИЗИК-ОРІЄНТОВАНОЇ МОДЕЛІ УПРАВЛІННЯ ОХОРОНОЮ ПРАЦІ НА ПІДПРИЄМСТВАХ РІВНЕНЩИНИ

Існуюча система управління охороною праці не відповідає вимогам сучасної системи розвитку економіки, не дозволяє запровадити ефективний механізм економічного стимулювання роботодавців до створення безпечних і здорових умов праці своїм працівникам. У багатьох країнах світу головним механізмом вирішення проблем забезпечення виробничої безпеки розглядається система, що побудована на основі оцінки та управління ризиками для життя та здоров'я працівників. Така система дає змогу забезпечити безпечні та здорові умови праці на робочому місці, запобігти виробничим травмам і погіршенню стану здоров'я, а також постійно удосконалювати її показники. Відсутність єдиної нормативної бази в Україні з питань оцінки виробничих ризиків, може призводити до суб'єктивізму, що не дозволяє узагальнювати і порівнювати відомості про наявність небезпечних і/чи шкідливих умов праці. Крім того, ризик-орієнтований підхід вкрай повільно впроваджується на підприємствах держави, тому що відповідні фахівці професійно і психологічно не готові до цього. Початковим етапом дій щодо оцінки ризику є виявлення та ідентифікація небезпек, присутніх на робочих місцях. З метою визначення вікового інтервалу, який є найбільш травмонебезпечним, проведено розрахунок ризиків настання нещасних випадків серед працівників підприємств Рівненської області з різним професійним досвідом. Встановлено, що практично всі вікові групи працюючих перебувають в групі високого та дуже високого ризику травматизму. Для оцінювання ризику виникнення небезпечних ситуацій на виробництві, робочих місцях визначаються категорії небезпеки (ризик) з порівнянням встановлених значень кількісних критеріїв. За результатами оцінювання ризиків визначається адекватність наявних заходів


**безпеки, потреба в їх поліпшенні чи запровадженні інших заходів. Основним сполучним елементом підвищення виробничої безпеки на підприємствах Рівненщини може бути впровадження саме ризик-орієнтованої моделі для оцінки стану безпеки праці за єдиною рекомендованою методологічною схемою. Відмінними можуть бути лише ризикоформуючі критерії для кожного підприємства. Це дозволить оцінювати та порівнювати рівень безпеки праці на підприємствах області на підставі єдиних підходів та критеріїв.**

**Ключові слова:** система управління охороною праці; ризик-орієнтований підхід; безпека та гігієна праці; виробничий ризик; ідентифікація небезпеки; кількісна оцінка ризику; категорія небезпеки.

**Вступ.** На сьогодні в Україні діє система управління охороною праці (СУОП), що сформована за часів планово-адміністративної економічної системи. Зазначена СУОП показала свою ефективність за умов монополії державної власності в усіх галузях економіки, планування розвитку технічних систем та значного регламентування процедур і правил, пов'язаних із застосуванням робочого обладнання та виконанням робіт. Така система не відповідає вимогам сучасної системи розвитку економіки, не дозволяє запровадити ефективний механізм економічного стимулювання роботодавців до створення безпечних і здорових умов праці своїм працівникам, а також не дає можливості власнику вибирати методику управління підприємством з урахуванням сучасних досягнень у сфері менеджменту та міжнародних стандартів у сфері управління безпекою, інтегрувати таку СУОП в загальну систему управління підприємством. В багатьох країнах світу, міжнародних організаціях, головним механізмом вирішення проблем забезпечення виробничої безпеки як на міжнародному, державному чи регіональному рівні, так і на рівні окремого виробництва і робочого місця, розглядається система управління, побудована на основі оцінки та управління ризиками для життя та здоров'я працівників.

**Існуючий стан.** Ризик-орієнтований підхід до управління охороною праці розроблено на основі міжнародних документів з безпеки та гігієни праці (Occupational Healthy and Safe) та регламентовано державними стандартами [1; 2]. Застосування





системи управління охороною здоров'я і безпекою праці (ОЗіБП) спрямоване на те, щоб дати змогу організації забезпечити безпечні та здорові умови праці на робочому місці, запобігти виробничим травмам і погіршенню стану здоров'я, а також постійно удосконалювати показники у сфері ОЗіБП. Система управління ОЗіБП може бути набагато ефективнішою та результативнішою, якщо дії для її реалізації виконувати заздалегідь. Упровадження системи управління ОЗіБП, що відповідає цьому стандарту, дасть змогу організації керувати ризиками і поліпшувати показники у цій сфері.

Стандарт [1] можна застосовувати до будь-якої організації, яка прагне створити, впровадити й забезпечити функціонування системи управління ОЗіБП і, зокрема, реагувати на невідповідності в системі управління, пов'язані з її функціонуванням.

Ключовими складовими пропонованого варіанту Типової моделі структурної побудови СУОПП (Система управління охороною праці підприємства) є: політика та цілі; прогнозування і цільове планування; впровадження та функціонування; контроль та коригувальні дії; аналіз та оцінка з боку керівництва, постійне вдосконалення (розвиток) системи управління. Всі ці дії реалізуються через відповідні функції, процеси і субпроцеси за відомим циклом PDCA (Plan – Do – Check – Act): Плануй – Виконуй – Контролюй – Дій (вдосконалюй) [1]. Саме на етапі планування виявляють та оцінюють ризики й можливості у сфері ОЗіБП, визначають цілі і процеси, необхідні для досягнення необхідних результатів.

В Україні початок ризик-орієнтованого підходу в області безпеки вперше було покладено на початку 2000-х років прийняттям відповідних документів [3 – 5] та інших основоположних нормативно-правових актів [6].

Однак нині в Україні поки немає єдиної нормативної бази, типових методик або уніфікованих рекомендацій оцінки професійних (виробничих) ризиків, придатних для практичного застосування. Відсутність єдиного підходу до оцінки ризиків на робочих місцях може призводити до суб'єктивізму, не дозволяє узагальнювати і порівнювати відомості про наявність небезпечних і/чи шкідливих умов праці.

З цих причин ризик-орієнтований підхід вкрай повільно впроваджується на підприємствах України не тільки в силу відсутності єдиної методології, але й тому, що відповідні фахівці

просто професійно і психологічно неготові до цього. З цих причин проблема аналізу, оцінки ризиків в охороні праці і керування ними, враховуючи її складність і багатоаспектність, сьогодні стає дуже актуальною і затребуваною.

Безумовно, початковим (вихідним) етапом є визначення понять і категорій, що формують процеси аналізу, оцінки та в цілому управління ризиками. В організаціях та на підприємствах повинні розроблятися і підтримуватися в робочому стані процедури оцінки ризиків, мета яких полягає в тому, щоб на основі отриманих результатів, якщо не виключити повністю, то зменшити і довести небезпеки, існуючі на робочих місцях при виконанні виробничих процесів, до певних, соціально і економічно прийнятних на цей момент рівнів. Нині практично в усіх країнах світу та міжнародних організаціях дослідження (аналіз) і оцінка ризиків розглядаються в якості головного механізму вирішення проблем забезпечення виробничої безпеки як на міжнародному, державному чи регіональному рівнях, так і на рівні окремого виробництва та робочого місця.

Як відомо, не тільки технічні системи, установки, агрегати, обладнання підвищеної безпеки, технологічні процеси, умови праці, що не відповідають нормативним і санітарно-гігієнічним вимогам, є потенційними і реальними джерелами безпеки для працівників. Якщо до цього додати неадекватні (небезпечні) дії, які вчиняються працівником свідомо, всупереч нормам безпеки, знаючи, що це неправильно, то ризик, наслідком якого є травматичні випадки, в тому числі смертельного характеру, зростає ще більшою мірою.

При цьому ризики, викликані «людським фактором», належать до числа найбільш непередбачуваних. Тому наявність факторів безпеки (ризиків) в повсякденній трудовій діяльності становить серйозну управлінську, організаційну, технічну, соціальну, психофізіологічну проблему.

У багатьох випадках саму безпеку усунути повністю практично неможливо. Однак прийняттям відповідних заходів можна захистити працівника від безпеки, знизити ризик реалізації безпеки у вигляді нещасного випадку, аварійної події або інших інцидентів.

З цього випливає висновок про необхідність виявлення факторів безпеки (ризиків), оцінки їх рівнів (значень) і прийняття необхідних заходів щодо усунення або зменшення їхнього

негативного впливу. Процедури виявлення (ідентифікації) небезпеки (ризик), кількісної оцінки її (його) значення, подальшого аналізу та прийняття відповідних заходів, протидіючих небезпеці, тим самим знижують її, і формують так званий процес управління професійним ризиком (ризиками).

Тобто сучасна концепція управління безпекою будується на базі аналізу, оцінки та доведення рівнів ризиків до оптимальних (прийнятних) значень. І вже на цій основі здійснюється розробка та реалізація цільової політики і вжиття заходів безпеки. На зміну принципу досягнення так званого «нульового ризику» прийшла концепція «прийнятного ризику». Якщо деякі з існуючих ризиків не можна виключити, то прийняти відповідні заходи і довести їхні значення до прийнятних рівнів.

**Мета роботи** полягає в оцінці впровадження ризик-орієнтованої моделі управління охороною праці на підприємствах Рівненщини.

**Результати досліджень.** Першим етапом в послідовності дій щодо оцінки ризику є виявлення та ідентифікація небезпек, що присутні на робочих місцях. Ідентифікація небезпек – це, по суті, усвідомлення того, що небезпека існує, і визначення наслідків її прояви для того, щоб відповісти на запитання: чого може відбутися або вийти з ладу, хто піддається небезпеці; як часто це може відбуватися, яка вірогідність; які наслідки прояву досліджуваної події.

Розпочинається процес ідентифікації з аналізу вихідної інформації, ознайомлення з технічною документацією, що регламентує виробничо-технологічні процеси, огляду робочих місць з метою виявлення небезпечних і шкідливих виробничих факторів виробничого середовища, які присутні чи можуть виникнути надалі.

В якості вихідних даних для первинної ідентифікації виробничих небезпек можуть бути результати атестації робочих місць за умовами праці, протоколи вимірювань показників небезпечних і шкідливих виробничих факторів, матеріали перевірок, в тому числі аудитів, дані статистики виробничого травматизму і захворювань, матеріали розслідування нещасних випадків на виробництві і професійних захворювань, опитування працівників тощо.

За результатами первинної ідентифікації професійних небезпек складається реєстр контрольованих небезпечних і шкідливих

факторів виробничого середовища і трудового процесу на робочому місці.

Причинами виробничих небезпек і відповідних ризиків є застосування на виробництві небезпечного технічного устаткування та технологічних процесів, погіршення умов праці, негативний прояв «людського фактора», недостовірність статистичних даних, недостатня адаптованість вітчизняних нормативних актів до міжнародних і європейських. Вказані причини впливають на управління створеними ризиками, але різною мірою залежно від їх значимості для виробничого рівня.

Ризик небезпеки отримання травми на виробництві  $R_i$  визначається за формулою

$$R_i = \frac{n_i}{N_i}, \quad (1)$$

де  $R_i$  – відносне значення ризику за  $i$ -м параметром;  $n_i$  – кількість потерпілих  $i$ -го вікового діапазону;  $N_i$  – кількість працюючих  $i$ -го вікового діапазону.

З метою визначення вікового інтервалу, який є найбільш травмонезбезпечним серед працівників з різним професійним досвідом, проведено розрахунок ризиків настання нещасних випадків. Для розрахунку використано статистичні дані за 2020 рік (всі травми (197), отримані працівниками Рівненської області на виробництві). Упродовж зазначеного періоду загальна кількість працюючих в області склала 236,3 тис. осіб.

Розподіл працюючих на підприємствах області за віковими групами наведено в табл. 1.

Таблиця 1  
Розрахункова таблиця визначення ризику отримання травм різними віковими групами працюючих

Віковий діапазон працюючих, роки	Кількість працюючих, тис. осіб	Кількість потерпілих осіб	Ризик небезпеки $R_i$
15–24	20,56	56	$2,7 \times 10^{-3}$
25–29	28,1	48	$1,7 \times 10^{-3}$
30–34	34,5	35	$1,01 \times 10^{-3}$
35–39	30,2	31	$1,02 \times 10^{-3}$

продовження табл. 1

40–49	52,9	20	$3,7 \times 10^{-4}$
50–60	47,7	7	$1,46 \times 10^{-4}$
61–70	22,2	-	-

Порівнюємо ризики за допомогою шкали, що використовується у вітчизняній та світовій практиці (табл. 2).

Таблица 2


 Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

**Шкала порівняння ризиків травматизму**
**Упорядкована шкала ризиків травматизму**

Низький			Середній		Високий			
$<1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$>1 \cdot 10^{-2}$
Знехтуваний	Низький	Відносно низький	Середній	Відносно середній	Високий	Дуже високий	Екстремальний	

Результати розрахунку (табл. 1) свідчать про те, що практично всі вікові групи працюючих в Рівненській області перебувають в групі високого та дуже високого ризику травматизму.

Для оцінювання ризику виникнення небезпечних ситуацій на виробництві проводиться визначення категорії небезпеки (ризиків). Підставою для цього є результати зіставлення фактичних показників зі встановленими значеннями кількісних критеріїв, віднесення небезпек (ризиків) до тієї чи іншої категорії, які повинні бути регламентовані відповідними класифікаторами або встановлені на підставі подальших досліджень із залученням фахівців (експертним методом) та використанням спеціальної методології.

Далі проводиться визначення категорії (імовірності) виникнення небезпеки і часу (експозиції) її дії. Для цього можуть використовуватися дані статистичних спостережень, інформація, що міститься у технологічній документації, результати атестації робочих місць за умовами праці, аналіз матеріалів розслідування не тільки від зареєстрованих нещасних випадків, а й врахування всіх мікротравм (навіть з невеликою втратою працездатності), що дозволяє з більшою ймовірністю прогнозувати можливість більш серйозних випадків травматизму і, відповідно, розробляти заходи

щодо їх запобігання.

Ступінь базового ризику виникнення небезпечних ситуацій можна визначити за формулою

$$P = T \times \Pi \times B_p, \quad (2)$$

де  $P$  – ступінь ризику;  $T$  – важкість та можливі наслідки небезпечної події;  $\Pi$  – можливість нараження на небезпеку;  $B_p$  – імовірність виникнення небезпечної події.

В залежності від імовірності прояву і дії небезпечних і/або шкідливих виробничих факторів небезпечні зони поділяються на два види: зони постійно діючих небезпечних чинників, наявність яких пов'язані з нормальним ходом процесу і заздалегідь очевидні; зони потенційно небезпечних чинників, які виникають випадково, при порушенні нормального ходу виробничого процесу.

Умовна імовірність виникнення небезпечної події в числовому відтворенні визначається шляхом експертної оцінки за табл. 3. Експертна оцінка здійснюється групою призначених фахівців.

Важкість та можливі наслідки небезпечної події в числовому відтворенні визначаємо за табл. 4.

Можливість нараження на небезпеку визначається за табл. 5.

Таблиця 3

Критерії визначення імовірності виникнення інциденту

Імовірність	Коментарі
5 – майже напевно	Подія, що спостерігається регулярно. Подія, що трапляється в більшості випадків
4 – досить імовірно	Подія, що спостерігається періодично
3 – імовірно	Подія, що трапляється інколи
2 – малоімовірно	Подія, що спостерігається рідко
1 – майже неймовірно	Подія, що трапляється лише при винятковому збігу обставин

Таблиця 4

Важкість небезпечної події та її наслідки

Важкість небезпечної події		Наслідки
5 – катастроф рофічна	Груповий нещасний випадок (постраждало 2 і більше працівників); нещасний випадок із смертельними наслідками; аварія; пожежа	Розслідування державними органами влади. Кримінальна відповідальність. Штрафні санкції України. Зупинка робіт. Анулювання ліцензії на вид діяльності

продовження табл. 4

4 – суттєва	Важкий нещасний випадок (тимчасова непрацездатність більше 60 днів). Профзахворювання. Інцидент, загоряння	Розслідування державними органами влади. Кримінальна відповідальність. Штрафні санкції згідно КпАП. Можлива призупинка робіт
Незначна	Серйозне поранення, хвороба з тимчасовою втратою працездатності протягом до 60 днів. Інцидент, загоряння	Розслідування державними органами влади. Штрафні санкції згідно КпАП. Можлива призупинка робіт
2 – мінімальна	Травма без втрати працездатності, потреба у стаціонарній медичній допомозі, надання легшої роботи. Інцидент, загоряння	Внутрішнє розслідування. Адміністративна відповідальність Штрафні санкції згідно КпАП
1 – несуттєва	Несуттєва травма (поріз, забиття, надана первинна медична допомога)	Дисциплінарна відповідальність

Таблица 5

## Можливість нараження на небезпеку

Числове значення	Характеристика
3	Постійна можливість нараження на небезпеку (щоденна, щозмінна)
2	Рідка можливість нараження на небезпеку (один раз на місяць)
1	Мінімальна (один чи декілька разів на рік)

Визначення ступеню базового ризику здійснюється за табл. 6.

За результатами оцінювання ризиків визначаємо адекватність наявних заходів безпеки, потребу в їх поліпшенні чи запровадженні інших заходів безпеки. Вибираємо такі заходи безпеки, щоб можна було знизити ймовірність виникнення потенційної тяжкості травми чи збитків. Вибираючи заходи безпеки, зокрема: усунення небезпеки (наприклад, заміна старої техніки новою); інженерне рішення щодо заміни менш небезпечними матеріалами або зменшення енергоємності системи (наприклад, зниження напруги, сили струму,

Таблиця 6

Визначення ступеню базового ризику

Ступінь ризику	Коментарі
Екстремальний (55–75)	Потребує невідкладних дій вищого керівництва із обов'язковим складанням плану заходів та призначенням відповідальних осіб. При необхідності – призупинка ведення робіт
Високий (25–54)	Потребує уваги вищого керівництва. Терміново проінформувати працівників та їх безпосередніх керівників, керівника відповідного підрозділу та начальника служби охорони праці. Вжити заходи по забезпеченню безпеки працівників
Середній (10–24)	Проінформувати працівників та безпосередніх керівників, керівника відповідного підрозділу та начальника служби охорони праці. Вжити заходи щодо зменшення ризику
Низький (1–9)	Потребує уваги вищого керівництва. Терміново проінформувати працівників та їх безпосередніх керівників, керівника відповідного підрозділу та начальника служби охорони праці. Вжити заходи по забезпеченню безпеки працівників

тиску, температури тощо); технічне рішення (наприклад, встановлення систем вентиляції, механічного огороження, блокування, звукового сповіщення тощо); вивіски, знаки безпеки, маркування небезпечної зони, сигналізації, інспекції обладнання, організаційні заходи (наприклад, контроль доступу, дозволи на роботу, інструктажі, наради; засоби індивідуального захисту тощо).

Практично може бути обрано як окремий захід безпеки, так і поєднання кількох заходів. Якщо немає можливості усунути ризик, то розглядають можливість зниження ризику до прийняттого рівня, який підприємство може допустити, враховуючи свої правові зобов'язання та власну політику у сфері охорони праці. Під час обирання заходів безпеки розглядають: нормативні документи у сфері охорони праці, в яких вказано заходи безпеки для конкретних небезпек; практику у сфері охорони праці, новітні досягнення у цій сфері; необхідність поєднання заходів безпеки, наприклад, технічні



засоби захисту та засоби індивідуального захисту; можливість застосування засобів колективного захисту; наявність ресурсів для запровадження певного заходу безпеки;

З метою недопущення виробничого травматизму серед працівників із незначним професійним досвідом на підприємствах доцільно: посилити контроль за використанням працівниками ЗІЗ (у 2020 році 4,1% працівників області були травмовані через невикористання ЗІЗ при їх наявності); не допускати до виконання робіт працівників без проходження ними навчання та перевірки знань з питань охорони праці, проведення інструктажів, попередніх і періодичних медичних оглядів; посилити контроль за трудовою і виробничою дисципліною працівників; забезпечити належне виконання посадових обов'язків особами, відповідальними за охорону праці (майже 23% працівників області травмувались не зі своєї вини); посилити ефективність навчання з охорони праці (4,1% працівників були травмовані через недоліки навчання безпечним прийомом праці).

Під час обирання заходів безпеки дії стосовно високого рівня ризику та пропозиції щодо суттєвого зниження ризику повинні мати пріоритет над діями, які мають обмежену вигоду від зменшення ризику. Дані щодо ідентифікованих небезпек, ризиків, пов'язаних з небезпеками, а також вжитих заходів безпеки документуємо у вигляді Карт оцінки небезпечних чинників і відповідних заходів безпеки.

Основним сполучним елементом забезпечення виробничої безпеки може бути застосування ризик-орієнтованого підходу до оцінки стану безпеки праці за єдиною схемою. Відмінними залишаться тільки ризикоформуючі фактори для кожного підприємств. Доцільним буде також оцінювання ризику невиконання запланованих працезохоронних заходів, що дозволить їх вчасне коригування.

Після впровадження запланованих заходів проводять оцінку залишкового ризику та визначають, чи став припустимим ступінь ризику виникнення небезпечної ситуації, тобто чи досягли впроваджені заходи очікуваного ефекту чи ні.

**Таким чином,** результати розрахунку ризику отримання травм різними віковими групами працюючих на підприємствах Рівненської області засвідчили, що практично всі вони перебувають в групі високого та дуже високого ризику травматизму. Основним

сполучним елементом підвищення виробничої безпеки може бути застосування ризик-орієнтованого підходу до оцінки стану безпеки праці за єдиною рекомендованою методологічною схемою. Відмінними можуть бути тільки ризикоформуючі фактори, які розробляються окремо для кожного підприємства. Це дозволить оцінювати та порівнювати рівень безпеки праці на підприємствах області на підставі єдиних підходів та критеріїв.



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

**1.** ДСТУ ISO 45001:2019. Системи управління охороною здоров'я та безпекою праці. Вимоги та настанови щодо застосування (ISO 45001:2018, IDT). URL: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=88004](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=88004). (дата звернення: 15.02.2022). **2.** ДСТУ OHSAS 18002:2015. Системи управління гігієною та безпекою праці. Основні принципи виконання вимог OHSAS 18001:2007 (OHSAS 18002:2008, IDT). URL: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id\\_doc=64325](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=64325) (дата звернення: 15.02.2022). **3.** Про об'єкти підвищеної небезпеки : Закон України від 18 січня 2001 р. № 2245-III. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2245-14#Text>. (дата звернення: 15.02.2022). **4.** Про ідентифікацію та декларування об'єктів підвищеної небезпеки : Постанова КМУ від 11 липня 2002 р. № 956. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/956-2002-%D0%BF#Text>. (дата звернення: 15.02.2022). **5.** Про затвердження Методики визначення ризиків та їх прийнятних рівнів для декларування безпеки об'єктів підвищеної небезпеки : Наказ Міністерства праці та соціальної політики України від 04 грудня 2002 р. № 637. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0637203-02#Text>. (дата звернення: 15.02.2022). **6.** Концепція реформування системи управління охороною праці в Україні та затвердження плану заходів щодо її реалізації : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 12 грудня 2018 р. № 989 URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/989-2018-p#Text>. (дата звернення: 15.02.2022).

## REFERENCES:

**1.** DSTU ISO 45001:2019. Systemy upravlinnia okhoronoiu zdorovia ta bezpekoiu pratsi. Vymohy ta nastanovy shchodo zastosuvannia (ISO 45001:2018, IDT). URL: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=88004](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=88004). (data zvernennia: 15.02.2022). **2.** DSTU OHSAS 18002:2015. Systemy upravlinnia hihiienoiu ta bezpekoiu pratsi. Osnovni pryntsypy vykonannia vymoh OHSAS 18001:2007 (OHSAS 18002:2008, IDT). URL: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id\\_doc=64325](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=64325) (data

zvernennia: 15.02.2022). **3.** Pro obiekty pidvyshchenoi nebezpeky : Zakon Ukrainy vid 18 sichnia 2001 r. № 2245-III. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2245-14#Text>. (data zvernennia: 15.02.2022). **4.** Pro identyfikatsiiu ta deklaruvannia obektiv pidvyshchenoi nebezpeky : Postanova KМУ vid 11 lypnia 2002 r. № 956. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/956-2002-%D0%BF#Text> (data zvernennia: 15.02.2022). **5.** Pro zatverdzhennia Metodyky vyznachennia ryzykiv ta yikh pryiniatnykh rivniv dlia deklaruvannia bezpeky obektiv pidvyshchenoi nebezpeky : Nakaz Ministerstva pratsi ta sotsialnoi polityky Ukrainy vid 04 hrudnia 2002 r. № 637. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0637203-02#Text>. (data zvernennia: 15.02.2022). **6.** Kontseptsiiia reformuvannia systemy upravlinnia okhoroноiu pratsi v Ukraini ta zatverdzhennia planu zakhodiv shchodo yii realizatsii : Rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 12 hrudnia 2018 r. № 989. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/989-2018-r#Text>. (data zvernennia: 15.02.2022).

---

**Buchynskiy O. A., Fylypchuk V. L., Kuskovets S. L.** (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne), **Nos M. V., Tymkina O. L.** (Department of State Labor in Rivne region, Rivne)

## **INTRODUCTION OF RISK-ORIENTED MODEL OF LABOR PROTECTION MANAGEMENT AT ENTERPRISES OF THE RIVNE REGION**

**The existing management system of labor protection does not meet the requirements of the modern system of economic development, does not allow to introduce an effective mechanism of economic incentives for employers to create safe and healthy working conditions for their employees. In many countries around the world, the main mechanism for solving the problems of occupational safety is considered to be a system based on the assessment and management of risks to life and health of workers. This system ensures safe and healthy working conditions in the workplace, prevents occupational injuries and deterioration, and constantly improves its performance. The lack of a unified regulatory framework in Ukraine on the assessment of industrial risks can lead to subjectivity, which does not allow to summarize and compare information about the presence of dangerous and / or harmful working conditions. In addition, the risk-oriented approach is being**

implemented very slowly at state-owned enterprises because the relevant specialists are not professionally and psychologically ready for it. The initial step in risk assessment is to identify hazards in the workplace. In order to determine the age interval, which is the most traumatic, the risk of accidents among employees of enterprises in the Rivne region with different professional experience was calculated. It was found that almost all age groups of workers are in the group of high and very high risk of injury. To assess the risk of dangerous situations at work, workplaces are defined categories of danger (risk) with a comparison of established values of quantitative criteria. The results of risk assessment determine the adequacy of existing security measures, the need to improve them or implement other measures. The main connecting element of increasing industrial safety at the enterprises of the Rivne region may be the introduction of a risk-oriented model to assess the state of occupational safety according to the only recommended methodological scheme. Only risk-generating criteria for each enterprise can be different. This will allow to assess and compare the level of occupational safety at the enterprises of the region on the basis of common approaches and criteria.

**Keywords:** labor protection management system; risk-oriented approach; occupational safety and health; production risk; hazard identification; quantitative risk assessment; hazard category.

**Прохоренко М. В., к.ф.-м.н., доцент, Прохоренко С. В., д.т.н., професор** (Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів), **Мороз М. В., д.х.н., професор** (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне), **Ярема Н. П., к.т.н., доцент** (Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів)

### ПРОСТІ ПЕРІОДИЧНІ РОЗВ'ЯЗКИ ОДНОГО РІВНЯННЯ КОЛИВАНЬ СТРУНИ З ІМПУЛЬСНОЮ ДІЄЮ

Досліджено процес імпульсного коливання струни з регулюючим функціоналом. Визначено умови існування періодичних розв'язків з одним імпульсом на періоді.

**Ключові слова:** диференціальні рівняння; імпульсна дія; коливання зі зворотною дією.

**Вступ.** Необхідність вивчення диференціальних рівнянь з імпульсною дією виникає у випадках, коли при побудові математичної моделі існуючих фізичних, технічних, біологічних та ін. процесів із швидкозмінними збуреннями можна знехтувати тривалістю самого збурення. Такі задачі можна знайти в роботах [1–5]. Одержані для імпульсних систем результати підсумовано у монографії [6]. Зазначена робота є продовженням досліджень, розпочатих у [7].

**Постановка задачі.** Розглянемо рівняння

$$u_{tt} = a^2 u_{xx} - 2\nu u_t - bu \quad (0 \leq x \leq l, 0 \leq t < \infty), \quad (1)$$

з початковими та граничними умовами

$$u(x, 0) = \varphi_0(x), \quad u_t(x, 0) = \psi_0(x) \quad (0 \leq x \leq l), \quad (2)$$

$$u_x(0, t) - hu(0, t) = 0, \quad u_x(l, t) + hu(l, t) = 0 \quad (0 \leq t < \infty), \quad (3)$$

де функція  $u(x, t)$  – зміщення струни в момент часу  $t$ ;  $a, b, c, \nu, l, h = \text{const} > 0$ ,  $\varphi_0 \in C^2[0, l]$ , має кусково-неперервну на  $[0, l]$  похідну третього порядку та задовольняє умовам

$\varphi_0(0) = \varphi_0(l) = 0, \varphi_0''(0) = \varphi_0''(l) = 0$ ; функція  $\psi_0 \in C^1[0, l]$ , має кусково-неперервну на  $[0, l]$  похідну другого порядку та задовольняє умовам  $\psi_0(0) = \psi_0(l) = 0$ . Для узгодженості початкових та граничних умов вимагаємо  $\varphi_0'(0) = \varphi_0'(l) = 0$ .

Закон імпульсної дії визначимо співвідношенням

$$\begin{aligned} & \left( u(x, t+0) - u(x, t-0) \right) \Big|_{E_u(t)=E_0} = \alpha(x), \\ & \left( u_t(x, t+0) - u_t(x, t-0) \right) \Big|_{E_u(t)=E_0} = \beta(x) \quad (0 \leq x \leq l), \end{aligned} \quad (4)$$

де регулюючий функціонал  $E_u(t)$  визначає повну енергію коливання струни, що визначається рівністю [8]:

$$E_u(t) = \frac{1}{2} \int_0^l \left( (au_x)^2 + (u_t)^2 \right) dx + \frac{a^2 h}{2} (u^2(0, t) + u^2(l, t)), \quad (5)$$

критичне значення  $E_0 > 0$ ,  $\alpha \in C^2[0, l], \beta \in C^1[0, l]$  – задані функції, для яких  $\alpha|_{x=0, l} = \beta|_{x=0, l} = 0, \alpha'|_{x=0, l} = 0, \alpha''|_{x=0, l} = 0$ , третя похідна функції  $\alpha$  та друга похідна функції  $\beta$  є кусково-неперервні на  $[0, l]$ .

Отже, постановка задачі складається зі співвідношень (1)–(4) причому рівності (1)–(3) справджуються тільки у випадку  $E_u(t) \neq E_0$ . Якщо  $E_u(0) = E_0$ , то в умові (4) розглядаємо  $\varphi_0(x)$  замість  $u(x, t-0)$ , а  $\psi_0(x)$  замість  $u_t(x, t-0)$  та 0 замість  $t-0$ .

Моменти часу  $t_k, k \in \mathbb{N}$ , коли регулюючий функціонал  $E_u(t_k) = E_0$ , визначають моменти імпульсної дії.

Для забезпечення існування нескінченної послідовності імпульсів задачі (1)–(4) при заданих  $E_0, \alpha, \beta$ , як було показано в [7], вимагаємо виконання нерівності

$$E_0 < \frac{1}{8} \int_0^l (a^2 \alpha_x^2(x) + \beta^2(x)) dx. \quad (6)$$

Розв'язком задачі (1)–(4) є функція  $u = u(x, t)$ , яка двічі неперервно диференційована за змінними  $x, t$  в кожній області

$D_k = \{(x, t) | x \in [0, l], t \in (t_k, t_{k+1}), E_u(t) \neq E_0, t_0 = 0\}$ ,  $k = 0, 1, 2, \dots$ ,  
 крім того, функція  $u$  та її похідна  $u_t$  неперервні зліва в точках  
 $t = t_k, k \in \mathbb{N}$ .

Розв'язок задачі (1)–(4) існує, єдиний та визначений в області  
 $D = \bigcup_{k=0}^{\infty} D_k$  як розв'язок задачі (1), (3) для рівняння коливань струни  
 в кожній області

$D_k = \{(x, t) | x \in [0, l], t \in (t_k, t_{k+1}), E_u(t) \neq E_0, t_0 = 0\}$ ,  $k = 0, 1, 2, \dots$  з  
 початковими умовами (2) для  $k = 0$  та початковою умовою

$\varphi_k(x) = u(x, t_k) + \alpha(x), \psi_k(x) = u_t(x, t_k) + \beta(x), x \in [0, l]$ ,  
 для  $k = 1, 2, \dots$

### Прості періодичні розв'язки

Зафіксуємо значення  $E_0$ , функції  $\alpha, \beta$  та з'ясуємо існування  
 простих періодичних розв'язків [1] задачі (1)–(4), для яких імпульсна  
 дія здійснюється один раз за період  $T$ , тобто з'ясуємо якими мають  
 бути функції  $\varphi_0, \psi_0$ , щоб розв'язок задачі (1)–(4) був простим  
 періодичним.

**Теорема.** Якщо задані функції  $\alpha, \beta$  та значення  $E_0$   
 задовольняють нерівність  $\int_0^l (a^2 \alpha_x^2(x) + \beta^2(x)) dx > 8E_0$ , то задача  
 (1)–(4) має простий періодичний розв'язок.

**Доведення.** Розв'язок задачі (1)–(4), з фіксованими функціями  
 $\alpha, \beta$  та  $E_0$  буде простим  $T$ -періодичним з імпульсом при  $t = 0$ ,  
 якщо будуть виконуватися одночасно рівності:

$$R_{0n}(T) + \alpha = \varphi_{0n}, S_{0n}(T) + \alpha = \psi_{0n}, \quad (7)$$

де

$$R_{0n}(t) = \begin{cases} e^{-vt} (\varphi_{0n} + \psi_{0n}t), & \text{при } v^2 = (a\lambda_n)^2 + b, \\ e^{-vt} (\varphi_{0n} \operatorname{ch} \omega_n t + \psi_{0n} \operatorname{sh} \omega_n t), & \text{при } v^2 > (a\lambda_n)^2 + b, \\ e^{-vt} (\varphi_{0n} \cos \omega_n t + \psi_{0n} \sin \omega_n t), & \text{при } v^2 < (a\lambda_n)^2 + b, \end{cases}$$



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

$$S_{0n}(t) = \begin{cases} e^{-\nu t} (\psi_{0n} - \nu\varphi_{0n} - \nu\psi_{0nt}), & \text{при } \nu^2 = (a\lambda_n)^2 + b, \\ e^{-\nu t} ((\omega_n\psi_{0n} - \nu\varphi_{0n}) \operatorname{ch}\omega_n t - (\nu\psi_{0n} - \omega_n\varphi_{0n}) \operatorname{sh}\omega_n t), & \text{при } \nu^2 > (a\lambda_n)^2 + b, \\ e^{-\nu t} ((\omega_n\psi_{0n} - \nu\varphi_{0n}) \cos\omega_n t - (\nu\psi_{0n} - \omega_n\varphi_{0n}) \sin\omega_n t), & \text{при } \nu^2 < (a\lambda_n)^2 + b, \end{cases}$$

$$\omega_n = \begin{cases} \sqrt{\nu^2 - (a\lambda_n)^2 - b}, & \text{при } \nu^2 > (a\lambda_n)^2 + b, \\ \sqrt{(a\lambda_n)^2 + b - \nu^2}, & \text{при } \nu^2 < (a\lambda_n)^2 + b, \end{cases}$$

де  $\lambda_n$  – власні значення та  $X_n(x) = \sin(\lambda_n x + \theta_n)$  – власні функції

задачі:  $X''(x) + \lambda^2 X(x) = 0$ ,  $X'(0) - hX(0) = 0$ ,

$X'(l) + hX(l) = 0$ ,  $X_n(x)$  утворюють ортогональну систему

функцій на  $[0, l]$ ,  $\lambda_n$  – додатні корені рівняння  $\operatorname{tg}\lambda l = \frac{2\lambda h}{\lambda^2 - h^2}$ ,

$\lambda_n = O(\pi n)$  при  $n \rightarrow +\infty$ ,  $\theta_n = \operatorname{arctg} \frac{\lambda_n}{h}$ .

Підставивши розв'язки  $\varphi_{0n}, \psi_{0n}$  системи (7) у розв'язок задачі (1)–(4)

$$u(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} R_{0n}(t) \sin(\lambda_n x + \theta_n),$$

одержимо вигляд простого періодичного розв'язку

$$u^*(x, t) = e^{-\nu t} \sum_{n=1}^{\infty} R_n^*(t) D_n^{-1} \sin(\lambda_n x + \theta_n),$$

де  $0 \leq x \leq l, 0 \leq t < T$ ,




 Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

$$\begin{cases}
 \left. \begin{aligned}
 &(\alpha_n(e^{vT} - 1) + T(v\alpha_n + \beta_n) + \\
 &+ t(\beta_n(e^{vT} - 1) - v\alpha_n)), \quad \text{при } v^2 = (a\lambda_n)^2 + b, \\
 &(\operatorname{ch} \omega_n t((\alpha_n v + \beta_n) \operatorname{sh} \omega_n T - \alpha_n \omega_n \operatorname{ch} \omega_n T + \\
 &+ \alpha_n e^{vT}) + \operatorname{sh} \omega_n t(\beta_n e^{vT} - \alpha_n \omega_n \operatorname{sh} \omega_n T - \\
 &- (\alpha_n v + \beta_n) \operatorname{ch} \omega_n T)), \quad \text{при } v^2 > (a\lambda_n)^2 + b, \\
 &(\cos \omega_n t((\alpha_n v + \beta_n) \sin \omega_n T - \alpha_n \omega_n \cos \omega_n T + \\
 &+ \alpha_n e^{vT}) + \sin \omega_n t(\beta_n e^{vT} - \alpha_n \omega_n \sin \omega_n T - \\
 &- (\alpha_n v + \beta_n) \cos \omega_n T)), \quad \text{при } v^2 < (a\lambda_n)^2 + b.
 \end{aligned} \right\} \\
 D_n = \begin{cases}
 e^{vT} + e^{-vT} + vT - 2, & \text{при } v^2 = (a\lambda_n)^2 + b, \\
 e^{vT} + v \operatorname{sh} \omega_n T - (\omega_n + 1) \operatorname{ch} \omega_n T + \omega_n e^{-vT}, & \text{при } v^2 > (a\lambda_n)^2 + b, \\
 e^{vT} + v \sin \omega_n T - (\omega_n + 1) \cos \omega_n T + \omega_n e^{-vT}, & \text{при } v^2 < (a\lambda_n)^2 + b,
 \end{cases}
 \end{cases}$$

 Рівняння для знаходження періоду  $T$  має вигляд

$$\sum_{n=1}^{\infty} \left( R_n^{*2}(T) (\lambda_n \sin(\lambda_n l) \cos(\lambda_n l + 2\theta_n) + h(\sin^2(\lambda_n l + \theta_n) + \sin^2 \theta_n) + \lambda_n^2 l) + S_n^{*2}(T) \frac{\lambda_n l - \sin(\lambda_n l) \cos(\lambda_n l + 2\theta_n)}{\lambda_n} \right) = 4E_0 e^{2vT}, \quad (8)$$

де

$$R_n^*(T) = \begin{cases}
 ((\alpha_n + T\beta_n)e^{vT} - \alpha_n) D_n^{-1}, & \text{при } v^2 = (a\lambda_n)^2 + b, \\
 ((\alpha_n \operatorname{ch} \omega_n T + \beta_n \operatorname{sh} \omega_n T)e^{vT} - \alpha_n \omega_n) D_n^{-1}, & \text{при } v^2 > (a\lambda_n)^2 + b, \\
 ((\alpha_n \cos \omega_n T + \beta_n \sin \omega_n T)e^{vT} - \alpha_n \omega_n) D_n^{-1}, & \text{при } v^2 < (a\lambda_n)^2 + b,
 \end{cases}$$



$$S_n^*(T) = \begin{cases} ((\beta_n - v\alpha_n + v\beta_n T)e^{vT} + \alpha_n(v-1) - \beta_n)D_n^{-1}, & v^2 = (a\lambda_n)^2 + b, \\ (\omega_n \alpha_n (vch2\omega_n T - \omega_n sh2\omega_n T) + \\ + ((\omega_n - v\alpha_n)ch\omega_n T + (\omega_n - v\alpha_n)sh\omega_n T)e^{vT} - \\ - \omega_n (v\alpha_n + \beta_n))D_n^{-1}, & v^2 > (a\lambda_n)^2 + b, \\ (e^{vT}(\omega_n \beta_n - v\alpha_n)\cos\omega_n T - \omega_n \beta_n + \\ - (\omega_n \alpha_n + v\beta_n)\sin\omega_n T)D_n^{-1}, & v^2 < (a\lambda_n)^2 + b. \end{cases}$$

Існування розв'язків рівняння (8) для  $T \in (0; +\infty)$  еквівалентне відшукуванню нулів функції

$$f(t) = e^{-2vT} \sum_{n=1}^{\infty} (R_n^{*2}(T) (\lambda_n \sin(\lambda_n l) \cos(\lambda_n l + 2\theta_n) + \lambda_n^2 l + \\ + h(\sin^2(\lambda_n l + \theta_n) + \sin^2 \theta_n)) + \\ + S_n^{*2}(t) \frac{\lambda_n l - \sin(\lambda_n l) \cos(\lambda_n l + 2\theta_n)}{\lambda_n}) - 4E_0, T \in (0; +\infty).$$

Мають місце границі  $\lim_{T \rightarrow +0} f(T) = 4(E_u(+0) - E_0) > 0$  (оскільки  $E_0 < E_u(+0)$  при виконанні співвідношення (6)) та  $\lim_{T \rightarrow +\infty} f(T) = -4E_0 < 0$ . Звідси функція на проміжку за теоремою Больцано-Коші [9, С. 168] має принаймні один нуль. Таким чином, для заданих функцій  $\alpha, \beta$  та значення  $E_0$  існує простий  $T$  - періодичний розв'язок задачі (1)–(4).

1. Мышкис А. Д. Процесс теплопроводности с авторегулируемой импульсной поддержкой. *Автоматика и телемеханика*. 1995. № 2. С. 35–43.
2. Myshkis A. D. Vibrations of the string with energy dissipation and impulsive feedback support. *Nonlin. Anal., Theory, Meth Appl*. 1996. Vol. 26, № 7. P. 1271–1278.
3. Мышкис А. Д. Автоколебания струны с импульсной обратной связью. *Дифференц. уравнения*. 1998. 34, № 12. С. 1640–1644.
4. Самойленко В. Г., Хомченко Л. В. Крайова задача Неймана для сингулярно збуреного рівняння теплопровідності з імпульсною

дією. *Нелінійні коливання*. 2005. № 1. Т. 8. С. 89–123. **5.** Елгондиев К. К., Хасанов М. Колебания струны с импульсным воздействием. *Крайові задачі для диф. р-нь* : зб. наук. пр. Чернівці : Прут, 2006. Вип. 13. С. 96–102. **6.** Samoilenko A. M., Perestyuk N. A. Impulsive differential equations. *Singapore: World Scientific*. 1995. Vol. 14. 462 p. **7.** Прохоренко М. В., Прохоренко С. В., Мороз М. В., Соляк Л. В. Задача з імпульсною дією для одного рівняння коливань струни. *Вісник НУВГП. Сер. Технічні науки*. 2019. Вип. 3(87). С. 119–127. **8.** Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. М. : Наука. 1966. 724 с. **9.** Фихтенгольц Г. М. Курс дифференциального и интегрального исчисления : в 3-х т. М. : Наука. 1970. Т. 1. 608 с.

## REFERENCES:

**1.** Myishkis A. D. Protsess teploprovodnosti s avtoreguliruemoy impulsnoy podderjkoy. *Avtomatika i telemekhanika*. 1995. № 2. S. 35–43. **2.** Myshkis A. D. Vibrations of the string with energy dissipation and impulsive feedback support. *Nonlin. Anal., Theory, Meth Appl*. 1996. Vol. 26, № 7. P. 1271–1278. **3.** Myishkis A. D. Avtokolebaniya strunyi s impulsnoy obratnoy svyazyu. *Differents. uravneniya*. 1998. 34, № 12. S. 1640–1644. **4.** Samoilenko V. H., Khomchenko L. V. Kraiova zadacha Neimana dlia synhuliarno zburonoho rivniannia teploprovodnosti z impulsnoiu diieiu. *Neliniini kolyvannia*. 2005. № 1. Т. 8. S. 89–123. **5.** Elgondiev K. K., Hasanov M. Kolebaniya strunyi s impulsnym vozdeystviem. *Kraiovi zadachi dlia dyf. r-n* : zб. nauk. пр. Chernivtsi : Prut, 2006. Vyp. 13. S. 96–102. **6.** Samoilenko A. M., Perestyuk N. A. Impulsive differential equations. *Singapore: World Scientific*. 1995. Vol. 14. 462 p. **7.** Prokhorenko M. V., Prokhorenko S. V., Moroz M. V., Soliak L. V. Zadacha z impulsnoiu diieiu dlia odnogo rivniannia kolyvan struny. *Visnyk NUVHP. Ser. Tekhnichni nauky*. 2019. Vyp. 3(87). S. 119–127. **8.** Tihonov A. N., Samarskiy A. A. Uravneniya matematicheskoy fiziki. M. : Nauka. 1966. 724 s. **9.** Fih tengolts G. M. Kurs diffentsialnogo i integralnogo ischisleniya : v 3-h t. M. : Nauka. 1970. T. 1. 608 s.

---

**Prokhorenko M. V., Candidate of Physico-Mathematical Sciences (Ph.D.), Associate Professor, Prokhorenko S. V., Doctor of Engineering, Professor (Lviv Polytechnic National University, Lviv), Moroz M. V., Doctor of Chemical Sciences, Professor (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne), Yarema N. P., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor (Lviv Polytechnic National University, Lviv)**



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

## **SIMPLE PERIODIC SOLUTIONS ONE EQUATIONS OF STRING OSCILLATION WITH IMPULSE INFLUENCE**

**The necessity of study of differential equations with an impulsive action arises in cases where the construction of a mathematical model of existing physical, technical, biological, etc. processes with rapidly changing perturbations can be neglected by the duration of the perturbation duration. This work is a continuation of the started research published in [Pulse action problem for one string oscillation equation. Prokhorenko MV, Prokhorenko SV, Moroz MV, Solyak LV – Bulletin of NUWEE. 2019. Is. 3(87). P. 119–127.]. The process of impulsive vibration of a string with a control functional is studied. Let's look at the equation**

$$u_{tt} = a^2 u_{xx} - 2\nu u_t - bu \quad (0 \leq x \leq l, 0 \leq t < \infty), \quad (1)$$

**with initial and boundary conditions**

$$u(x, 0) = \varphi_0(x), \quad u_t(x, 0) = \psi_0(x) \quad (0 \leq x \leq l) \quad (2)$$


$$u_x(0, t) - hu(0, t) = 0, \quad u_x(l, t) + hu(l, t) = 0 \quad (0 \leq t < \infty), \quad (3)$$

**where the function  $u(x, t)$  – string snake at the moment of the hour  $t$ ;  $a, b, c, \nu, l, h = const > 0$ ,  $\varphi_0 \in C^2[0, l]$ , has a lumpy-continuous on  $[0, l]$  derivative of the third order and satisfies the conditions of the rules  $\varphi_0(0) = \varphi_0(l) = 0$ ,  $\varphi_0''(0) = \varphi_0''(l) = 0$  ; function  $\psi_0 \in C^1[0, l]$ , has a lumpy-continuous on  $[0, l]$  derivative of the second order and satisfies the conditions of the  $\psi_0(0) = \psi_0(l) = 0$ . For consistency of initial and boundary conditions, we require  $\varphi_0'(0) = \varphi_0'(l) = 0$ .**

**The law of impulse action is determined by the ratio**

$$\begin{aligned} (u(x, t+0) - u(x, t-0)) \Big|_{E_u(t)=E_0} &= \alpha(x), \\ (u_t(x, t+0) - u_t(x, t-0)) \Big|_{E_u(t)=E_0} &= \beta(x) \quad (0 \leq x \leq l), \end{aligned} \quad (4)$$

where regulatory functional  $E_u(t)$  determines the total energy of the string oscillation, which is determined by equality:



$$E_u(t) = \frac{1}{2} \int_0^l \left( (au_x)^2 + (u_t)^2 \right) dx + \frac{a^2 h}{2} (u^2(0, t) + u^2(l, t)), \quad (5)$$

critical value  $E_0 > 0$ ,  $\alpha \in C^2[0, l]$ ,  $\beta \in C^1[0, l]$  – specified functions for which  $\alpha|_{x=0, l} = \beta|_{x=0, l} = 0$ ,  $\alpha'|_{x=0, l} = 0$ ,  $\alpha''|_{x=0, l} = 0$ , third derivative of the function is  $\alpha$  and the second derivative of the function  $\beta$  are lumpy-continuous on  $[0, l]$ .

Conditions for the existence of periodic solutions with one momentum per period are determined. There are boundaries  $\lim_{T \rightarrow +0} f(T) = 4(E_u(+0) - E_0) > 0$  (because  $E_0 < E_u(+0)$ ) and  $\lim_{T \rightarrow +\infty} f(T) = -4E_0 < 0$ ). Hence, the function at the interval according to the Bolzano-Cauchy theorem has at least one zero. Thus, for the specified functions of  $\alpha, \beta$  and meaning  $E_0$  there is a simple  $T$  – periodic solution of the problem (1)–(4). It is shown that for given functions of alpha functions and values of the regulating functional at 0 – there is a simple periodic solution of the problem, the law of impulse action describing the implementation.

**Keywords:** differential equations; impulsive action; feedback oscillations.