



National Technical  
University of Ukraine  
"Igor Sikorsky  
Kyiv Polytechnic Institute"



Proceedings of the IX International  
Scientific and Technical Conference

# **PURE WATER. FUNDAMENTAL, APPLIED AND INDUSTRIAL ASPECTS**

**20-21 November 2025**

National Technical University of Ukraine  
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України  
Представництво Польської академії наук у м. Києві, Україна  
Державний університет «Люблінська політехніка», Польща  
Державний університет «Гданська політехніка», Польща.  
Університет прикладних наук міста Гоф, Німеччина

Матеріали ІХ Міжнародної  
науково-практичної конференції

**ЧИСТА ВОДА.  
ФУНДАМЕНТАЛЬНІ, ПРИКЛАДНІ ТА  
ПРОМИСЛОВІ АСПЕКТИ**

20-21 листопада 2025 р.,  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Київ-2025

УДК 628.1 (063)  
ББК 38.761я43  
Ч68

**Укладачі, дизайн та верстка:**

Жукова В., Колтишева Д.

**Editors, design and layout:**

Zhukova V., Koltysheva D.

Ч68 **Чиста вода.** Фундаментальні, прикладні та промислові аспекти (20-21 листопада 2025 р., м. Київ): матер. ІХ Міжнар. наук.-практ. конф./ Уклад. Жукова В., Колтишева Д. – 2025. – 152 с.

**Pure water.** Fundamental, applied and industrial aspects (20-21 November 2025, Kyiv): proceedings of the IX International Scientific and Technical Conference / Editors: Zhukova V., Koltysheva D. – 2025.– 152 p.

Уміщено матеріали конференції, в яких висвітлено питання технологій підготовки питної та технічної води; технічні аспекти водопостачання; біологічні та біохімічні аспекти очищення господарсько-побутових та промислових стічних вод; утилізації осадів та активного мулу; моніторингу та прогнозування стану природних водойм в умовах інтенсивного водоспоживання.

The collection of proceedings of the conference includes question on technologies for treatment of drinking and process water; technical aspects of water supply; biological and biochemical aspects of municipal and industrial wastewater treatment; disposal of sludge; monitoring and forecasting of natural water in conditions of intense water use.

УДК 628.1 (063)  
ББК 38.761я43

© Усі права авторів застережені, 2025

## ОРГАНІЗАТОРИ КОНФЕРЕНЦІЇ

- Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України
- Представництво Польської академії наук у м. Києві, Україна
- Державний університет «Люблінська політехніка», Республіка Польща
- Державний університет «Гданська політехніка», Республіка Польща.
- Університет прикладних наук міста Гоф, Німеччина

## ТЕМАТИКА КОНФЕРЕНЦІЇ

- Технології очищення природних вод. Технічні аспекти водопостачання.
- Моніторинг та прогнозування стану природних водойм в умовах інтенсивного водоспоживання.
- Технології очищення стічних вод, знешкодження осадів. Біологічні та біохімічні аспекти. Технічні аспекти водовідведення.
- Водопостачання та водовідведення в умовах військової агресії. Відновлення пошкоджених об'єктів водопостачання та водовідведення.
- Отримання з відходів енергії та енергоносіїв.

## НАУКОВИЙ КОМІТЕТ

### Голова:

**д.т.н., проф. Саблій Л.А.** – професор кафедри біоенергетики, біоінформатики та екобіотехнології факультету біотехнології і біотехніки КПІ ім. Ігоря Сікорського.

### Члени наукового комітету:

**д.с-г.н., проф. Бегановський А.** – завідувач відділу біогеохімії природного середовища Інституту агрофізики імені Богдана Добжанського Польської академії наук, Республіка Польща;

**д.т.н., проф. Павловська М.** – завідувач кафедри перетворення біомаси та відходів на біопаливо, факультету екологічної інженерії Державного університету «Люблінська політехніка», Республіка Польща;

**д.т.н., проф. Макінія Д.** - завідувач кафедри санітарної інженерії факультету цивільної інженерії та інженерії довкілля Державного університету «Гданська політехніка», Республіка Польща;

**д.т.н., проф. Ковальський Д.** – професор кафедри водопостачання і водовідведення факультету екологічної інженерії Державного університету «Люблінська політехніка», Республіка Польща;

**д.т.н., проф. Лагуд Г.** – професор кафедри водопостачання та водовідведення факультету екологічної інженерії Державного університету «Люблінська політехніка», Республіка Польща;

**д.т.н., проф. Відомський М.К.** – професор кафедри водопостачання та водовідведення факультету екологічної інженерії Державного університету «Люблінська політехніка», Республіка Польща;

**д.т.н., проф. Забковська-Вацлавек М.** – член Європейської академії наук і мистецтв (EASA), Республіка Польща;

**д.т.н., проф. Райфур М.** – професор кафедри екологічної інженерії Опольського університету, Республіка Польща;

**проф. Мюллер-Чиган Г.** – професор, директор Інституту сталого водокористування Університету прикладних наук міста Гоф, Німеччина;

**к.т.н. Древновський Я.** – професор кафедри санітарної інженерії факультету цивільної інженерії та інженерії довкілля Державного університету «Гданська політехніка», Республіка Польща;

**к.т.н., Яромін-Глень К.** – асистент відділу біогеохімії природного середовища Інституту агрофізики імені Богдана Добжанського Польської академії наук, Республіка Польща;

**Бялас М.** – директор Представництва Польської академії наук у Києві, Україна;

**д.т.н., проф. Ободович О.М.** – завідувач відділу тепломасообміну в дисперсних системах Інституту технічної теплофізики НАН України;

**д.т.н., проф. Тодосійчук Т.С.** – декан факультету біотехнології і біотехніки КПІ ім. Ігоря Сікорського;

**д.т.н., доц. Голуб Н.Б.** – завідувач кафедри біоенергетики, біоінформатики та екобіотехнології факультету біотехнології і біотехніки КПІ ім. Ігоря Сікорського;

**д.т.н., проф. Гомеля М.Д.** – професор кафедри екології та технології рослинних полімерів факультету автоматизації, промислової інженерії та екології КПІ ім. Ігоря Сікорського;

**д.т.н., проф. Хоружий В.П.** – завідувач кафедри водопостачання та водовідведення Київського національного університету будівництва і архітектури;

**д.т.н., проф. Мальований М.С.** – завідувач кафедри екології та збалансованого природокористування Інституту сталого розвитку ім. В'ячеслава Чорновола Національного університету «Львівська політехніка»;

**д.т.н., проф. Юрченко В.О.** – професор кафедри інженерної екології Харківського національного університету міського господарства ім. О.М. Бекетова;

**д.т.н., проф. Мітченко Т.Є.** – керівник Центру сучасних водних технологій, професор кафедри ТНР, В та ЗХТ, КПІ ім. Ігоря Сікорського;

**д.т.н., доц. Кононцев С.В.** – професор кафедри водних біоресурсів Національного університету водного господарства та природокористування;

**д. с.-г. н. Бунчак О.М.** – радник директора з питань екології ТзОВ «Світ шкіри»;

**к.т.н., доц. Козар М.Ю.** – доцент кафедри біоенергетики, біоінформатики та екобіотехнології факультету біотехнології і біотехніки КПІ ім. Ігоря Сікорського;

**к.т.н., доц. Жукова В.С.** – доцент кафедри біоенергетики, біоінформатики та екобіотехнології факультету біотехнології і біотехніки КПІ ім. Ігоря Сікорського.

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”  
Representative office of Polish Academy of Sciences in Kyiv, Ukraine  
Institute of Engineering Thermophysics National Academy of Sciences of Ukraine  
Lublin University of Technology, Poland  
Gdansk University of Technology, Poland  
Hof University of Applied Sciences, Germany

Proceedings of the IX International  
Scientific and Technical Conference

**PURE WATER. FUNDAMENTAL,  
APPLIED AND INDUSTRIAL ASPECTS**

20-21 November 2025  
National Technical University of Ukraine  
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

## THE CONFERENCE IS ORGANIZED BY:

- National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
- Representative office of Polish Academy of Sciences in Kyiv, Ukraine
- Institute of Engineering Thermophysics National Academy of Sciences of Ukraine
- Lublin University of Technology, Poland
- Gdansk University of Technology, Poland
- Hof University of Applied Sciences, Germany

## TOPICS OF THE CONFERENCE

- Natural water purification technologies. Technical aspects of water supply.
- Monitoring and forecasting of the state of natural reservoirs in conditions of intensive water consumption.
- Wastewater treatment technologies, sediment disposal. Biological and biochemical aspects. Technical aspects of water disposal.
- Water supply and water disposal in conditions of military aggression. Restoration of damaged water supply and disposal facilities.
- Production of energy and energy sources from waste.

## SCIENTIFIC COMMITTEE

### Head of Scientific Committee:

**D.Sc, Professor L. Sablii** – Professor at the Department of Bioenergy, Bioinformatics and Environmental biotechnology Faculty of Biotechnology and Biotechnics, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute;

### Members of Scientific Committee:

**Professor Doctor hab. A. Bieganski** – Head of the Department of Natural Environment Biogeochemistry of Bohdan Dobrzański Institute of Agrophysics of the Polish Academy of Sciences, Poland;

**Professor Doctor hab. M. Pawlowska** – Head of the Department of Biomass and Waste Conversion into Biofuels, Faculty of Environmental Engineering, Lublin University of Technology, Poland;

**Professor Doctor hab. eng. J. Małkinia** - Head of the Department of Sanitary Engineering, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Gdańsk University of Technology, Poland;

**Professor PL Doctor hab. eng. D. Kowalski** – Professor at the Department of Water Supply and Wastewater Disposal, Faculty of Environmental Engineering, Lublin University of Technology, Poland;

**Professor PL Doctor hab. eng. G. Łagód** – Professor at the Department of Water Supply and Wastewater Disposal, Faculty of Environmental Engineering, Lublin University of Technology, Poland;

**Professor PL Doctor hab. eng. M. K. Widomski** – Professor at the Department of Water Supply and Wastewater Disposal, Faculty of Environmental Engineering, Lublin University of Technology, Poland;

**Professor Doctor hab. eng. M. Ząbkowska-Waławek** – Member of the European Academy of Sciences and Arts, Poland;

**Professor UO Doctor hab. M. Rajfur** – Professor at the Department of Environmental Engineering, Opole University, Poland;

**Professor G. Müller-Czygan** – Professor, Head of the Institute for Sustainable Water Use, Hof University of Applied Sciences, Germany;

**Professor PG Doctor hab. eng. J. Drewnowski** – Professor at the Department of Sanitary Engineering, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Gdansk University of Technology, Poland;

**Doctor eng. K. Jaromin-Gleń** – Assistant Professor Department of Natural Environment Biogeochemistry of Institute Bohdan Dobrzański Institute of Agrophysics of the Polish Academy of Sciences, Poland;

**M. Białas** – Director of the Representative office of Polish Academy of Sciences in Kyiv;

**D.Sc, Professor O. Obodovych** - Head of the department of heat and mass transfer in dispersion systems of the Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine;

**D.Sc, Professor T. Todosiychuk** - Dean of the Faculty Biotechnology and Biotechnics, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute;

**D.Sc, Professor N. Golub** - Head of the Department of Bioenergy, Bioinformatics and Environmental biotechnology of the Faculty of Biotechnology and Biotechnics, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute;

**D.Sc, Professor M. Gomelya** - Professor of the Department of Ecology and Technology of Plant Polymers, Faculty of Automation, Industrial Engineering and Ecology, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute;

**D.Sc, Professor V. Khoruzhiy** – Head of the department of water supply and drainage, Kyiv National University of Civil Engineering and Architecture;

**D.Sc, Professor M. Malovanyy** – Head of the Department of Ecology and Balanced Nature Management of the Vyacheslava Chornovola Institute of Sustainable Development, Lviv Polytechnic National University;

**D.Sc, Professor V. Yurchenko** – Professor of the Department of Engineering Ecology, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv;

**D.Sc, Professor T. Mitchenko** – Head of the Center for Modern Water Technologies, professor Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute;

**D.Sc, Associate Professor S. Konontsev** – Professor of the Department of Water Bioresources, National University of Water Management and Nature Management;

**D.Sc O. Bunchak** – adviser to the director on environmental issues, World of Leather" Ltd;

**Ph.D., Associate Professor M. Kozar** - Associate Professor of Bioenergy, Bioinformatics and Environmental biotechnology, Faculty of Biotechnology and Biotechnology, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute.

**Ph.D., Associate Professor V. Zhukova** - Associate Professor of Bioenergy, Bioinformatics and Environmental biotechnology, Faculty of Biotechnology and Biotechnology, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute.

## 3MICT

<b>Acosta-Carrascal, J. P., Schmidt, M, Mueller-Czygan, G.</b> Retention of fine particles in combined sewer overflows using intelliscreen technology: experimental results and practical implications .....	13
<b>Wolfram A., Mehling S., Schnabel T., Kurzweil P</b> Electrochemical measurement of COD/TOC using a photocatalytic cell .....	16
<b>Bondarchuk O., Shakhnovsky A., Spasonova L., Mokiienko A.</b> Forecasting the formation of by-products during the treatment of natural water with chlorine dioxide .....	19
<b>Dmytrukha N., Andrusyshyna I., Kozlov K., Hryhorenko N., Lehkostup L.</b> Use of activated carbon from sugar sorghum as a sorbent for water purification from heavy metals .....	22
<b>Futa B., Gmitrowicz-Iwan J., Myszura-Dymek M.</b> Changes in nitrogen and phosphorus contents in the waters of lake Piaseczno as indicators of anthropopressure on the aquatic environment.....	24
<b>Gmitrowicz-Iwan J., Futa B., Myszura-Dymek M.</b> From factory to river: tracking pollution pathways in the vistula valley .....	25
<b>Goncharova I., Halysh V., Sevastyanova O., Guichaoua D., Sahraoui B.</b> Advanced technologies for water quality monitoring and purification from heavy metal ions .....	26
<b>Iungin O., Maistrenko L., Pokholenko I., Okhmat O., Mokrousova O.</b> Utilizing leather production residues to develop functional collagen gels for biomedical applications.....	29
<b>Jamka K., Kozłowska A., Raszewski G., Łagód G.</b> Integrated assessment of microbiological water safety using fish technique and automated image analysis based on deep learning .....	30
<b>Jaromin-Gleń K., Polakowski C., Pilat-Rózek M., Bieganowski A.</b> Municipal WWTP seen through the prism of the IRMS method .....	32
<b>Kalinichenko O., Morin V., Okhmat O., Iungin O.</b> Biopolymers synthesized by Antarctic plant-associated bacteria for chemical technology.....	33
<b>Klestova Z.</b> The implementation of innovative virology solutions is key to the conservation of water animal biodiversity.....	34
<b>Lebiocka M., Szaja A., Montusiewicz A., Kolodiaznyi V.</b> Anaerobic co-digestion of sewage sludge and herbal waste in the presence of a zeolite .....	36
<b>Marjanowski J., Drewnowski J.</b> The mechanism and prevention in corrosion protection for selected systems and devices made of austenitic stainless steel.....	38

<b>Mueller-Czygan G., Tarasyuk V.</b> Balancing inflow volumes and loads to the sewage treatment plant through dynamic sewer network management.....	39
<b>Mueller-Czygan G., Zhukova N.</b> Strategy for applying BESS and CAES energy storage systems in SBR wastewater treatment processes .....	42
<b>Myszura-Dymek M., Gmitrowicz-Iwan J., Futa B., Kamińska I.</b> Modern methods of sewage sludge disposal in the context of water resource protection.....	46
<b>Pokovba Y., Tverdokhlib M.</b> Drinking water disinfection: a review of modern methods ....	47
<b>Smyk N., Sevastyanova O.</b> Lignin-derived sorbents for the removal of contaminants from water .....	49
<b>Spataru P.</b> Study on the separation of surface-active agents in the aquatic environment .....	50
<b>Spataru P., Visnevschi A., Spinu O., Povar I.</b> Sustainable low energy treatment of municipal sludge through mesothermophilic aerobic anaerobic processing.....	52
<b>Szaja A., Bartkowska I.</b> Optimisation of a microwave pretreatment of orange wastes for improving biodegradability .....	54
<b>Wojtaś E., Kujawska J., Łagód G.</b> Pollution of stormwater from urban areas: research, monitoring, and new measurement methods.....	55
<b>Zhukova V.</b> Application of immobilized microorganisms for restoration of biological wastewater treatment.....	56
<b>Бабій Д., Саблій Л.</b> Порівняння фізико-хімічних методів очистки стічних вод молокопереробних підприємств .....	58
<b>Борцюх В., Голуб Н.</b> Використання <i>chlorella vulgaris</i> для очищення стічних вод відходів харчової промисловості шляхом акумуляції біомолекул.....	61
<b>Головков А. М., Столярова І.В., Вакуленко В.Ф.</b> Оцінка токсичності для <i>Daphnia magna</i> реакційних сумішей після фотохімічного та фотокаталітичного окиснення водних розчинів стрептоциду різними окисниками .....	63
<b>Гомеля М.Д., Крижановська Я.П., Пляцук Я.М.</b> Технології очищення мінералізованих вод з отриманням конкурентноспроможних реагентів .....	67
<b>Гриневич А.О., Саблій Л.А.</b> Проблеми використання іммобілізованих мікроорганізмів у біологічному очищенні стічних вод.....	69
<b>Грицина О.О.</b> Прикладні методи моніторингу та автоматичного керування біопроцесами для забезпечення стабільності й якості .....	72
<b>Дерменжи В., Гомеля М.</b> Оцінка ефективності очищення води від іонів заліза та марганцю з використанням магнетиту.....	75

<b>Дубовенко В.Ю., Саблій Л.А.</b> Сучасні технології біологічного очищення стічних вод підприємств м'ясопереробної галузі .....	78
<b>Дульнева Т.Ю., Деремешко Л.А.</b> Визначення механізму осадоутворення на керамічній мікрофільтраційній мембрані .....	82
<b>Єлатонцев Д.О.</b> Перспективи використання супутньо-пластових вод для задоволення потреб України у критичній сировині .....	85
<b>Жданюк Н.В.</b> Розробка технології утилізації сорбентів на основі модифікованого палигорськіту, що містять іони Cr (VI) та Co (II) .....	87
<b>Заєць А. В., Андрєєва О. А.</b> Дослідження та удосконалення методів Очищення стічних вод шкіряних заводів .....	90
<b>Іванченко А.В., Воронов В.В.</b> Адсорбційне вилучення фосфору зі стічних вод та утилізація осадів у добрива .....	92
<b>Кізеєв М.Д., Проценко С.Б., Новицька О.С., Кравченко Н.В.</b> Сучасні технології виробництва біогазу з осадів стічних вод та органічних відходів на каналізаційних очисних спорудах.....	93
<b>Ковальова С.О.</b> Вплив магнію та мангану освітлення на ріст і метаболізм мікрододорості <i>Chlorella vulgaris</i> .....	96
<b>Колтишева Д.С., Щурська К.О.</b> Речовини кворуму (quorum sensing та quorum quenching) в біотехнологіях очищення стічних вод.....	99
<b>Кравчук О.А., Кравчук А.М.</b> Методика розрахунку ступеня перфорації бічних стінок збірних дренажних трубопроводів.....	103
<b>Майборода Х.А.</b> Біотехнологічні підходи до очищення та рециркуляції води в аквапонічній системі.....	105
<b>Марчук О.О., Фарбун І.А., Григоренко Н.О., Кравченко М.В., Ковальчук І.А., Романова І.В.</b> Природні та композитні сорбенти для очищення природних вод від іонів важких металів з метою збереження їх екологічної безпечності та лікувальної цінності.....	107
<b>Матвій Т.І., Знак З.О.</b> Отримання сорбенту на основі природного клиноптилоліту, модифікованого частинками Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> для очищення природних і стічних вод .....	108
<b>Мацьків М.Я., Знак З.О.</b> Модифікування клиноптилоліту міді оксидом як каталізатором для очищення природних і стічних вод .....	109
<b>Мельник Л.О., Хмельницька О.В., Семінська О.О., Балакіна М.М.</b> Комбінування нанофільтраційної обробки з передовими окислювальними процесами для підвищення ефективності очищення води від фармацевтичних препаратів.....	111

<b>Мокієнко А.В.</b> Іноваційні водні технології як запорука відновлення водної галузі країни.....	114
<b>Мороз О.М., Знак З.О., Мних Р.В.</b> Дослідження взаємодії кальцію гідроксиду з алюмінію сульфатом для отримання алюмінієвих коагулянтів у кавітаційних полях ...	116
<b>Мосійчук А.Б., Мосійчук Я.Б.</b> Інтеграція коагуляції та аеробної стабілізації осадів стічних вод для інтенсифікації їх зневоднення .....	117
<b>Нижник Т. Ю., Стрікаленко Т. В.</b> Водозабезпечення: сучасний етап та очевидні перспективи .....	120
<b>Саблій Л.А., Ободович О.М., Сидоренко В.В.</b> Сучасні підходи та наряди розвитку виробництва етанолу з рослинної сировини .....	122
<b>Саблій Л.А.</b> Проблеми очищення стічних вод і шляхи їх вирішення.....	123
<b>Саблій Л.А., Ободович О.М.</b> Технологія знезалізнення підземних вод із використанням роторно-пульсаційного апарата .....	126
<b>Самченко К. Ю., Саблій Л. А.</b> Шляхи використання шкаралупи волоського горіха для створення ефективних біoadсорбентів у водоочищенні.....	127
<b>Семінська О.О., Балакіна М.М.</b> Вплив рН середовища на ефективність інтеграційного процесу коагуляція-ультрафільтрація при очищенні води р. Дніпро.....	130
<b>Столярова І.В., Вакуленко В.Ф.</b> Порівняння ефективності деструкції стрептоциду вдосконаленими процесами окиснення за участю пероксиду водню і персульфату натрію .....	131
<b>Стрікаленко Т. В., Нижник Т. Ю., Маглевана Т. В.</b> Спа-готелі: апробація інноваційної технології оброблення води .....	135
<b>Туркот К. В., Мокроусова О. Р.</b> Біоекономічні перспективи використання відходів шкіряної галузі.....	138
<b>Швадчина Ю.О., Вакуленко В.Ф.</b> Фотохімічна та фотокаталітична деструкція парацетамолу у воді різними окисниками під дією уф-видимого світла .....	141
<b>Шварц Р.Р.</b> Низьковартісні річкові пастки та кошики-вловлювачі з перероблених матеріалів: дизайн, монтаж, ефект .....	144
<b>Щербатюк Т.Г., Хоменко В.Г., Зубакін С.М., Мокроусова О.Р.</b> Вплив озонування води на вміст вуглекислого газу та розчиненого кисню .....	147
<b>Юрченко В.О., Авдієнко І.А., Мельнікова О.Г.</b> Утворення парникових газів при очистці стічних вод на міських очисній спорудах каналізації та скиді в природні водойми .....	148

# RETENTION OF FINE PARTICLES IN COMBINED SEWER OVERFLOWS USING INTELLISCREEN TECHNOLOGY: EXPERIMENTAL RESULTS AND PRACTICAL IMPLICATIONS

*Acosta-Carrascal, J. P., Schmidt, M, Mueller-Czygan, G.*

*Institute for sustainable water systems, University Hof, Hof, Germany*

*E-Mail: [paola.acosta.carrascal@hof-university.de](mailto:paola.acosta.carrascal@hof-university.de), [michael.schmidt.4@hof-university.de](mailto:michael.schmidt.4@hof-university.de), [guenter.mueller-czygan@hof-university.de](mailto:guenter.mueller-czygan@hof-university.de)*

## Introduction

Efficient wastewater treatment remains a central challenge in environmental engineering and sustainable water management. In many urban areas, combined sewer systems collect domestic, industrial, and stormwater in a single network. During heavy rainfall, hydraulic overloading often leads to combined sewer overflows (CSOs), releasing directly into receiving waters untreated or partially treated wastewater, when the wastewater treatment plant (WWTP) has systems for that such as screens or sedimentation pods. These discharges introduce suspended solids, organic compounds, nutrients, and micropollutants, which significantly impair water quality [1–3]. Filtrable solids (AFS63 0.45  $\mu\text{m}$  – 63 $\mu\text{m}$ ) pose a particular challenge here, as heavy metals and organic pollutants mainly accumulate on them.

Developing reliable and adaptable treatment methods for the dynamic conditions of the combined sewer system is essential, due to the rapid fluctuations in flow rate, pollutant concentration and particle composition during rainfall events. Although conventional mechanical treatment technologies, including coarse screens, sedimentation tanks, and sand filters, are effective for large and settleable particles, they are frequently inadequate for fine particles and micropollutants [4, 5]. Thus, there is a growing need for advanced pre-treatment systems at discharge points in sewer systems that maintain high separation efficiency ( $\geq 70$ – $90\%$  for particles  $< 1$  mm) under variable hydraulic (e.g., sudden increases in flow velocity and water level) and load conditions (e.g., variations in solid concentration, organic content, and particle size distribution).

Mechanical pre-treatment is a key stage in WWTPs, as it protects downstream biological and chemical processes from excessive solids and hydraulic overloads. The screening process is crucial for the prevention of clogging and operational disturbances by removing coarse and fine particles. In WWTPs, screens are usually vertically arranged at the plant inlet, whereas in combined sewer systems, horizontal step screens (HSR) are installed at overflow structures to retain solids before discharge into receiving waters. Conventional HSRs typically operate at a fixed cleaning speed, meaning that the raking mechanism moves at a constant rate and interval, regardless of the actual hydraulic and solids load. As a result, these systems cannot adapt to rapidly changing hydraulic or pollution conditions during storm events.

The IntelliScreen technology, developed by HST Systemtechnik GmbH, represents an innovative, smart variant of the HSR. Since it addresses the above limitations through adaptive control: instead of operating at a constant speed, IntelliScreen continuously adjusts its cleaning frequency and screen movement based on real-time measurements of water level, flow, and head loss. This works as follows: instead of fixed-speed operation, IntelliScreen continuously adjusts cleaning frequency and screen motion based on real-time measurements of water level, flow, and head loss. This enables the controlled formation of a filter cake, a thin layer of retained solids that enhances fine particle retention. This layer acts as a secondary fine filter, significantly improving the retention of small particles that would otherwise pass through. By controlling the filter cake's thickness and cleaning intervals, the system maintains hydraulic stability while achieving enhanced fine particle separation under dynamic inflow conditions.

Recent advances in automation and digital monitoring have enabled the implementation of such intelligent systems. Yet, little experimental evidence exists on their particle retention efficiency and impact on wastewater quality under real operational conditions.

This study aimed to fill that gap by comparing the performance of an IntelliScreen and a conventional HSR screen at the Hof WWTP (Germany). The evaluation focuses on particle retention, changes in COD and turbidity, and the hydraulic behavior associated with the filter cake formation. In particular, the flow rate reduction caused by the developing filter cake was monitored, as this effect is directly linked to the reduction of flow going through, which means also an improved pollutant retention. Overall, the results contribute to a better understanding and optimization of adaptive screening technologies for municipal wastewater treatment.

## **Materials and Methods**

### **Experimental Setup**

The experiments were conducted at the Hof wastewater treatment plant (WWTP) in Bavaria, Germany, a facility with a capacity of approx. 230.000 PE, using a specially designed container-based test facility installed upstream of the inlet channel. For comparative testing under the same hydraulic and wastewater conditions, the system includes both operation mode: conventional with constant cleaning speed and the innovative IntelliScreen unit, that varies the cleaning speed and formed a filter cake layer. A regulating valve system was integrated downstream to allow partial throttling of the outflow. By slightly restricting the discharge, the water level upstream of the screen increases, leading to a higher hydraulic head difference across the screen surface. This promotes the deposition and accumulation of suspended particles on the screen bars, thereby facilitating the controlled formation of the filter cake required for evaluating the IntelliScreen's adaptive performance.

Influent water was taken out of the channel and pumped through an inlet pipe with flow measurement, allowing adjustment of flow rate and water level. Sensors continuously measured flow (m<sup>3</sup>/h), water level (m), turbidity (NTU), conductivity (μS/cm), pH, and nitrate concentration (mg/L).

## **Results**

The gradual formation of a filter cake increased the head loss across the screen, which was automatically compensated by adaptive cleaning control. Once established, the filter cake enhanced fine particle retention but slightly reduced hydraulic capacity. As excessive build-up, turbulence at the screen surface increased, occasionally disturbing stable cake formation. These observations indicate that maintaining an optimal hydraulic balance is essential for efficient and continuous IntelliScreen operation.

The experiments confirmed that IntelliScreen can reliably generate a stable filter matrix on the screen bars, which acts as a dynamic filtration layer. Two main retention mechanisms were identified:

1. Hydraulic retention effect – The longer the filter matrix remains on the screen surface, the denser it becomes. This increased density leads to a significant reduction in flow capacity, directing a higher proportion of polluted combined wastewater toward the WWTP rather than discharging it untreated through stormwater overflows.
2. Particle retention effect – Depending on the structure and porosity of the filter matrix, several grab samples showed a significant increase in retention efficiency for particles smaller than 4 mm. These fine particles, which typically bypass conventional screening systems, were effectively captured within the matrix.

The results demonstrate that IntelliScreen contributes significantly to reducing particle discharge, including fine solids and potential microplastic fractions, into surface waters. By

maintaining adaptive control over the filter matrix and optimizing screen cleaning intervals, the technology supports current water management objectives for mitigating pollution from combined sewer overflows.

Further investigations are planned to validate these findings under extended operational conditions and to develop specific control strategies for balancing hydraulic performance and particle retention.

## Discussion

The potential of adaptive screening technologies, such as IntelliScreen, to improve mechanical pre-treatment in municipal wastewater systems is demonstrated by the results of the initial experimental series. In particular, the reliable formation and control of a filter matrix represent a decisive improvement over conventional fixed-speed screen.

The experiments indicated that adaptive control of screen cleaning intervals allows the formation of a stable filter layer without compromising hydraulic safety. Even though increased matrix density enhances fine particle retention, it also increases head loss, which is a critical equilibrium. The IntelliScreen system effectively balanced this trade-off by adjusting the cleaning frequency in real-time, thereby preserving hydraulic functionality and operational stability.

Such adaptive operation directly addresses one of the main limitations of conventional screens, which operate at a constant speed independent of flow and load conditions [5]. The ability to modulate cleaning based on head loss and level measurements minimizes both energy consumption and overflow risk.

The observed retention of particles <4 mm confirms previous observations by Müller-Czygan and Stolz [6, 7], who reported that filter cake formation can significantly increase particle separation efficiency. The filter matrix acts as a secondary filtration barrier, enhancing the removal of suspended solids and particulate COD beyond the geometric limit of the screen openings.

## Conclusion

The IntelliScreen technology at the Hof WWTP was shown to facilitate the formation of a filter matrix, thereby significantly improving the mechanical pretreatment of wastewater overflow before entering WWTP, as evidenced by the aforementioned experiments. By decreasing flow, IntelliScreen was able to retain more particles and particulate COD in the receiving water body when compared to traditional fixed-speed screens.

The results confirm that filter matrix development plays a dual role (1) Hydraulic retention, by reducing overflow discharge during high inflow events, and (2) Particle filtration, by improving solid and organic matter separation efficiency during normal operation.

Overall, the research substantiates the assertion that IntelliScreen represents a substantial advancement in the field of digitalized wastewater treatment by integrating process automation and adaptive mechanics. This technology directly impacts the sustainable management of urban water systems by enhancing particle retention and minimizing pollutant discharge during combined sewer overflows.

## Acknowledgements

The authors would like to express their sincere gratitude to the project partners HST Systemtechnik GmbH, Wilo SE, Endress + Hauser and the Hof Wastewater Treatment Plant (WWTP) for their valuable technical collaboration, on-site support, and access to operational facilities during the experimental campaign.

This research was financially supported by the Oberfranken Stiftung and Hof University, whose contribution made the realization of the study possible. The authors also gratefully

acknowledge the Wilo SE for the generous donation of one pump system and HST for the donation of the screens used in the experimental setup.

## References

- [1] J. Xi *et al.*, "Enhanced nutrient removal from stormwater runoff by a compact on-site treatment system," *Chemosphere*, early access. doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.133314.
- [2] H. J. Kim, J.-W. Choi, T.-H. Kim, J.-S. Park, and B. An, "Effect of TSS Removal from Stormwater by Mixed Media Column on T-N, T-P, and Organic Material Removal," *Water*, vol. 10, no. 8, p. 1069, 2018, doi: 10.3390/w10081069.
- [3] A. R. Bakr, G. Y. Fu, and D. Hedeem, "Water quality impacts of bridge stormwater runoff from scupper drains on receiving waters: A review," *The Science of the total environment*, early access. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138068.
- [4] K. Cederkvist, M. B. Jensen, and P. E. Holm, "Method for assessment of stormwater treatment facilities - Synthetic road runoff addition including micro-pollutants and tracer," *Journal of environmental management*, early access. doi: 10.1016/j.jenvman.2017.04.097.
- [5] EPA, "Stormwater Technology Fact Sheet: Stormwater Treatment," 1999.
- [6] G. Müller-Czygan and A. Stolz, "Digitalisierung von Entlastungsschwellen," *AutomationBlue*, vol. 1, pp. 45–48, 2018.
- [7] G. Müller-Czygan, "Smart Water—How to Master the Future Challenges of Water Management," in *Resources of Water*, P. Thanjavur Chandrasekaran, M. Salik Javaid, and A. Sadiq, Eds., IntechOpen, 2021.

## ELECTROCHEMICAL MEASUREMENT OF COD/TOC USING A PHOTOCATALYTIC CELL

*Axel Wolfram<sup>1</sup>, Dr.-Ing. Simon Mehling<sup>1</sup>*

*Prof. Dr.-Ing. Tobias Schnabel<sup>1</sup>, Prof. Dr. Peter Kurzweil<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>University of applied Sciences Hof, Germany, <sup>2</sup>OTH Amberg-Weiden  
axel.wolfram@hof-university.de*

### 1. Introduction

Reliable monitoring of organic load is essential for the efficient operation and design of wastewater treatment processes. In particular, the Chemical Oxygen Demand (COD) and the Total Organic Carbon (TOC) are key parameters that determine the sizing of waste water treatment plants and the required oxygen supply. Since aeration units account for a major portion of the total energy consumption, a rapid and reliable determination of organic carbon is crucial for optimizing process control and energy efficiency.

In Germany, COD analysis is standardized according to DIN 38409-41 and DIN ISO 15705, both relying on wet-chemical oxidation of organic pollutants with potassium dichromate. Although these methods are robust and well established, they require toxic reagents, extensive sample preparation, and provide results only after several hours. Consequently, they are poorly suited for continuous monitoring or process automation.

To overcome these limitations, alternative electrochemical and photocatalytic approaches have been investigated in recent years, aiming at reagent-free, real-time determination of organic carbon. The present study explores a novel concept based on the electron-Doppler effect in

electrochemical reactions at photoactive semiconductors such as titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>). When TiO<sub>2</sub> is irradiated with ultraviolet light, electron–hole pairs are generated, which initiate the formation of reactive oxygen species (primarily hydroxyl radicals). These species oxidize organic compounds within the aqueous matrix, releasing additional electrons that are collected as a measurable photocurrent.



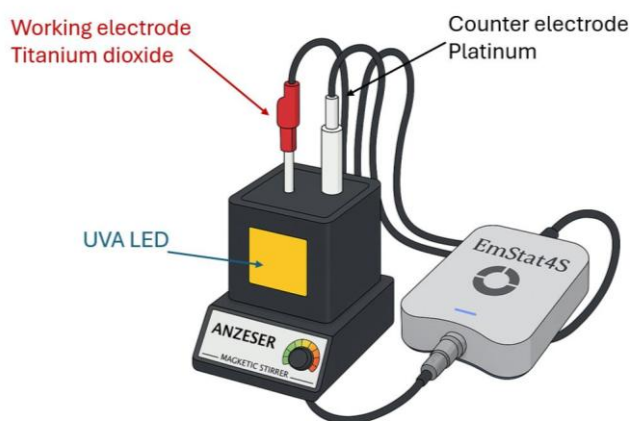
The magnitude of this photocurrent is proportional to the concentration of oxidizable organic matter and can therefore serve as a direct indicator of COD or TOC. This work presents the design and validation of a prototype photocatalytic fuel cell sensor capable of quantifying organic carbon in aqueous samples with high sensitivity and without the need for chemical reagents.

## 2. Materials and methods

### a. Experimental setup

A batch reactor (Figure 1) was designed and fabricated using 3D printing. The reactor contains a rectangular cuvette with borosilicate glass windows. Inside the cuvette, a three-electrode configuration is implemented, consisting of a working electrode (a titanium dioxide photo-semiconductor), a platinum counter electrode, and an Ag|AgCl reference electrode, all connected to a PalmSens 4S potentiostat.

The photo-semiconducting TiO<sub>2</sub> layer was prepared via a sol–gel route of titaniumisopropoxid with additional P25 TiO<sub>2</sub> nanoparticles (Evonik®). The suspension was applied onto an FTO glass substrate by dip-coating and subsequently calcined at 300°C. The titanium dioxide catalyst is irradiated through the glass window by a UVA LED (1 W, Seoul CUN66A1F).



*Figure 1: Scheme of the experimental Set-Up*

### b. Experimental procedure

The cuvette was filled with 60 mL of an electrolyte solution containing 100 mmol/L Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. The UVA LED was then switched on, and chronoamperometric measurements were started at an applied potential of 1.5 V. Every 200 seconds, organic stock solutions were incrementally added to the system, and the corresponding change in photocurrent was recorded.

## 3. Results and discussion

The obtained data clearly show a linear correlation between photocurrent and COD concentration within the investigated range of 0 to 35 mg/L (Figure 2). Depending on the organic compound, the slope of the photocurrent increase varies: Potassium hydrogen phthalate (KHP) exhibited the highest sensitivity ( $\Delta I/\Delta\text{COD} = 8.104 \mu\text{A mg}^{-1} \text{L}$ ), while tryptophan showed the

lowest slope (4.665). These differences can be attributed to variations in adsorption behavior and the possible formation of intermediate reaction products on the catalyst surface.

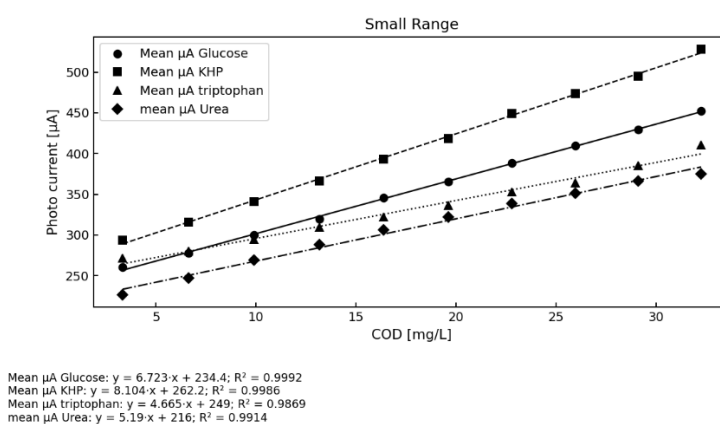


Figure 2: Photo current vs. the chemical oxygen demand (COD) for a small range (0 – 35 mg/L)

As the organic concentration increases, all photocurrent curves tend to reach a plateau (Figure 3). This saturation behavior appears to converge toward a similar photocurrent value of approximately 850 µA for all investigated compounds, indicating a catalyst-specific limitation of charge carrier generation or surface reaction capacity.

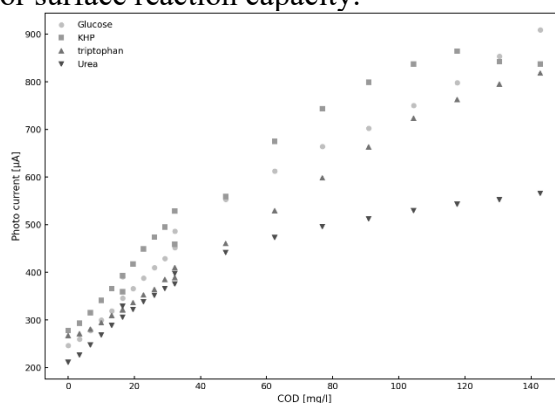


Figure 3: Photo currents of different organic compounds in the complete range of 0 to 140 mg/L

#### 4. Summary and outlook

The measurement system demonstrates high precision, with a detection capability in the nanoampere range, allowing detailed determination of COD, particularly at low concentrations. In upcoming experiments, the system will be tested with real wastewater matrices of varying concentrations. Further studies will address influencing factors such as conductivity, photocatalysis inhibitors, and long-term stability.

The reactor setup will be adapted into a continuous-flow configuration and miniaturized for improved applicability. In addition, different coating techniques and photo-semiconducting materials will be evaluated with the goal of referencing specific fractions of natural organic carbon within complex matrices.

## FORECASTING THE FORMATION OF BY-PRODUCTS DURING THE TREATMENT OF NATURAL WATER WITH CHLORINE DIOXIDE

*Oleksandr Bondarchuk<sup>1</sup>, Arcady Shakhnovsky<sup>1</sup>,  
Larysa Spasonova<sup>1</sup>, Andrii Mokiienko<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine.*

*<sup>2</sup>National University «Ostroh Academy», Ostroh, Ukraine*

*e-mail: [Bondarchukau@gmail.com](mailto:Bondarchukau@gmail.com)*

The water supply and wastewater management system of Ukraine is experiencing enormous strain and destruction as a result of the neighboring country's ongoing full-scale military aggression. Damage to critical water infrastructure, uncontrolled discharges, and the increasing risks of chemical and biological contamination of surface and groundwater pose an unprecedented threat to the sanitary and epidemiological safety of the population. Under these circumstances, the issue of effective and safe water treatment acquires strategic importance.

Traditional methods, including chlorination, although widely applied, exhibit significant limitations associated with the formation of disinfection by-products (DBPs). Moreover, the presence of substantial amounts of organic pollutants in source water, under conditions of technogenic and wartime stress, considerably reduces the sanitary and environmental efficiency of conventional technologies. Therefore, the implementation of alternative disinfection methods in the practice of Ukrainian water utilities (particularly the use of chlorine dioxide and sodium hypochlorite as substitutes for gaseous chlorine [1]) is of high relevance.

Chlorine dioxide is a powerful oxidizing and disinfecting agent that exhibits a number of critical advantages over molecular chlorine. This reagent effectively inactivates a wide spectrum of pathogenic microorganisms, shows lower dependence on the pH of the medium compared to chlorine, and does not participate in substitution reactions with organic precursors, which results in significantly lower formation of chlorinated organic DBPs. It efficiently oxidizes phenols, iron, manganese, and certain toxic anthropogenic organic compounds, while also helping to eliminate unpleasant odors and tastes caused by algae or phenolic substances.

The above-mentioned properties make chlorine dioxide a valuable reagent; however, the implementation of natural water disinfection systems based on this compound requires addressing several challenges. The main drawback of chlorine dioxide is the formation of undesirable by-products during water treatment. As a result of  $\text{ClO}_2$  reactions with organic and inorganic impurities during disinfection, as well as its partial decomposition, chlorites and chlorates are formed. These compounds are toxic to humans, and their concentrations are strictly regulated by both Ukrainian and European legislation [2, 3].

The present study reports the results of a systematic investigation aimed at finding a balance between achieving effective disinfection of natural water with varying levels of contamination and minimizing the formation of the aforementioned by-products.

In this context, water treatment facilities must not only assess the disinfection efficiency of new reagents but also minimize the generation of secondary by-products, addressing a complex set of engineering, environmental, and sanitary challenges.

The efficiency of disinfection and the intensity of chlorite and chlorate formation strongly depend on technological factors such as reagent dosage, contact time, water pH and temperature, as well as the degree of contamination (in particular, organic matter content). The control and minimization of chlorite formation are key tasks in the implementation of chlorine dioxide ( $\text{ClO}_2$ )-based technologies.

For effective management of water disinfection processes, a computer modeling approach can be applied, enabling the prediction of water quality and optimization of technological regimes. One possible implementation of this approach involves the use of empirical polynomial models.

Such models are developed based on experimental data and rely on mathematical statistics for parameter identification (that is, establishing quantitative relationships between independent process factors and target response variables).

The transition from processing data obtained through water purification monitoring [4], i.e., passive experimental data, to the use of empirical models and the RSM – Response Surface Methodology (which is based on active experimental design), – represents a logical next step in the research program, of which the present publication reports a part of the results. The authors' experience demonstrates the effectiveness of combining these two strategies [4]. Monitoring ensures continuous control of water quality, capturing trends, and allows the identification of the presence or absence of problems. The application of the response surface methodology makes it possible to assess the actual operating conditions of the technology, and identify problematic areas. The construction of experimental-statistical models involves systematic variation of technological factor values to study their influence on the final water quality.

The key factors of the mathematical model of chlorine dioxide–based water disinfection processes that determine the extent of by-product formation were selected as follows [5]:  $x_1$  as pH of the medium,  $x_2$  as water temperature,  $x_3$  as total chlorine dioxide dose,  $x_4$  as reaction time, and  $x_5$  as degree of water contamination (in this study assessed by the content of organic matter).

According to the objectives of the study, the following response variables for the treated water were selected: residual concentration of  $\text{ClO}_2$  ( $y_1$ ), and concentration of chlorites ( $y_2$ ).

In accordance with the Response Surface Methodology and employing a central composite nonlinear experimental design, an experimental matrix was developed to minimize the number of trials while maximizing the informativeness of the results. Laboratory/industrial studies were carried out for various combinations of the selected factors, each set at two levels (“low” and “high”). The response values ( $y_1$ ,  $y_2$ ) obtained from the experiments were subjected to regression analysis in order to determine the coefficients of empirical polynomial equations describing the dependence of the response variables  $y_1$  and  $y_2$  on the influencing factors:

$$y_u = b_0 + \sum b_i x_i + \sum b_{ii} x_i^2 + \sum b_{ij} x_i x_j + \varepsilon,$$

where  $y_u$  are responses ( $u = 1,2$ ),  $x_i$  are technological factors of the water treatment process ( $i = 1, \dots, 5$ ),  $b_i, b_{ij}$  are coefficients of the empirical model ( $i, j = 1, \dots, 5$ ),  $\varepsilon$  is the approximation error.

These empirical equations make it possible to quantitatively describe (and predict) the formation of disinfection by-products and the residual concentration of the disinfectant under any specified technological conditions.

A key instrument of the RSM is the construction and analysis of response surfaces (Fig. 1), which enabled the identification of critical factors (specifically, determining which parameters:  $x_3$ , the  $\text{ClO}_2$  dose, and  $x_5$ , the content of organic impurities, – exert the greatest influence on chlorite formation ( $y_2$ ). This approach also allows for both visual and computational determination of the combination of factors that ensures the minimum chlorite concentration ( $y_2$ ) while simultaneously achieving the required residual  $\text{ClO}_2$  concentration ( $y_1$ ) necessary to guarantee effective disinfection. Moreover, it allows prediction of the treated water quality under varying input parameters (for instance, with seasonal increases in temperature  $x_2$  or in the level of contamination  $x_5$ ).

The modeling-based systemic approach described above aligns with Ukraine's integration into the European scientific and technological framework and complies with EU standards for drinking water quality. It ensures the reliability and environmental safety of domestic water treatment facilities and supports compliance with stringent sanitary norms (particularly those concerning chlorite levels), which is especially critical under wartime risk conditions.

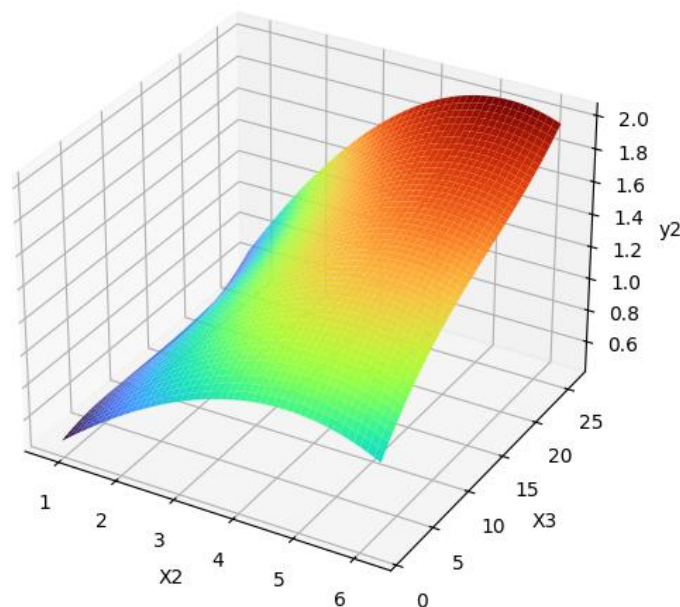


Fig. 1. Visualization of the technological response: chlorite formation ( $y_2$ ) depending on the factors  $x_2$  (reaction temperatures) and  $x_3$  (total dose of chlorine dioxide). The values of the factors  $x_1, x_4, x_5$  were fixed “in the center of the factor space”.

The developed experimental-statistical models provide a scientific basis for optimizing the modes of  $\text{ClO}_2$  dosing, enabling the transition to adaptive dosing, which reduces reagent consumption and minimizes the formation of chlorites. The obtained models, serving as “digital twins” of the water disinfection process, can form the foundation for the development of automated control systems for water treatment technological processes.

The presented study was carried out within the framework of the research projects “Technological Principles for Minimizing the Content of Chlorites in Drinking Water after Disinfection with Chlorine Dioxide” (State Registration No. 0125U001784) and “Computer Modeling and Optimization of Sustainable Technological Schemes of Water Management Systems” (State Registration No. 0124U002127).

## References

1. Mokiienko A. Dioksyd khloru [Chlorine dioxide]. Vol. 1. Monograph. **2025**. 611 p. URL: [https://eprints.oa.edu.ua/id/eprint/9664/1/Dioksyd\\_hloru\\_T.1.pdf](https://eprints.oa.edu.ua/id/eprint/9664/1/Dioksyd_hloru_T.1.pdf) (in Ukrainian).
2. State Sanitary Rules and Norms (DSanPiN) 2.2.4-171-10 “Hygienic Requirements for Drinking Water Intended for Human Consumption.” With amendments and additions introduced by Orders of the Ministry of Health of Ukraine dated August 15, 2011 No. 505, December 24, 2019 No. 2675, and February 18, 2022 No. 341 (in Ukrainian).
3. The Drinking Water Directive (EU) 2020/2184 of the European Parliament and of the Council of 16.12.2020 on the quality of water intended for human consumption (recast).
4. Bondarchuk, O.; Shakhnovsky, A.; Spasonova, L.; Mokiienko, A. Monitoring of water quality and statistical analysis of parameters of the water treatment system with chlorine dioxide at the Dnipro water supply station. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences. **2024**, 337(32), 395–400. DOI: 10.31891/2307-5732-2024-337-3-60 (in Ukrainian).
5. Korn, C.; Andrews, R. C.; Escobar, M. D. Development of chlorine dioxide-related by-product models for drinking water treatment. Water Research. **2002**, 36(1). 330–342. DOI: 10.1016/s0043-1354(01)00194-4

## USE OF ACTIVATED CARBON FROM SUGAR SORGHUM AS A SORBENT FOR WATER PURIFICATION FROM HEAVY METALS

*Dmytrukha N.M.<sup>1</sup>, Andrusyshyna I.M.<sup>1</sup>, Kozlov K.P.<sup>1</sup>, Hryhorenko N.O.<sup>2</sup>, Lehkostup L.A.<sup>1</sup>*

- 1. State Institution "Kundiev Institute of Occupational Health of National Academy of Medical Sciences of Ukraine", Kyiv*
- 2. Institute for Sorption and Problems of Endoecology of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv*

**Introduction.** Water resource pollution is a global environmental problem that requires the development of effective purification methods and technologies. Under the current conditions of active military operations in Ukraine, the issue of water contamination has become particularly urgent. Among pollutants, heavy metals deserve special attention, as their entry into the human body has a highly negative impact on health.

One of the most widely used approaches to water purification is sorption using various sorbents. Filters containing quartz, kaolin, zeolite, ion-exchange resins, and other materials are employed for this purpose [1]. The most popular sorbent is activated carbon, which remains an indispensable tool for purifying drinking water. It is also widely used for treating industrial wastewater and process water in various enterprises [2].

Many companies are actively developing new technologies for producing carbon sorbents with improved physicochemical properties. Particular attention is paid to natural, environmentally friendly, and economically feasible sorbents obtained from secondary agricultural raw materials. Their use addresses two problems simultaneously: wastewater purification and waste utilization [3].

The **aim** of this study was to determine the adsorption capacity of natural carbon sorbent produced from sugar sorghum press cake for removing heavy metal ions from water.

**Materials and methods.** Model experiments were carried out to assess the effectiveness of activated carbon from sugar sorghum press cake in removing Pb, Cd, Zn, and Mn ions from aqueous solutions. The raw material consisted of sugar sorghum stalk press cake left after juice extraction. The main structural components of the sorbent are cellulose and lignin, bound in biopolymer complexes.

Carbonization of the press cake was conducted at 800 °C in an inert argon atmosphere. To enhance adsorption capacity, the carbon was activated by oxidation in 25% nitric acid solution. This treatment increased the specific surface area to 2200 m<sup>2</sup>/g, the pore volume to 1.12 cm<sup>3</sup>/g, and resulted in an average pore size of 10.0 Å. These properties indicate a well-developed mesoporous structure with surface carboxyl and phenolic ionogenic groups (–COOH, –OH). Owing to its surface characteristics and ion-exchange functional groups, this sorbent is expected to be effective for binding high-molecular compounds and heavy metal ions [4].

The sorption properties were studied under static conditions. A portion of 0.1 g of sorbent was added to 100 ml of aqueous metal solutions with concentrations of 0.05, 0.5, and 1.0 mg/l. The suspensions were shaken for 2 h and left to stand for 24 h at 25 °C. The sorbent was then removed by filtration, and metal concentrations in the filtrate were determined at the start and after 24 h using inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy (ICP-AES) with an Optima 2100 DV spectrometer (PerkinElmer, USA) [5].

Adsorption capacity was calculated using the formula (1) and sorption efficiency by the formula (2) :

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e) \times V}{M} \quad (1) \quad \text{and} \quad E = \frac{(C_0 - C_e) \times 100\%}{C_0} \quad (2)$$

where:

$q_e$  – adsorption capacity (mg/g);

E- sorption efficiency

$C_0$  and  $C_e$  – initial and equilibrium metal concentrations(mg/l);

$V$  – solution volume(l);

$M$  – sorbent mass(g).

**Results.** Analysis of metal concentrations before and after sorption showed that the adsorption capacity of sugar sorghum carbon varied for different metals. For Pb ions, the adsorption capacity was 0.03, 0.46, and 0.89 mg/g at initial concentrations of 0.05, 0.5, and 1.0 mg/l, respectively. For Zn, the corresponding values were 0.008, 0.32, and 0.63 mg/g; for Cd – 0.035, 0.20, and 0.39 mg/g; and for Mn – 0.015, 0.28, and 0.37 mg/g (Fig. 1).

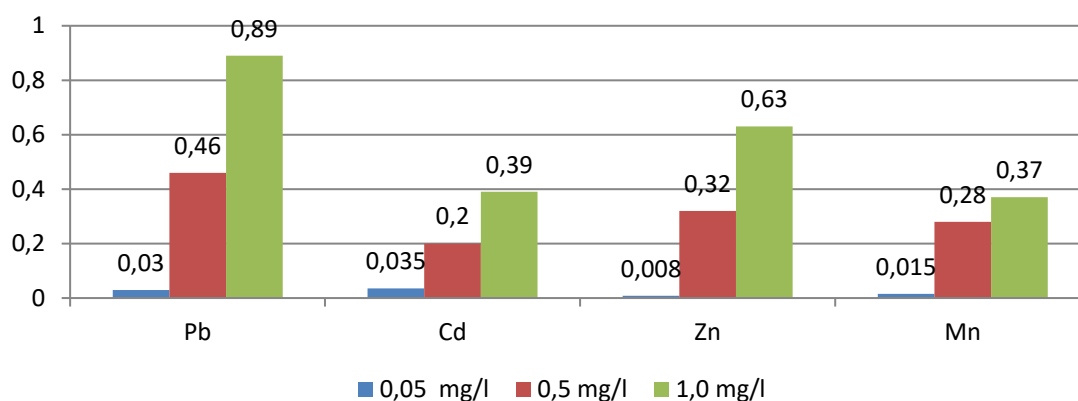


Fig. 1. Adsorption capacity (mg/g) of activated carbon from sugar sorghum press cake after 24 h incubation with metal solutions.

The calculated sorption efficiency of Pb ions was 72.0%, 79.3%, and 78.0% at the respective concentrations. For Cd ions, the efficiency was 53.8%, 36.4%, and 35.8%, while for Zn ions it reached 18.6%, 74.2%, and 54.3%. The lowest sorption efficiency was observed for Mn ions, amounting to 30.0%, 43.8%, and 30.0% (Fig. 2).

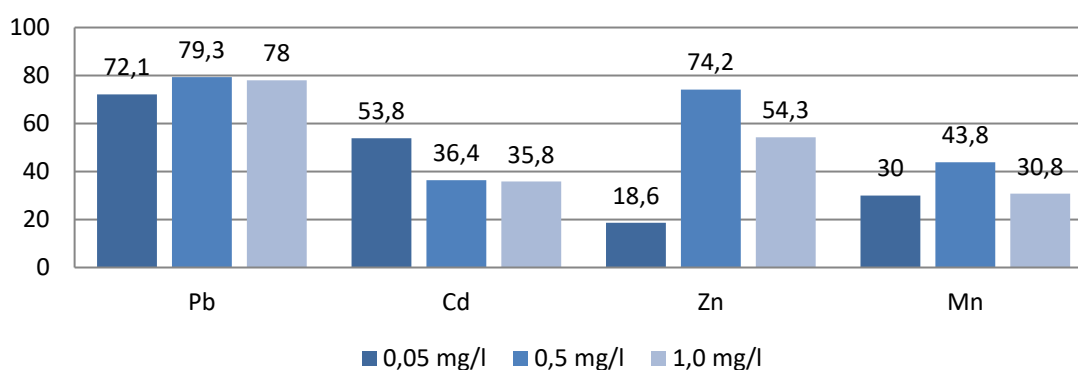


Fig.2. Adsorption efficiency of activated carbon from sugar sorghum press cake for metal ions after 24 h incubation

**Conclusions.** The results show that activated carbon produced from sugar sorghum press cake demonstrates the highest sorption activity toward Pb ions. This is explained by their stronger affinity for active surface groups (–OH, –COOH) compared to other metals. Considering that this sorbent is natural, environmentally safe, and simple to produce from agricultural waste, it represents a promising material for water purification from hazardous heavy metals, especially lead.

### References

1. Tarnovsky D.V., Fedoryshyn O.S., Vyshnevskiy O.A., Romanova I.V. Removal of cesium and strontium ions from aqueous solutions using metakaolin based geopolymers. *Chemistry, physics and technology of surface*. 2024. V. 15. № 1. P.102-109
2. Panda L., Lena S.K., Rath S.S., Misra P.K. Heavy metal removal from water by adsorption using a low-cost geopolymer. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2020. № 27(9). P. 24284.
3. Mykhailov M.G. Promising methods for wastewater treatment containing heavy metal ions. Proceedings of the II International Scientific and Technical Internet Conference "Resource Conservation and Energy Efficiency of Engineering Infrastructure of Urbanized Territories and Industrial Enterprises", February 2-27, 2016. Kharkiv (in Ukrainian).
4. Hryhorenko N.O., Roik M.V., Kupchyk L.O., Kupchyk M.M., Babjak A.I. Method for obtaining carbon sorption material from sugar sorghum plant waste. Utility model patent 152894. 26.04.2023, Bulletin 1. <https://iprop-ua.com/inv/pdf/0jei13zp-pub-description.pdf> (in Ukrainian).
5. DSTU EN ISO 11885:2019 "Water quality. Determination of selected elements by inductively coupled plasma optical emission spectrometry" (ICP-OES) (in Ukrainian).

## CHANGES IN NITROGEN AND PHOSPHORUS CONTENTS IN THE WATERS OF LAKE PIASECZNO AS INDICATORS OF ANTHROPOPRESSURE ON THE AQUATIC ENVIRONMENT

*B. Futa, J. Gmitrowicz-Iwan, M. Myszczyńska-Dymek*

*Institute of Soil Science, Environmental Engineering and Management, University of Life Sciences in Lublin, Poland, [barbara.futa@up.edu.pl](mailto:barbara.futa@up.edu.pl)*

Nutrient pollution, primarily involving nitrate (N) and phosphate (P) ions and resulting from agricultural intensification, has become one of the main drivers of eutrophication in aquatic ecosystems. An imbalance often occurs between the influx of nutrients into aquatic systems and the resulting increase in biomass. This phenomenon is particularly evident in lakes, where limited water exchange and low flow rates promote eutrophic conditions. This leads to anaerobic decomposition processes, which disrupts biological activity in the aquatic environment. The aim of this study was to evaluate the degree of eutrophication in Lake Piaseczno (Łęczyńsko-Włodawskie Lake District, Eastern Poland) based on nitrate and phosphate concentrations in the littoral zone.

Lake Piaseczno, located in the southern part of the Łęczyńsko-Włodawa Lake District in eastern Poland, covers approximately 84 hectares and has a maximum depth of about 39 meters. Its catchment area is relatively small and flat, encompassing around 240 hectares. The majority of the catchment is covered by podzolic soils composed of sand, which are characterized by low fertility and sorption capacity; peat soils have formed in the northern section, originating from fen habitats adjacent to the lake. Based on land use, the lake's basin is conventionally subdivided into three

sectors (sub-catchments): agricultural, forest-recreational, and marsh-peatland. This research focused on the agricultural sector, which was previously primarily used for agriculture but now serves predominantly for tourism and recreation due to the increasing number of holiday plots. The natural tourism carrying capacity of this part of the lake basin has been exceeded more than fourfold. Water samples were collected three times annually (in May, July, and September) across a five-year observation period.

During the observations, the content of nitrates and phosphates in the water of Lake Piaseczno increased significantly over time. This was due to the pressure of recreation and tourism, which increased over time. This is evidenced by seasonal changes in the content of nitrogen and phosphorus compounds in the studied water. The content of these components in the lake water was noticeably higher in summer and autumn than in spring. The change in land use in the Lake Piaseczno catchment area from agricultural to recreational use inhibited the flow of nutrients from agricultural sources and simultaneously increased the flow of nutrients related to tourism and recreation.

## **FROM FACTORY TO RIVER: TRACKING POLLUTION PATHWAYS IN THE VISTULA VALLEY**

*J. Gmitrowicz-Iwan, B. Futa, M. Myszura-Dymek*

*Institute of Soil Science, Environmental Engineering and Management, University of Life Sciences in Lublin, Poland, joanna.gmitrowicz-iwan@up.edu.pl*

Despite the growing interest in organic farming, the demand for mineral fertilizers remains high. Fertilizer production is a water-intensive process, and factories are often located near major rivers, increasing the risk of water contamination. This study investigates the influence of a nitrogen fertilizer plant's Chemical Wastewater Treatment Plant (CWTP) on the water quality of nearby river-lake systems in the Vistula River valley, Poland. Six floodplain lakes situated close to the CWTP were selected for analysis – three within the embanked area and three outside. Two additional lakes, located 30 km upstream, served as controls. Monthly water samples were collected from March to November 2022 and analysed for pH, electrical conductivity (EC),  $\text{Cl}^-$ , total nitrogen (TN),  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ , total phosphorus (TP),  $\text{PO}_4^{3-}$ , dissolved organic carbon (DOC), and major cations ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ). Statistical analyses revealed that a canal discharging cooling tower wastewater may significantly affect nearby lakes, increasing their  $\text{Cl}^-$  and  $\text{Na}^+$  concentrations. Elevated  $\text{NH}_4^+$  levels were also detected in lakes located downstream of the CWTP, even though they have no direct surface connection with the facility's reservoir and canals. This pattern, together with evidence of  $\text{NH}_4^+$ -rich water seeping under the dike, suggests possible leakage from the CWTP reservoir. Further investigation of groundwater is required to confirm the integrity of the reservoir, which is of particular importance given its location in the Vistula River valley – a primary source of drinking water for nearly two million people. Any structural failure, especially during flooding, could trigger an ecological disaster affecting not only the Vistula River but also the Baltic Sea.

## ADVANCED TECHNOLOGIES FOR WATER QUALITY MONITORING AND PURIFICATION FROM HEAVY METAL IONS

**Goncharova I.<sup>1,2</sup>, Halysch V.<sup>3</sup>, Sevastyanova O.<sup>4,5</sup>, Guichaoua D.<sup>1</sup>, Sahraoui B.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Photonics Laboratory LPHIA, SFR MATRIX, University of Angers, Angers, France*

<sup>2</sup>*Department of Commodity Science and Pharmacy, State University of Trade and Economics, Kyiv, Ukraine*

<sup>3</sup>*Department of Ecology and Technology of Plant Polymer, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine*

<sup>4</sup>*Department of Fiber and Polymer Technology, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden*

<sup>5</sup>*Wallenberg Wood Science Center, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden*

[irina.goncharova.knteu@gmail.com](mailto:irina.goncharova.knteu@gmail.com)

Providing the population with clean drinking water has become a priority task around the world according to the World Health Organization. However, this issue is complicated by the growing population, higher water quality standards and, at the same time, increasing of water and wastewater pollutions, which poses a serious threat to human health and environment.

This problem is most acute today during the hostilities in Ukraine. Missile strikes are not only accompanied by consequences for people and infrastructure, but also the environment suffers from this. The level of heavy metals in natural resources is increasing significantly. Therefore, during martial law and post-war recovering in Ukraine, water quality control and purification are critical parts of environmental protection.

It is known that most of the current detection techniques for water analysis are based on optical and mass spectroscopy measurements and require long detection cycles, as well as specific chemicals which may cause secondary pollution.

Water purification methods that allow the removal of heavy metal ions from water without changing the degree of oxidation are based on sorption, ion exchange, and membrane technologies. The use of sorption methods is associated with the cost of sorbents.

In this work, for water quality control and purification, our research group used advanced technologies, such as laser-induced breakdown spectroscopy and biosorption treatment.

Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) is a novel atomic emission spectroscopic nanotechnology used to determine the elemental composition of a sample. LIBS has several advantages, including easy sample pre-treatment, fast operation, chemicals free during the process, and identification of multi-state substances simultaneously, rapidly, and remotely [1].

Biosorbents are biological materials used to remove pollutants from water, such as heavy metals, dyes, and pharmaceuticals. They are derived from natural sources like bacteria, fungi, algae, and agricultural waste such as fruit shells, and are valued as being a cost-effective and environmentally friendly method for water purification [2].

Experimental LIBS system includes five main components. These are the sample holder, the laser source, the optical path, the spectrometer, and the data analysis unit. For the first series of experiments, we built setup for the Single-pulse LIBS consists of Nd:YAG laser Continuum Minilite with a pulse duration of 10-15 ns, a repetition rate of 10 Hz, a maximum pulse energy of 850 mJ, and wavelength of 1064 nm with the USB 4000 Ocean Optics Spectrometer.

Firstly, our research team focused on the application of chemical replacement combined with surface-enhanced LIBS (CR-SENLIBS) for the detection of heavy metal ions, such as Fe<sup>3+</sup> and Cu<sup>2+</sup> in aqueous solutions and natural waters [3].

The main aqueous solutions 500 mg/L of FeCl<sub>3</sub> and CuCl<sub>2</sub> were dropped into Al alloy plates and dried on aluminium foils. LIBS experiments of Al plates also were conducted. LIBS

spectra containing information about these metals were collected immediately after microplasma generation in visible optical spectrum region.

LIBS spectra were compared with theoretical database NIST LIBS of American National Institute of Standard and Technology. From the main solutions of 500 mg/L of FeCl<sub>3</sub> and CuCl<sub>2</sub>, working solutions with concentrations 2.5–50 mg/L of FeCl<sub>3</sub> and CuCl<sub>2</sub>, were prepared by dilution with distilled water. After microplasma generation, our research team found 14 LIBS spectra for 2.5–50 mg/L FeCl<sub>3</sub> and CuCl<sub>2</sub>. In agreement to the NIST LIBS database, in the LIBS spectra obtained from 50 mg/L FeCl<sub>3</sub> and CuCl<sub>2</sub>, we received three standard peaks for Fe ( $\lambda_8=358.23$  nm,  $\lambda_9=374.90$  nm, and  $\lambda_{10}=384.12$  nm), one standard peak for Cu ( $\lambda_7=521.87$  nm), and built the calibration curves. The Limits of detection for Fe and Cu were found.

After conducting LIBS experiments with the natural waters of Ukraine and based on calibration curves, the Fe<sup>3+</sup> and Cu<sup>2+</sup> content of the Dnipro River, Blue Lake (Kyiv) and natural source of Obukhiv, were calculated and compared with MPC from World Health Organization. It was found that for Dnipro River: Fe<sup>3+</sup> 0.23 mg/L, Cu<sup>2+</sup> 0.15 mg/L, for Blue Lake: Fe<sup>3+</sup> 0.2 mg/L, Cu<sup>2+</sup> 0.12 mg/L, as well as for natural source of Obukhiv: Fe<sup>3+</sup> 0.17 mg/L, Cu<sup>2+</sup> 0.1 mg/L. According to the WHO for Ukrainian natural sources, MPC for Fe<sup>3+</sup> and Cu<sup>2+</sup> equal of 0.2 mg/L and 0.1 mg/L, respectively [4].

The purification of industrial and municipal wastewater is a non-negotiable requirement for both environmental protection and public health. Proper wastewater purification is the key to preserving natural waters from pollution. Among the most hazardous contaminants, heavy metals pose a unique and severe threat because of their fundamental nature. Unlike organic pollutants, heavy metals are non-degradable; they cannot be broken down chemically or biologically and persist indefinitely in environment. The global transition toward a circular economy requires converting industrial waste streams into valuable resources. Biosorbents derived from agro-industrial waste provide a compelling, sustainable solution to heavy metal contamination [5].

The purpose of this part of investigation was to create novel sorption materials from walnut shells using two distinct modification processes and subsequently assess their capacity for removing inorganic ecotoxicants. The raw material consisted of walnut shells crushed to a particle size of 1–2 mm. The sorbents were prepared by treating the shells with either pure acetic acid (AA) or a mixture of acetic acid and 9 % hydrogen peroxide (AAHP). Both reactions were performed at 90 °C with a solid-to-liquid ratio of 5:1.

Sorption of inorganic heavy metal ions was studied using iron Fe<sup>3+</sup> and copper Cu<sup>2+</sup> model solutions, with concentrations ranging from 10–50 mg/L and 50–250 mg/L, respectively, over a 120-minute period using 0.50 g of sorbent and 50 mL of solution. Concentrations were monitored spectrophotometrically.

The chemical modifications induced significant and beneficial structural changes in the walnut shell matrix (Table). During treatment in the hot AA medium, the primary mechanism was acid hydrolysis. This promoted the selective removal of both low- and high-molecular-weight polysaccharide components and facilitated the dissolution of mineral components. This structural cleaning had a profound positive impact on the pore volume of the sorbent 1, making the binding sites more accessible. The addition of the strong oxidizing agent (AAHP) resulted in a much more significant decrease in the yield of the lignocellulosic material. This yield loss was directly attributed to the efficient removal of a substantial portion of aromatic substances, primarily lignin. Consequently, the content of remaining polysaccharides (cellulose and hemicellulose) significantly increased in the modified sorbent 2, simultaneously reducing the mineral content by more than half compared to the initial raw material.

Table. Characteristics of walnut shells and obtained biosorbents

Material / sorbent	Sorbent yield, %	Component content, %			
		cellulose	lignin	minerals	others
Walnut shells	–	41.2	37.5	2.3	19.0
Sorbent 1	86.0	27.3	48.3	0.3	24.1
Sorbent 2	40.2	76.8	0.8	1.2	21.2

It is known that due to the presence of various functional groups (methoxyl, hydroxyl, carbonyl), plant materials are characterized by certain sorption properties for metal cations. In addition, heavy metal ions can bind tannins contained in unmodified walnut shells to form insoluble compounds. An important role in ion-exchange properties is also played by the mineral component that can participate in ion exchange reactions.

Since the initial sample is characterized by the maximum content of mineral substances and a high content of lignin, organic substances with various functional groups, it has the maximum sorption capacity for  $\text{Fe}^{3+}$  and  $\text{Cu}^{2+}$ . Modification of the walnut shell in an AA environment leads to a significant decrease in the content of mineral components, but the relative content of lignin increases slightly. Perhaps this is why the sorption capacity of sorbent 1 for heavy metal cations is slightly reduced. The lowest sorption capacity for the studied ions corresponds to the sample with the maximum content of the polysaccharide component. Overall, the obtained plant sorbents demonstrated a high sorption capacity toward heavy metal ions:  $\text{Fe}^{3+}$  were removed with a capacity ranging from 18–29 mg/g, and  $\text{Cu}^{2+}$  removal capacity ranged from 33–44 mg/g. These figures position the modified walnut shells as competitive alternatives to commercial heavy metal adsorbents.

Therefore, by investing in water quality monitoring and purification, using advanced technologies, such as laser-induced breakdown spectroscopy and biosorption treatment, it is possible better manage and protect the water resources, which are essential for public health, agriculture, and economic development. Our main goal is to help in creation of environmental sensors to assess and improve the availability and quality of water, which are essential for health and wellbeing in general around the world and for Ukraine in difficult period of war.

### Acknowledgements

This work was supported by a Grant of Swedish Institute 00237/2025 “Development of sustainable technologies for water and wastewater treatment using biosorbents” (Sweden), as well as Special Programs for Ukrainian scientists “Pause Solidarity with Ukraine”, “Pause-ANR Ukraine” (France).

### References

- Goncharova I., Guichaoua D., Taboukhat S., Tarbi A., Chtouki T., Erguig H., Sahraoui B. Laser-induced breakdown spectroscopy application for heavy metals detection in water: A review. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*. 2024. 217, 106943. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2024.106943>.
- Halysh V., Sevastyanova O., Pikus S., Dobele G., Pasalskiy B., Gun'ko V. M., Kartel M. Sugarcane bagasse and straw as low-cost lignocellulosic sorbents for the removal of dyes and metal ions from water. *Cellulose*. 2020. 27(14), 8181–8197. <https://doi.org/10.1007/s10570-020-03339-8>.
- Goncharova I., Rouquier Ph., Guichaoua D., Taboukhat S., Tarbi A., Sahraoui B. Laser-induced breakdown spectroscopy as a promising nanotechnology for cadmium and chromium detection in aqueous solutions. *Springer Nature*. 2024. 10(312) «Nanooptics and

Nanoelectronics, Nanobiotechnology, and their Applications», 119–129. ISBN 978-3-031-67526-3. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-67527-0\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-031-67527-0_10).

4. Guidelines for drinking-water quality: Fourth edition incorporating the first and second addenda. Geneva: World Health Organization; 2022. Licence: CC BY-NC-SA 3.0. 584 p.
5. Halysh V., Sevastyanova O., de Carvalho D. M., Riazanova A. V., Lindström M. E., Gomelya M. Effect of oxidative treatment on composition and properties of sorbents prepared from sugarcane residues. *Industrial Crops and Products*. 2019. 139, 111566. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111566>.

## UTILIZING LEATHER PRODUCTION RESIDUES TO DEVELOP FUNCTIONAL COLLAGEN GELS FOR BIOMEDICAL APPLICATIONS

*Iungin O.S, Maistrenko L.A., Pokholenko Ia. O., Okhmat O.A., Mokrousova O.R.*

*Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine, Kyiv, [olgaungin@gmail.com](mailto:olgaungin@gmail.com)*

The leather industry generates huge volumes of waste, which constitute a significant environmental burden. It is estimated that up to 60–70% of raw hide is converted into waste, a significant portion of which consists of trimmings from mechanical processing and semi-finished products. Most of these residues, such as fleshings, limed pelt, and delimed pelt, are rich in protein – collagen, a valuable natural polymer. Collagen, as the main component of the extracellular matrix, is widely used in biomedicine for creating implants, tissue engineering scaffolds, drug delivery systems, and wound healing materials. Therefore, the development of effective and environmentally friendly methods for extracting high-quality collagen from leather production waste is an extremely relevant task, aligning with the principles of the circular economy and contributing to reduced environmental pollution. The aim of this work was to investigate the feasibility of obtaining biomedically suitable collagen from various types of leather industry waste and to evaluate the characteristics of the resulting gels.

**Materials and Methods.** Three main types of waste were used for the experimental studies: limed pelt, delimed pelt, and fleshings. Each type of waste underwent pre-treatment to remove undesirable impurities (e.g., fat and mineral salts). Specifically, limed pelt samples were subjected to a deliming stage using 3% ammonium sulfate at a temperature of 38–40°C for 1 hour. After grinding to a size of 3×3 cm, protein components were extracted using a sequential extraction method. A combination of alkaline and acidic treatment methods was applied to optimize the yield and purity of the collagen. A total of three sequential extractions were performed for each waste type to maximize protein yield. The isolated collagen solution was subjected to dialysis and lyophilization. The quantitative protein content in the extracts was determined by two independent methods: Biuret and Bradford. Furthermore, the mass fraction of moisture, minerals, and total nitrogen in the starting materials was determined. To assess the suitability of the obtained collagen for biomedical application, its physicochemical properties were investigated, including thermal stability, rheological characteristics, and the ability to form gels under physiological conditions. A crucial step involved evaluating the purity and molecular structure of the collagen using SDS-PAGE electrophoresis to confirm the presence of characteristic  $\alpha$ - and  $\beta$ -chains.

**Results.** Analysis of the initial raw materials showed that delimed pelt has the highest mass fraction of total nitrogen (an indicator of protein content), approximately 15.0%, while limed pelt contains a high percentage of mineral substances (up to 10.7%), mainly due to lime residues. Fleshings, although containing the most minerals (up to 31.7%), have a relatively low total

nitrogen content (5.4%), indicating greater heterogeneity and the presence of non-collagenous components.

The results of sequential extraction indicate that the highest protein yield was achieved from the delimed pelt samples, especially during the first and second stages. For instance, for delimed pelt, the total protein amount determined by the Biuret method was 25.3 mg and 11.4 mg for the first and second extractions, respectively. These values were slightly lower for limed pelt. The use of the Biuret and Bradford methods allowed for precise estimation of the protein concentration, which in the most effective extracts from delimed pelt reached 52.71  $\mu\text{m}$  0.53 mg/100 mL (Biuret) and 63.51  $\mu\text{m}$  0.64 mg/100 mL (Bradford). The high concentration and purity of protein in these samples confirm that delimed pelt is the most promising raw material for obtaining biomedical collagen.

A key finding is the successful gel formation from the obtained collagen solutions. The collagen isolated from delimed pelt demonstrated the necessary ability for self-assembly (fibrillogenesis) and the formation of a stable three-dimensional network upon increasing the temperature to physiological (37°C) and neutralizing the pH. This indicates that the extraction process successfully preserved the native triple-helical structure of the collagen molecule, which is critically important for its biological activity and cell interaction. Moreover, rheological analysis confirmed that the resulting gels possess sufficient mechanical strength and elasticity, a prerequisite for use as scaffolds for cell culture in tissue engineering.

It was also established that collagen gels derived from waste exhibit a high biocompatibility profile, as evidenced by successful cell viability tests. This paves the way for their application in the development of medical devices, particularly wound dressings, which can accelerate the regeneration process by providing a favorable microenvironment for fibroblast proliferation and angiogenesis. The low immunogenicity inherent in purified collagen makes it an ideal candidate for use in the human body.

**Conclusions.** The conducted studies successfully demonstrated that leather production waste, particularly delimed pelt, can be effectively valorized as a source of high-quality collagen. The developed extraction methodology allows for obtaining a purified collagen product with a preserved native structure, which exhibits excellent gelling characteristics. The resulting collagen gels are functionally suitable for a wide range of biomedical applications, including tissue engineering and regenerative medicine. Thus, this research offers an environmentally and economically sound solution for industrial waste management, transforming it into valuable biomaterials.

## INTEGRATED ASSESSMENT OF MICROBIOLOGICAL WATER SAFETY USING FISH TECHNIQUE AND AUTOMATED IMAGE ANALYSIS BASED ON DEEP LEARNING

<sup>1,2</sup>Jamka K. \*, <sup>1</sup>Kozłowska A., <sup>2</sup>Raszewski G., <sup>1</sup>Łagód G.

<sup>1</sup>Department of Water Supply and Wastewater Disposal, Faculty of Environmental Engineering and Energy, Lublin University of Technology, Nadbystrzycka 40B, 20-618 Lublin, Poland,

<sup>2</sup>Department of Toxicology and Food Safety, Institute of Rural Health, Jaczewskiego 2, 20-090 Lublin, Poland

\*corresponding author: d634@pollub.edu.pl

The demand for potable water is continuously increasing with the growing population, especially in urban areas, as well as due to industrial and commercial development. An additional challenge is posed by the adverse effects of climate change, which affect the availability of traditional water sources. In response to these issues, authorities worldwide are actively seeking

alternative water sources to meet the constantly rising demand. Among the most widely studied alternatives, roof-harvested rainwater is considered one of the most cost-effective options. It can be used for both potable and non-potable purposes, including irrigation, toilet flushing, car washing, showering, and laundry. However, there is still insufficient information regarding the microbiological quality of roof-collected rainwater and the associated health risks. Pathogenic microorganisms such as *Aeromonas spp.*, *Campylobacter spp.*, *Legionella spp.*, *Salmonella spp.*, *Giardia spp.*, and *Cryptosporidium spp.* may be present in fecal material from birds, mammals, and reptiles with access to roofs. During rainfall, this material can be washed into storage tanks, posing a potential health hazard.

Ensuring microbiological water safety remains a major public health challenge. Traditional monitoring methods based on time-consuming cultivation of fecal indicator bacteria (FIB) are considered insufficient. These approaches show poor correlation with the actual presence of many pathogens (e.g., viruses and protozoa) and fail to detect viable but non-culturable (VBNC) cells. Although VBNC cells do not grow on standard media, they retain metabolic activity and virulence, representing a hidden risk to consumers. Particular difficulties arise in monitoring pathogens such as *Campylobacter spp.*, which are among the leading causes of bacterial gastroenteritis worldwide. These bacteria, often detected in rainwater contaminated by animal feces, are difficult to culture and can enter the VBNC state in response to environmental stress. This highlights the urgent need to develop rapid, culture-independent detection methods that provide reliable quantitative data for modern Quantitative Microbial Risk Assessment (QMRA).

A promising approach to address these challenges is the use of Fluorescence In Situ Hybridization (FISH), which employs fluorescently labeled oligonucleotide probes targeting ribosomal RNA (rRNA). This method allows direct identification and quantification of specific bacterial cells in complex environmental samples. Furthermore, to overcome the limited sensitivity of conventional FISH toward cells with low metabolic activity (low rRNA content), a signal amplification variant known as CARD-FISH (Catalyzed Reporter Deposition FISH) can be applied. The enzymatic signal amplification in CARD-FISH enables clear visualization and detection of slow-growing or dormant cells, including those in the VBNC state.

However, manual microscopic analysis remains a major bottleneck—it is time-consuming, labor-intensive, and prone to operator subjectivity. To overcome these limitations, an essential component of the study is the implementation of automated microscopic image analysis based on computer vision techniques. This approach can rely on both classical image segmentation algorithms (thresholding, morphological operations) and advanced deep learning (DL) models based on convolutional neural networks (CNNs), such as U-Net, Cellpose, or StarDist. The procedure, integrating deep learning algorithms with image acquisition systems, represents an example of a computer vision-based framework enabling objective and automated microbiological assessment. Neural networks trained on annotated reference datasets substantially improve the accuracy, reproducibility, and robustness of analyses across variable environmental samples compared to traditional manual methods. The research strategy assumes quantitative validation of the developed DL models through comparison of automated cell counts with expert manual evaluation of microscopic fields.

The proposed concept aims to develop an integrated microbiological monitoring platform combining the molecular specificity of (CARD-)FISH with the objectivity and scalability of image analysis based on ML/DL algorithms. The application of deep learning methods enables automatic identification and enumeration of fluorescently labeled target cells, eliminating subjective interpretation and enhancing result reliability. This integrated solution represents a significant step toward rapid, standardized, and reproducible microbiological water safety assessment, supporting risk management, operational monitoring, and early warning processes in water and wastewater management.

## MUNICIPAL WWTP SEEN THROUGH THE PRISM OF THE IRMS METHOD

Jaromin-Gleń K.<sup>1</sup>, Polakowski C.<sup>1</sup>, Pilat-Rożek M.<sup>2</sup>, Bieganowski A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Institute of Agrophysics, Polish Academy of Sciences, Lublin, Poland, [k.jaromin-glen@ipan.lublin.pl](mailto:k.jaromin-glen@ipan.lublin.pl); [c.polakowski@ipan.lublin.pl](mailto:c.polakowski@ipan.lublin.pl), [a.bieganowski@ipan.lublin.pl](mailto:a.bieganowski@ipan.lublin.pl)*

<sup>2</sup> *Lublin University of Technology, Lublin, Poland; [m.pilat-rozek@pollub.pl](mailto:m.pilat-rozek@pollub.pl)*

Wastewater treatment plants (WWTPs) represent complex engineered bioreactors characterized by steep physicochemical gradients that establish heterogeneous microenvironments, influencing microbial activity and biochemical transformations. Despite significant advancements and widespread implementation of treatment technologies worldwide, major knowledge gaps persist in elucidating the microbiological and biochemical mechanisms governing pollutant fate and transformation. The multifaceted complexity of these processes stems from the diverse interactions within microbial consortia and the dynamic nature of operational and environmental parameters, which complicates a holistic understanding of treatment efficacy.

Isotope Ratio Mass Spectrometry (IRMS) is a paramount analytical technique facilitating high-precision quantification of stable isotope ratios, typically expressed in delta notation ( $\delta$ , ‰) relative to international standards. IRMS commonly targets isotopes of hydrogen ( $^2\text{H}/^1\text{H}$ ), carbon ( $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ), nitrogen ( $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ ), oxygen ( $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ), and sulphur ( $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ ). These isotope ratios are established based on invariant natural baselines forged during Earth's formation but are subsequently influenced by physical, chemical, and biological processes active within WWTPs, such as nitrification, denitrification, ammonification, and organic matter degradation. During these transformations, preferential utilization of lighter isotopes ( $^{12}\text{C}$ ,  $^{14}\text{N}$ ) results in isotopic enrichment of residual substrates with heavier isotopes ( $^{13}\text{C}$ ,  $^{15}\text{N}$ ), providing detailed insights into the metabolic pathways and environmental influences affecting organic matter processing.

Acknowledging that stable isotope ratios serve as sensitive quantitative biomarkers susceptible to fractionation from various biochemical and physicochemical factors, this study also investigates the potential isotopic effects induced by pretreatment procedures applied to sewage sludge prior to further processing. A comprehensive literature review of common sludge pretreatment methods was conducted, focusing on their operational principles and impacts on sludge composition.

Empirical investigations were performed on sludge samples collected from six distinct points within the Hajdów Municipal Wastewater Treatment Plant in Lublin, Poland, which operates at an average daily flow rate of 120,000 m<sup>3</sup>/d. Stable isotope ratios of carbon ( $\delta^{13}\text{C}$ ) and nitrogen ( $\delta^{15}\text{N}$ ) in these samples were measured using IRMS to assess the influence of selected pretreatment techniques on isotopic signatures. The results demonstrate that while pretreatment effects on isotopic composition are subtle, they exhibit a complex pattern and can surpass isotopic shifts related to the primary sample treatment processes themselves.

These findings contribute to refining the interpretation of stable isotope data in wastewater research and emphasize the necessity for standardized protocols accounting for pretreatment impacts to improve the understanding of microbial-mediated treatment pathways and pollutant transformations within engineered wastewater systems.

## BIOPOLYMERS SYNTHESIZED BY ANTARCTIC PLANT-ASSOCIATED BACTERIA FOR CHEMICAL TECHNOLOGY

*Kalinichenko O.O., Morin V.V, Okhmat O.A., Iungin O.S.*

*Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine, Kyiv,*

[kalinichenko742135@gmail.com](mailto:kalinichenko742135@gmail.com)

The burgeoning demand for sustainable, biocompatible, and biodegradable polymers in modern chemical technology necessitates exploring novel microbial sources. Extremophile microorganisms, particularly those associated with plants in harsh environments like Antarctica, are often adapted to synthesize unique biopolymers - such as exopolysaccharides (EPS) and polyhydroxyalkanoates (PHA) - to cope with extreme conditions like low temperature and nutrient stress. EPS are extracellular polymers renowned for their diverse physicochemical properties, including high viscosity, excellent gelling capacity, and emulsion stabilization, making them promising alternatives to conventional, petroleum-based polymers. Conversely, PHA are intracellular storage compounds structurally analogous to synthetic plastics, widely recognized for their potential as biodegradable replacements for polyethylene and polypropylene. While PHA serves as an energy store critical for survival within microbial biofilms, EPS often constitutes the main structural component of the biofilm matrix. The intricate interplay between these two biopolymers and their high-value potential in the context of psychrotolerant endophytic bacteria from Antarctica remains largely underexplored. The overarching goal of this integrated research was to evaluate the functional properties of EPS and the production efficiency of PHA from Antarctic plant-associated bacterial communities and pure strains, thereby defining their potential utility in chemical technology and sustainable bioproduction.

**Materials and methods.** For EPS production two Antarctic plant-associated bacterial strains, *Hafnia psychrotolerans* 25.2 and *Pseudomonas sp.* 39.4, were cultivated under stationary conditions in Nutrient Broth (NB) and Minimal Salt Media (MSM) at 25°C and 37°C for six days. Two fractions were collected: the biofilm fraction (adhered cells/matrix) and the planktonic cell fraction (suspended cells). Three different extraction protocols were applied to the samples: acidic extraction, formamide extraction, and EDTA extraction. Standardized laboratory protocols were used to determine critical physicochemical parameters of the resulting EPS solutions, including pH, density, relative viscosity, and surface tension.

For PHA accumulation and extraction two types of microbial communities associated with Antarctic vascular plants were studied: air-liquid-solid (ALS) and liquid-solid (LS). These communities were cultivated stationary in Minimal Salt Medium (MSM) at 25°C for six days. The ability to accumulate intracellular PHA was initially confirmed using histochemical methods with Sudan Black staining and the fluorescent dye Nile Red analyzed via Confocal Laser Scanning Microscopy (Leica TCS SPE Confocal system). After harvesting the biofilms via centrifugation (160000 rpm, 20 min), the dried biomass was disintegrated using an ultrasound bath. PHA was subsequently extracted using chloroform for 24 hours, followed by precipitation with cold ethanol at 4°C overnight. The precipitated PHA was then washed with cold ethanol and dried at 40°C. The concentration of PHA was quantified per gram of dried microbial biomass (ADM).

**Results.** The EPS derived from the biofilm fraction of both *Hafnia psychrotolerans* 25.2 and *Pseudomonas sp.* 39.4, when cultivated in NB medium at 25°C (without prior acidic hydrolysis), consistently demonstrated the most promising indices for both viscosity and density. This suggests that moderate-temperature cultivation and complex media favour the synthesis of EPS with desirable rheological characteristics. Conversely, the highest value for surface tension - crucial factor for emulsifiers and surfactants - was observed for EPS extracted with formamide from the planktonic fraction of the *Hafnia psychrotolerans* 25.2 strain cultivated in MSM. This highlights that the choice of medium (NB vs. MSM) and extraction method significantly influences

the functional characteristics of the final biopolymer, which is essential for tailoring them to specific chemical applications

PHA accumulation was successfully confirmed histochemically in both the ALS and LS microbial communities via Sudan Black staining. However, only the ALS community showed clear visualization of lipid complexes using Nile Red fluorescence. Despite this difference in microscopic visualization, the standard extraction protocol yielded a consistent final concentration of 4 mg of PHA per gram of ADM for both community types. Crucially, the biomass productivity of the ALS community was determined to be fivefold greater than that observed in the LS community. This significant difference in overall biomass yield, while maintaining the same PHA accumulation rate, positions the ALS community as a far more efficient and economically viable source for large-scale PHA production.

**Conclusions.** Endophytic bacteria isolated from harsh Antarctic environments possess exceptional potential for synthesizing diverse, functional biopolymers critical for chemical technology. The EPS produced by *Hafnia psychrotolerants* 25.2 and *Pseudomonas sp.* 39.4 demonstrate variable functional properties (viscosity, density, surface activity) highly dependent on the cultivation medium and extraction technique, offering tunable characteristics for applications like gelling agents or stabilizers. Furthermore, both ALS and LS microbial communities accumulate PHA, but the ALS community exhibits a fivefold advantage in biomass productivity, making it the superior candidate for industrial-scale PHA bioplastic production. This research successfully links the unique adaptive mechanisms of psychrotolerant Antarctic microorganisms to the sustainable production of high-value biopolymers, providing a crucial step toward replacing synthetic petrochemicals with bio-based materials in advanced chemical and industrial processes.

## THE IMPLEMENTATION OF INNOVATIVE VIROLOGY SOLUTIONS IS KEY TO THE CONSERVATION OF WATER ANIMAL BIODIVERSITY

*Klestova Z.S., Prof. Dr.*

*BioTestLab, Ukraine, Kyiv*

*E-mail: zinaklestova@gmail.com*

The world's water resources have enormous potential. However, the current state of water resources is a global concern due to pollution from industrial effluents and agricultural runoff, as well as the excessive and unsustainable use of water. These negative factors often lead to pathogens spreading through water, causing infectious diseases in humans and animals, including fatalities. Maintaining the balance of marine biodiversity, including marine mammals, remains an important environmental and economic challenge. The modern threats to the health and biodiversity of marine mammals depend on many factors, including climatic and biological changes. One such biological factor is viruses, which are occupying new ecological niches in wild mammals and can spread through water. These viral infections are dangerous for livestock and humans.

Approximately 90% of human deaths from diarrhoeal diseases worldwide are caused by poor water quality, poor sanitation and poor hygiene. Diarrhoea is the second leading cause of death in children under five worldwide, with 1.2 million deaths recorded in 2012 (UNICEF). The World Health Organization (WHO) classifies the following waterborne viruses:

adenoviruses, astroviruses, hepatitis A and E viruses, rotaviruses, noroviruses, caliciviruses and enteroviruses (including coxsackie viruses and polioviruses). Additionally, viruses excreted in urine, such as polyomaviruses and cytomegaloviruses, can potentially spread through water. Other viruses, such as influenza and coronaviruses, can also be transmitted through drinking water.

In addition to causing diarrhoea, gastroenteritis, fever and vomiting, water-borne viruses can lead to more serious diseases, including encephalitis, meningitis and myocarditis (enteroviruses), cancer (polyomavirus) and hepatitis (hepatitis A and E viruses). Some of these viruses have an extremely low infectious dose: the probability of becoming infected by one rotavirus particle is 31%. Viruses are excreted in very high quantities in the faeces, even in asymptomatic carriers. For example, one gram of faeces can contain up to  $10^{11}$  norovirus particles (Hall, 2012). Shell-less viruses can persist in water for a long time (up to 21 days), and, once they enter sediment, they can remain stable there at higher concentrations than in water (Anisha Dayaram et al., 2017).

Viruses known to occur in marine mammals include morbilliviruses, influenza A subtype H1N1, highly pathogenic influenza virus H5N1, herpesviruses (types 1 and 2), parapoxviruses, rhabdoviruses (including the rabies virus) and adenoviruses (which cause hepatitis in seals). Some sewage contaminants may play a role in the prevalence of viruses in coastal waters.

The biggest concern for humanity right now is the spread of the SARS-CoV-2 virus and the resulting pandemic. Concerns have been raised about the spread of SARS-CoV-2 due to its rapid mutation and adaptation to new species, as evidenced by its presence in wildlife. Some marine mammals, which have a homologue of the ACE-2 receptor (the receptor for SARS-CoV-2), may be susceptible to infection. For instance, eight out of fifteen Mediterranean marine mammal species possess an ACE-2 amino acid sequence susceptible to SARS-CoV-2 infection. This could pose a threat not only to marine animals, but also to humans, potentially triggering a new wave of disease. There is an urgent need to increase surveillance of infections in free-swimming mammals and examine stranded or unusually behaving animals.

Therefore, rapid pathogen detection in water is key to a rapid response to biological risks, strengthening the biosecurity of regions and countries and preventing viral infections. We are therefore developing new express methods and devices for the rapid detection of viruses in water and biological fluids.

These developments are intended for the specific control of utilities, industry, agriculture, aquaculture, water in natural reservoirs, and the state of marine animals, as well as in areas affected by military conflict and ecological disasters.

We propose using our experience and expertise in studying viral infections. To this end, we can offer methodologies for monitoring and isolating human and marine mammal viruses, analysing viral genomes, studying phylogenetic relationships and epidemiology, identifying new reservoirs and viral ecological niches, and collecting viral isolates for characterising relevant viruses and identifying vulnerabilities in their replication cycle for use in prophylactic and therapeutic approaches.

# ANAEROBIC CO-DIGESTION OF SEWAGE SLUDGE AND HERBAL WASTE IN THE PRESENCE OF A ZEOLITE

*M. Lebiocka\*, A. Szaja, A. Montusiewicz V. Kolodiazhnyi*

*Faculty of Environmental Engineering and Energy, Lublin University of Technology,  
Lublin, Poland*

*Nadbystrzycka 40B, Lublin, 20-618, Poland*

*\*corresponding author: m.lebiocka@pollub.pl*

In the age of climate and energy crises, the development of the global economy in various industries faces an unprecedented challenge related to reducing the dependence on fossil fuels. The problem of alternative energy sources and energy security is becoming a global issue. In response to these challenges, the European Union is focusing on the transition to advanced biofuels produced from sustainable raw materials. An innovative approach based on lignocellulosic waste biomass as a renewable energy source may be a promising solution with high energy potential (Abraham et al., 2020). The sources of lignocellulosic biomass are agricultural waste, including herbal waste, forestry waste, as well as the organic fraction of municipal and industrial waste (wood, paper) (Roy et al., 2021).

Currently, the preparations used in natural medicine, cosmetics, and healthy foods are attracting increasing attention and interest from consumers. As a result, there is a growing demand for herbal raw materials, which leads to a gradual increase in the amount of herbal waste generated. Herbal waste can be used and processed in briquetting or pelletizing processes, and the products of these processes can be used as fuel (combustion) or animal feed (Obidziński et al., 2017). However, there are no reports in the literature on the possibility of using herbal waste in biological processing. Due to its physicochemical composition, significant content of organic matter, micro- and macroelements, as well as nutrients, lignocellulosic biomass waste of herbal origin can be a beneficial substrate or co-substrate for the methane fermentation process. According to the studies conducted by many researchers, lignocellulosic biomass has high methane potential, but its phenol content and complex structure may negatively affect the biogas production efficiency (Paudel et al., 2017; Kumari and Singh, 2018). This paper evaluates the possibility of using natural zeolites as substances that absorb phenolic compounds from herbal waste in the process of mesophilic anaerobic co-digestion (AcD) of herbal waste (HW) with sewage sludge (SS).

The main substrate, SS (mixture of thickened primary and excess sludge) was obtained from mechanical–biological WWTP located in Lublin (Poland). Under laboratory conditions, both types of sludge were mixed at the volumetric ratio of 60:40 (primary:excess). The inoculum for AcD was obtained from the same facility; it was taken from the outlet of mesophilic anaerobic digester. HW were chosen as co-substrates for SS and was taken from a local herbal industry. The applied zeolite, was a natural resource-obtained zeolitic tuff from a quarry near Nižný Hrabovec located in Slovakia. The impact of zeolite application on the AcD of SS and HW was investigated in a batch system experiment. The BioReactor Simulator, supplied by BPC Instruments AB (BPC Instruments AB, Lund, Sweden), was used as a laboratory installation. This installation comprised two units, with the first unit containing six anaerobic reactors, each fitted with a mixing system, and submerged in a water bath to maintain a consistent temperature of 35°C; the second one was applied to constantly monitor the volume of the generated biogas.

The working volume of each batch reactor was 2000 mL; they contained 1400 mL of inoculum and 400 mL of SS. In this study, three experimental series were planned, according to the following assumptions: R1—control series, mono-digestion of SS; R2—AcD of SS and HW; R3—AcD of SS and HW in the presence of a zeolite. In series R2 and R3 the doses of HW were 3.0 g. The amount of the applied zeolites in R3 was 2.0 g. The fermentation time was 21 days. From the technological point of view of the lignocellulosic biomass fermentation process, the possible inhibition by phenols is an important factor. Phenols have a toxic effect on

microorganisms responsible for individual stages of fermentation, especially methanogens. Even at low concentrations, they can inhibit enzymatic activity and reduce biogas production, and they also affect the structure of the microbiome (He et al., 2022). Furthermore, they can lead to the accumulation of intermediate products (e.g. volatile fatty acids) as they inhibit the processes of hydrolysis, acidogenesis and acetogenesis (Prem et al., 2023). The phenol content in the feedstock was  $64.3 \text{ mg dm}^{-3}$ ,  $69.2 \text{ mg dm}^{-3}$  and  $71.1 \text{ mg dm}^{-3}$  for R1, R2 and R3, respectively. The addition of herbal waste increased their concentration in the mixtures feeding the reactor. In the case of digest, an increase in their concentration compared to supply was observed; the largest increase (49%) was recorded in series R2, where SS and HW were fermented without the zeolite addition. When the zeolite was used (R3), the increase in phenol concentration was 31%. The lowest phenol concentration in the digest as well as the lowest increase during the process were observed in the sewage sludge mono-fermentation series (R1). This was also reflected in biogas production. The highest biogas production of  $190 \text{ ml gVS}^{-1}$  was reported in the R3 series, while the lowest in R1 ( $167 \text{ ml gVS}^{-1}$ ).

In summary, the addition of a natural zeolite to the co-fermentation process of sewage sludge and herbal waste may have a beneficial effect on the possible process inhibition by phenols introduced into the system together with lignocellulosic waste biomass. The studies also suggest that the use of a zeolite has a beneficial effect on the amount of biogas produced.

1. Abraham, A., Mathew, A. K., Park, H., Choi, O., Sindhu, R., Parameswaran, B., Pandey, A., Park, J. H., & Sang, B.-I. (2020). *Pretreatment strategies for enhanced biogas production from lignocellulosic biomass*. *Bioresource Technology*, 301, 122725. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122725>
2. He, J., Luo, T., Shi, Z., Angelidaki, I., Zhang, S., & Luo, G. (2022). Microbial shifts in anaerobic digestion towards phenol inhibition with and without hydrochar as revealed by metagenomic binning. *Journal of Hazardous Materials*, 440, 129718. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129718>
3. Kumari, D., & Singh, R. (2018). *Pretreatment of lignocellulosic wastes for biofuel production: A critical review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, 877–891. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.111>
4. Obidziński, S., Joka, M., & Fijoł, O. (2017). Two-stage agglomeration of fine-grained herbal nettle waste. *International Agrophysics*, 31, 515-523.
5. Paudel, S. R., Banjara, S. P., Choi, O. K., Park, K. Y., Kim, Y. M., & Lee, J. W. (2017). *Pretreatment of agricultural biomass for anaerobic digestion: Current state and challenges*. *Bioresource Technology*, 245(Part A), 1194–1205. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.08.182>
6. Prem, E. M., Schwarzenberger, A., Markt, R., & Wagner, A. O. (2023). Effects of phenyl acids on different degradation phases during thermophilic anaerobic digestion. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1087043. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1087043>
7. Roy, S., Dikshit, P. K., Sherpa, K. C., Singh, A., Jacob, S., & Rajak, R. C. (2021). review. *Journal of Environmental Management*, 297, 113422.

**THE MECHANISM AND PREVENTION IN CORROSION PROTECTION FOR  
SELECTED SYSTEMS AND DEVICES MADE OF AUSTENITIC STAINLESS STEEL**  
*J. Marjanowski<sup>1</sup>, J. Drewnowski<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*MARCOR Company Ltd, Kolobrzaska 30, 80-394 Gdansk, Poland*

<sup>2</sup>*Faculty of Civil and Environmental Engineering, Gdansk University of Technology,  
Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, Poland*

Corrosion problems arising from various factors continue to pose major environmental and technological challenges in many industrial sectors. The article presents a detailed analysis of various corrosion phenomena observed in piping systems and devices made of austenitic chromium-nickel stainless steels operating in aqueous environments within the food industry and district heating processing. The study explores the mechanisms underlying pitting, crevice, and sub-sedimentary corrosion occurring in chloride-rich water conditions, affecting the integrity of stainless steel components. Numerous case studies are provided, illustrating corrosion damage under defined environmental parameters, supported by photographic documentation, with particular emphasis on heat exchangers. The article highlights the importance of corrosion mitigation strategies, specifically through chemical pickling and passivation treatments. These procedures are conducted in baths designed to simultaneously remove existing deposit layers and regenerate protective passive films on the surfaces of chromium-nickel stainless steels.

The obtained results based on the discussed selected examples of the fundamental mechanisms and causes of systems and devices corrosion made of austenitic steels, indicated that the corrosion resistance of these steels in water installations is limited and depends on various factors. These include e.g. material-related (chemical composition), environmental conditions (chemical composition of the surrounding environment), ambient temperature, hydraulic flow, welding method and shielding gas, lack of etching and passivation of the surface after assembly. Other difficult to define factors, such as microbiological corrosion, may also play a significant role. Moreover austenitic steels used in water installations are particularly susceptible to corrosion. The occurrence of a specific type of corrosion, such as pitting, crevice and under deposit corrosion, is determined by many factors, as mentioned above. However, a damaged passive layer surface and environmental conditions, mainly the presence of chlorides, elevated temperature and lack of steel surface preparation after installation, mainly promote these forms of corrosion.

Among all the cases considered, the most favourable effect of austenitic steels protection against corrosion was recorded for both 304 and 316L AISI steel grades. In aqueous environments, effective protection involves initial or periodically repeated surface regeneration in baths where etching and passivation occur in acidic solutions of oxidizing acids, with the addition of a strong oxidizer, preferably hydrogen peroxide.

## BALANCING INFLOW VOLUMES AND LOADS TO THE SEWAGE TREATMENT PLANT THROUGH DYNAMIC SEWER NETWORK MANAGEMENT

*Mueller-Czygan G., Tarasyuk V.*

*Institute for Sustainable Water Systems, University of Hof, Germany*

*e-mail: [guenter.mueller-czygan@hof-university.de](mailto:guenter.mueller-czygan@hof-university.de) , [viktoriya.tarasyuk@hof-university.de](mailto:viktoriya.tarasyuk@hof-university.de)*

Sewer networks and sewage treatment plants must be adapted to challenges such as stricter legal requirements and increasing environmental demands. Climate-related extreme events such as heavy rainfall and periods of drought place particular demands on structural adaptations and the management of these infrastructure facilities. While heavy rainfall events lead to hydraulic overloads, backwater including flooding and mixed water discharges, periods of drought cause deposits, odour problems and corrosive processes in the sewer network. In many cities, this stress situation leads to an unstable inflow situation in sewage treatment plants, increased energy requirements, fluctuations in cleaning performance and difficulties in complying with limit values [1]. Against this background, the InSchuKa4.0 research project investigated how intelligent and dynamic control of the sewer network can contribute to adaptation to extreme weather events, reduce mixed water discharges and increase the operational reliability of existing systems. It was found that this innovative sewer network management can also be used to specifically relieve sewage treatment plants and, depending on the design, avoid the need for capacity expansion, e.g. through the construction of new treatment facilities. The combination of modern sensor technology, hydrodynamic simulation and innovative control based on the principle of case-based reasoning (CBR) enables adaptive network management. This involved specifically combining the empirical knowledge of operating personnel with real-time data and weather forecasts, a method that is particularly suitable for locations with little data documentation. In practice, this means that unused storage volume in the sewer is used in a targeted manner, the flow behaviour of the wastewater in the sewer is controlled situationally by intelligently networked flushing gates, and additional inflow volumes to the sewage treatment plant can thus be smoothed out – with positive effects on the hydraulic utilisation, operational safety and energy consumption of the entire sewer network and sewage treatment plant system. Using the city of Jena as an example, the InSchuKa4.0 project demonstrated that additional storage volume of around 8,000 m<sup>3</sup> can be made available in the existing sewer system and that mixed water discharges can be reduced by up to 50% if control and technology are optimally coordinated. It is particularly noteworthy that all this was made possible by minimally invasive technical retrofits consisting of sensor technology, machine technology and AI-based digitalisation in existing structures.

**Load situation at municipal sewage treatment plants.** In urban combined sewer systems, climate-related frequent heavy rainfall events lead to sudden overloads, where the existing retention volume in the sewer network is insufficient or underutilised. As a result, large quantities of untreated combined sewage must be discharged directly into water bodies because sewage treatment plants cannot accommodate these additional wastewater volumes due to existing volume limitations. At the same time, prolonged dry periods promote the formation of deposits on the sewer floor, leading to odour problems, sulphide formation and an increased risk of corrosion. These two extremes – overflow during heavy rainfall and sediment growth during dry periods – are occurring more frequently and in closer succession during the summer months, placing a considerable strain not only on the sewer network but also, depending on the inflow situation, on the operation of sewage treatment plants. The resulting fluctuations in inflow volumes impair continuous biological treatment, increase energy consumption due to the need for adjustments and, in the worst case, lead to inadequate treatment performance, which jeopardises compliance with legal requirements [2]. Most existing control concepts for sewers and sewage treatment plants are based on rigid operating strategies that are not suitable for the changes in load described above.

One possible solution would be to expand the sewer infrastructure with increased storage capacity, but this is not financially feasible in many municipalities [3]. The solutions developed in the InSchuKa4.0 research project<sup>1</sup> offer a cost-effective and efficient alternative with data-based, dynamic sewer network control.

**Intelligent sewer network control to relieve sewage treatment plants.** The InSchuKa4.0 project pursues an integrated approach that expands classic control concepts with intelligent data processing and case-based decision logic. At its heart is a control system that works according to the principle of case-based reasoning (CBR) – an artificial intelligence method in which past operating situations are stored as cases, compared with new, comparable situations and thus made available for current decisions. This systematically links the operational staff's experience and knowledge with current measurement data. Each management case is stored as a so-called "case" in a knowledge database and compared with real-time data from sensors, operational management and weather forecasts. Through this comparison, the system automatically identifies the control strategies that have been successful in comparable situations in the past, and the operating personnel can draw on these suggestions. It is particularly important that the decision-making processes remain transparent and traceable – an essential aspect for operations in a municipal environment [4].

This method was put into practice in the sewer network of the city of Jena. In a detailed simulation study, weak points such as hydraulic bottlenecks and areas with potential hydraulic storage volume were first identified, taking into account necessary flushing processes and unused potential in the network. It was found that, particularly during moderate rainfall events, additional storage volumes can be utilised by specifically activating this retention potential, which results in a more even inflow to the sewage treatment plant and prevents adverse effects on the treatment process. On this basis, two existing structures in the main collector were equipped with controllable dam and flushing gates and these were connected to the new CBR control system. This allowed both optimal use of existing storage volume and targeted flushing of the sewer beds during dry weather phases. This concept of innovative retrofitting in existing structures did not require any major structural work, but was implemented using modular technical components and individually adapted installation technology (see Fig. 1).

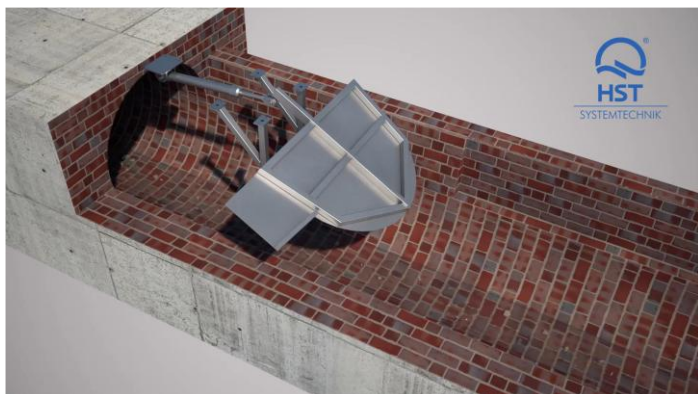


Fig. 1. Concept of the retrofitable storage flap in the Jena pilot area for activating storage space volume and flushing. Source: HST Systemtechnik

The control system was linked to the existing SCADA system of the sewer and sewage treatment plant as well as to the weather data service NiRA.web, whose 48-hour forecasts were integrated into the decision-making process of the CBR system. This enabled the system not only to react to current measurement data, but also to act proactively by analysing precipitation forecasts.

A central element of the control approach is the continuous expansion of the CBR case database. In the course of the project, 13 typical application scenarios were defined, representing different

<sup>1</sup> The project was supported by funds from the Federal Ministry of Education and Research (BMBF) under grant number 02WEE1623B as part of the "Extreme Water Events (WaX)" funding programme.

weather conditions, inflow situations and sewer conditions. These scenarios were linked to real operating data and serve as a reference for real-time control. The results showed that the application of this intelligent sewer network management system led to significant improvements: the number of mixed water discharges was reduced by up to 50%, while at the same time the effort required for manual interventions such as opening and closing throttling devices or manually triggering flushing processes by operating personnel was significantly reduced [5]. Table 1 provides an overview of the effects in different scenarios and shows that measurable benefits were achieved in both rainy and dry weather phases.

Table 1: Simulated combined sewer overflows (throttle opening 100%), total combined sewer overflows from the simulated sewer network, with throttle function fully open

Scenario	Duration [days]	Rain Intensity [mm/d]	Combined Sewer Discharges [1000 m <sup>3</sup> ]		Reduction [%]
			Without Flush Protection	With Flush Protection	
0	7	0.00	5.4	4.8	11 %
1	7	0.72	5.8	5.2	10 %
2	7	1.47	28.3	25.9	8 %
3	7	2.14	22.1	16.4	26 %
4	7	2.90	350.0	272.3	22 %
5	7	3.79	165.5	159.0	4 %
6	7	4.29	146.8	137.5	6 %
7	7	5.21	240.1	284.4	-18 %
8	3	0.00	3.0	2.4	20 %
9	3	1.68	20.1	8.0	60 %
10	3	3.34	3.6	3.0	17 %
11	3	5.00	79.0	39.3	50 %
12	3	6.97	274.1	253.2	8 %
13	3	8.35	255.2	232.3	9 %
14	3	10.78	506.2	494.5	2 %
15	3	15.00	504.6	581.3	-15 %

In addition, it was found that a more uniform inflow situation to the sewage treatment plant could be achieved, which led to more stable process control of the sewage treatment plant, especially in the biological stages. This reduced the specific energy consumption per cubic metre of wastewater. There are also advantages from an ecological point of view: reduced discharge volumes from the sewer mean less pollution in water bodies, which in turn contributes to improving the condition of water bodies and complying with water law requirements. The approach shows that the intelligent use of modern process technology with predictive control and artificial intelligence in existing sewer infrastructures improves flow behaviour in the sewer and results in effective relief for sewage treatment plants – a pragmatic approach that can already be implemented today with less investment than a classic structural expansion and can be transferred to other municipalities [4].

**Conclusion.** The results of the project show that sewer operation adapted to extreme weather conditions and the additional relief of sewage treatment plants do not necessarily require the

construction of further expensive storage facilities or costly conversions in the sewer network, but can already be achieved with modern machinery and intelligent, dynamic control. The use of the CBR principle opens up new possibilities for systematically utilising empirical knowledge, linking it to real-time data and weather forecasts, and responding proactively to complex operating situations. The pilot application in Jena has shown that innovative technology can significantly reduce mixed water discharges, which not only offers ecological advantages but also contributes to more stable, energy-efficient and safer operation of the sewage treatment plant. It is particularly noteworthy that the approach developed remains adaptable in both technical and organisational terms, thus representing a transferable solution for many municipalities facing similar challenges. At a time of growing demands, dwindling resources and worsening climatic conditions, this form of intelligent sewer network management makes a practical, economical and sustainable contribution to sustainable water management.

### References.

- [1] UWWTD-E: *Directive of the European Parliament and of the Council on urban waste water treatment (recast)*. Brussels (2022). URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:52022PC0541>. Last accessed 19 September 2025.
- [2] DWA (German Association for Water, Wastewater and Waste): *Effects of climate change on water management – adaptation strategies for practical application*, DWA topics, Hennef, 2021.
- [3] Müller-Czygan, G. Sewer and network management: New impetus through digitalisation. *Automation Blue*. – 2016, No. 2, 20–25.
- [4] Müller-Czygan, G., Wiese, J., Tarasyuk, V., Tschepetzki, R. Energy savings at sewage treatment plants with case-based control (case-based reasoning). *INFORMATIK 2022. Artificial intelligence in environmental informatics (KIU-2022)*. Hamburg. – 26–30 September 2022, pp. 1447–1471. DOI: 10.18420/inf2022\_125.
- [5] Oeltze, H., Simancas Suárez, J. A., Wiese, J.: *Efficient sewer operation with the use of AI*. In: *Water and Waste*, Issue 05/2025, pp. 20–22.

## STRATEGY FOR APPLYING BESS AND CAES ENERGY STORAGE SYSTEMS IN SBR WASTEWATER TREATMENT PROCESSES

Mueller-Czygan G., Zhukova N.

*Institute for Sustainable Water Systems, University of Hof, Germany*

*e-mail:* [guenter.mueller-czygan@hof-university.de](mailto:guenter.mueller-czygan@hof-university.de), [natalia.zhukova@hof-university.de](mailto:natalia.zhukova@hof-university.de)

*Sequencing Batch Reactor* (SBR) technology is widely used in wastewater treatment plants (WWTPs) and is characterised by a cyclic aeration mode. These cycles cause fluctuations in electricity demand: during aeration, the power load rises sharply and then drops during the non-aeration phases like denitrification, sedimentation and clear water outlet. Aerobic biological treatment processes, based on activated sludge principles like Continuous Flow and SBR systems, are responsible for up to 70% of energy consumption. Of the total electricity demand at wastewater treatment plants [1]. Consequently, improving energy efficiency and flexibility of such facilities has a direct impact on efficiency and thus for sustainability of their operation. Against the backdrop of better utilization of renewable energies during periods of reduced sun activity (solar modules)

or calm winds (wind turbines), energy storage systems are considered a promising solution for compensating for lacks of available renewable energy or to take advantage of better tariffs when purchasing energy. With differentiated tariffs (day/night) or dynamic electricity prices, shifting part of the load from peak hours to night-time hours can significantly reduce costs [2]. Due to their inherent high operational flexibility, SBR wastewater treatment plants are very well suited for the optimal use of storage systems for effective energy management, as the cleaning process can be better adapted to the availability of renewable energies than continuous flow systems. The use of energy storage systems in SBR allows electricity to be accumulated during low tariff periods or when there is excess generation from renewable energy sources (RES), and during peak load hours, it can be used for aeration, thereby smoothing consumption from the grid and optimising costs during tariff periods.

**BESS and CAES for WWTPs.** Among energy storage technologies, the most common are battery energy storage systems (BESS) and compressed air energy storage (CAES) systems. Modern lithium-ion BESS have high efficiency ( $\approx 90\%$ ) and fast response times, which allows them to be used for *peak shaving* by using pre-stored energy. Studies show that up to 50% of the daily load of SBR systems can be shifted in time using storage devices without compromising the technological process [3]. The disadvantages of BESS remain high cost and limited lifetime under deep cycling conditions, i.e., when batteries are frequently charged and discharged with a large depth of discharge (DoD), which accelerates aging and reduces the number of usable cycles [4].

CAES, on the other hand, is characterised by a long service life and relatively low specific energy storage costs and do not suffer from self-discharge [2] and are therefore suitable for storing large amounts of energy. In the context of treatment facilities, where CAES is currently no standard solution, modified schemes have been proposed: local compressed air tanks integrated into the aeration system. The idea is to use compressors to produce pressed air and to store it in tanks when there is a surplus of PV energy and use the compressed air for aeration later during peak hours, reducing the electricity consumption of blowers [2]. In the study [2] by Cottés et al. (2020), storage pressure was found to have only a minor impact on the overall system efficiency and economic performance (NPV), while storage volume showed a dominant influence.

Recent studies indicate that combining different types of storage can have a synergistic effect on the treatment plant's energy system [2, 5]. The synergistic effect refers to the complementary interaction between different storage types: chemical or electrochemical systems providing fast response and short-term balancing, while mechanical storage (CAES) offers higher capacity and long-duration stability. In [2], Cottés et al. (2020) demonstrated that integrating CAES with biogas-based CHP units reduces grid dependency through smoother load profiles, whereas [5] describes a real wastewater treatment plant in Germany where a hybrid network of PV panels, biogas-fueled CHP units, BESS, and heat storage ensures continuous and flexible energy supply by combining electrical and thermal storage systems. In the context of SBR technology, such a hybrid strategy operates by using BESS to shift the electrical demand of aeration cycles away from high-tariff periods, while CAES compensates for short-term peaks in air consumption at the beginning of aeration phases. Thus, the coordinated use of both storage types enables maximum utilization of renewable energy and ensures stable operation of aeration under fluctuating inflow and tariff conditions. This approach aligns with the broader trend of digitalisation and smart-grid integration in wastewater treatment plants. As noted by Müller-Czygan et al. (2023) [6], advanced energy monitoring and adaptive control systems enable flexible and energy-efficient operation of WWTPs, supporting the transition towards intelligent, tariff-responsive plant management.

**Methodology and initial data (example of treatment plant Scheid).** To study the effectiveness of different energy storage strategies, the small Scheid treatment plant (Hesse, Germany) was selected, which is characterised by sharp seasonal load irregularities:  $\sim 500$  people live there permanently, while in summer the population, including tourists, reaches 3,500.

According to the operator's archive data, the months with the heaviest hydraulic and organic loads are May and August, when the average daily inflow ranges from ~75 to 314 m<sup>3</sup>/day. In the modelling, the data for these "peak" months were taken as representative of the maximum loads.

The Scheid treatment plant operates on an SBR scheme with two parallel reactors, SBR1 and SBR2. The cycle of each reactor includes the phases of filling, aerobic reaction, settling and discharge of treated water (Fig. 1).

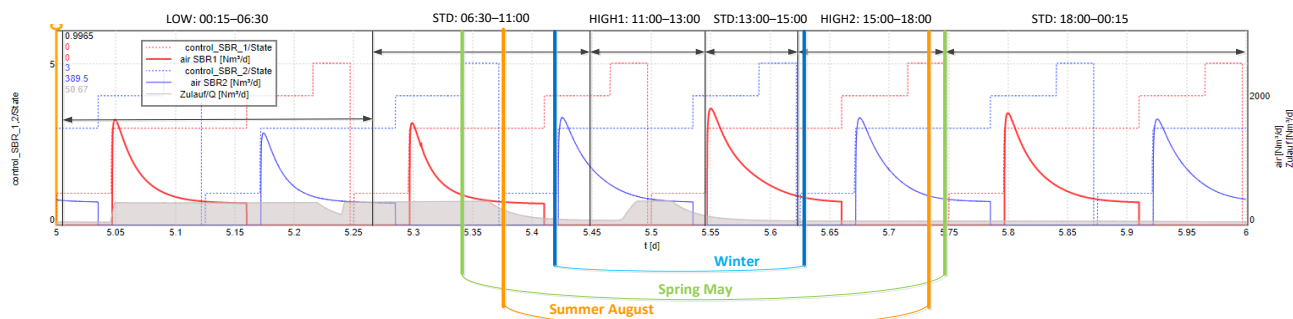


Fig. 1. Simulation of aeration for SBR 1 and SBR 2 at the Shayde wastewater treatment plant (Germany), tariff periods and seasonal distribution of solar generation. Results of a numerical experiment performed by the author in Simba 7 (Academic License license\_simba7)

When analysing the smoothing of the energy consumption profile and the reduction of energy costs, renewable PV energy sources and storage devices with the following parameters are used:

- a 58 kW<sub>p</sub> photovoltaic (PV) installation located on the roof of the treatment plant. For the latitude of Scheid, a specific output of ~950–1000 kWh per 1 kW<sub>p</sub> per year is assumed [7,8]. The seasonal distribution of solar generation is uneven: in the winter months, the panel produces only ~10–20% of its summer output. Peak daily power generation values at midday in summer can exceed the total power consumption of the plant, which opens the potential for charging storage devices from excess PV energy.

- BESS: a lithium-ion storage device with an effective capacity of 20 to 50 kWh is considered. The maximum charging/discharging power is 10 kW (limited by the inverter), with an average round-trip efficiency of ≈ 90%. The battery is controlled by a tariff peak smoothing strategy: charging occurs when there is excess PV energy or during cheap LOW hours, discharging occurs during HIGH tariff hours to cover part of the load. The 20-kWh capacity is commensurate with ~60% of the average daily energy consumption for aeration in winter, while 50 kWh is sufficient to store almost two days' worth of demand (which is relevant in summer when there is excess generation from PV).

- CAES: a 5.5 kW compressor charges a 6 m<sup>3</sup> steel tank ( $V_{air} \approx 55 Nm^3$ , 2→12 bar abs) in approximately 2 hours, consuming about 6 kWh of electrical energy for a full charging cycle. The stored compressed air can subsequently be supplied to the aeration tanks through the existing system, thereby reducing blower energy demand. The equivalent electricity savings when using the full volume of compressed air are estimated at only ~2.6 kWh. The low coefficient (≈27%) is due to irreversible losses due to compression heat dissipation, but the energy of compressed air allows sharp peaks in air consumption to be cut. Compressed air is supplied at times when the required performance of the blowers briefly exceeds their nominal capacity. Table 1 below provides a comparative summary of the strategies.

Table 1. Energy balance of the Scheid SBR station by season

Indicator	Unit	Winter (Jan)	Spring (May)	Summer (Aug)
PV production	kWh/day	17	40	145
Energy demand (aeration)	kWh/day	30	30	30
Self-consumption (PV → aeration)	kWh/day	6	13	11
Energy import (Grid → aeration)	kWh/day	24	17	19
Energy storage – BESS (charging)	kWh/day	5 (partial charge)	20 (full charge)	20–50 (possible expansion)
Energy storage – CAES (charging)	kWh/day	6 (full charge)	6 (full charge)	12 (2 charging cycles)
Energy export (PV → Grid)	kWh/day	0	1	72–102
Use of storage devices	–	CAES at peak air consumption rates ( $\approx 1.2$ hours)	BESS + CAES, covering expensive windows	BESS + CAES, double charging and discharging
Coverage of PV share of aeration requirements	%	$\sim 20$	$\sim 43$	$\sim 37$
Key findings for the season	–	PV partially covers expensive windows, CAES reduces peaks	PV covers expensive windows, surplus charges BESS+CAES	PV covers daytime ventilation; surplus goes entirely to storage and the grid

Thus, analysis of management strategies has shown that BESS and CAES perform fundamentally different but complementary functions in the energy management of SBR stations. The main role of CAES is to ensure the quality of transition processes and compensate for short-term consumption peaks that occur at the beginning of aeration phase. Due to the instantaneous release of compressed air, CAES allows compressors to be unloaded during periods of sharp increases in consumption, smoothing out peak loads and stabilising the consumption profile. BESS, on the other hand, is effective for covering long load cycles throughout the day — it accumulates energy during periods of low tariffs or excess generation and provides power for aeration during hours of high electricity costs. It should be noted that, in the pilot setup for the Scheid WWTP, the CAES unit is dimensioned only for a partial airflow stream (6 m<sup>3</sup> at 2–12 bar abs), serving as a short-term pneumatic buffer rather than a plant-wide storage system. Thus, the hybrid BESS + CAES strategy combines the advantages of both technologies: CAES performs local dynamic airflow equalisation and reduces instantaneous power peaks, while BESS provides energy-intensive daily balancing and fine-tuning according to tariff and technological conditions.

## References

1. Hamawand, I. Energy Consumption in Water/Wastewater Treatment Industry—Optimisation Potentials. *Energies*. - 2023, No. 16(5).
2. Cottes M., Mainardis M., Goi D., Simeoni P. Demand-Response Application in Wastewater Treatment Plants Using Compressed Air Storage System: A Modelling Approach. *Energies* - 2020. No. 13(18).
3. Musabandesu, E., & Loge, F. Energy Cost Optimisation in a Wastewater Treatment Plant by Balancing On-Site Electricity Generation with Plant Demand. *Energies*. - 2021, No. 14(19).
4. Moyo, P. Eskom's Flagship Battery Energy Storage Systems (Bess); EE Publishers (Pty) Ltd.: Muldersdrift, South Africa, 2018.
5. ABB technology at the core of an energy-intelligent wastewater treatment plant in Germany. Available online: [ABB technology at the core of an energy-intelligent wastewater treatment plant in Germany | News center](#) (accessed: 15 October 2025).
6. Müller-Czygan, G.; Wiese, J.; Fischer, R.; Zenke, R; Frese, A. & Frigger, M. (2023). Innovative Steuerung und Energiemonitoring sichert effizienten Kläranlagenbetrieb, auch während Pandemiezeiten. In: Lyko, H. (Hrsg.): Digitalisierung in der Wasserwirtschaft. Essen: Vulkan-Verlag, S. 74-78
7. Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS): [joint-research-centre.ec.europa.eu/joint-research-centre.ec.europa.eu](#). Used to calculate average monthly generation based on coordinates (51.18°N, 9.01°E), tilt angle and system losses. (accessed: 15 October 2025)
8. Recent Facts about Photovoltaics in Germany 2025 [ise.fraunhofer.de](#) (accessed: 15 October 2025)

## MODERN METHODS OF SEWAGE SLUDGE DISPOSAL IN THE CONTEXT OF WATER RESOURCE PROTECTION

*M. Myszura-Dymek<sup>1</sup>, J. Gmitrowicz-Iwan<sup>1</sup>, B. Futa<sup>1</sup>, I. Kamińska<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Institute of Soil Science, Environmental Engineering and Management, University of Life Sciences in Lublin, Poland, [magdalena.myszura-dymek@up.edu.pl](mailto:magdalena.myszura-dymek@up.edu.pl), <sup>2</sup>Faculty of Environmental Engineering and Energy, Lublin University of Technology, Lublin*

Sustainable water resource management is a key element in ensuring access to safe drinking water and protecting the environment in an era of growing population and climate change. Improper wastewater treatment leads to the degradation of aquatic ecosystems and poses a threat to public health. Therefore, it is essential to implement modern and effective sewage sludge disposal methods that reduce pollution and recover water and raw materials. The aim of this paper is to review the latest research and technologies in the field of sewage sludge disposal, with particular emphasis on its role in protecting water resources. The analysis indicates that the development and dissemination of advanced treatment technologies, such as reverse osmosis, ultrafiltration, and ozonation, are crucial for increasing process efficiency and wastewater reuse. Combining biological methods with membrane technologies has yielded particularly promising results, enabling the near-complete removal of pathogens, heavy metals, and organic compounds.

The implementation of innovative technological solutions must be coupled with the strengthening of national and international water quality standards, including the effectiveness of treatment processes and the safety of wastewater reuse. Water recycling and creating sustainable sources of water are an important element of the strategy to reduce pressure on natural water resources and respond to the growing demand for water in the municipal, agricultural and industrial sectors.

## **DRINKING WATER DISINFECTION: A REVIEW OF MODERN METHODS**

*Pokovba Yana, Tverdokhlib Mariia*

*Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, 03056, Ukraine*

**e-mail:** *m.tverdokhlib@kpi.ua*

This study critically reviews various methods of drinking water disinfection, analyzing their advantages and limitations to ensure the epidemiological safety of the population. The article discusses modern disinfection methods such as ozonation, ultraviolet irradiation, and the use of nanoparticles, as well as their effectiveness and associated challenges. The promising nature of combined disinfection methods, such as chlorination and UV irradiation, is emphasized for increasing effectiveness and reducing the formation of harmful byproducts. Although novel technologies have great potential for destroying pathogenic microflora, their high operational cost and maintenance remain a significant barrier to large-scale implementation. Modern disinfection strategies must be adapted to specific conditions, and ongoing scientific research is aimed at developing safer and more effective approaches.

Ensuring access to safe drinking water is one of the goals of sustainable development and a critical component of public health protection. Pollution of rivers and other water sources by industrial and domestic wastewater significantly increases the risk of infectious diseases. Effective and reliable disinfection of water is essential to minimize these epidemiological risks. However, the increasing resistance of microorganisms to traditional disinfectants necessitates the search for innovative and more effective water treatment solutions. Therefore, the aim of this study is to provide a critical review of various disinfection methods and to highlight some of their advantages and limitations associated with their use.

Providing access to safe drinking water is crucial for public health, regardless of whether water is used for drinking, domestic use, food production, or recreational purposes. Pollution of water bodies with wastewater leads to decreased water quality and increased health risks due to the spread of pathogens [2].

Bacteriological indicators of drinking water quality are among the most important criteria for assessing its safety for human health. Contamination of water with pathogenic microorganisms can lead to the occurrence of infectious diseases, including cholera, dysentery, hepatitis A, leptospirosis, and other waterborne illnesses. That is why regulatory documents, such as the State Sanitary Norms and Rules in Ukraine, as well as international recommendations, including EU Directive 98/83/EC and the standards of the World Health Organization (WHO), establish strict requirements for the microbiological composition of drinking water [1].

According to WHO guidelines and national standards of Ukraine, drinking water must be free of pathogenic microorganisms and harmful chemical or radiological substances in concentrations that pose risks to human health [3]. Among all potential contaminants, microbiological threats are considered the most dangerous [4].

Disinfection is a critical stage of water treatment aimed at eliminating pathogenic organisms responsible for diseases such as hepatitis, cholera, and other intestinal infections. The choice of disinfection method depends on raw water quality, pathogen types, regulatory standards, and

economic factors. Key requirements for disinfection systems include high efficacy, reliability, safety, and minimal environmental impact [5].

One of the key challenges is the growing resistance of microorganisms to conventional disinfectants. In Ukraine, chlorine-based disinfectants are most commonly used, but they have limitations, including the formation of harmful disinfection by-products (DBPs) and lower effectiveness against certain resistant microorganisms [6].

Modern disinfection methods being explored include:

**Ozonation:** Highly effective against a broad spectrum of pathogens but requires complex infrastructure.

**Ultraviolet (UV) irradiation:** Efficient for bacteria and viruses, though less effective against spores.

**Combined methods:** Integration of different disinfection techniques to enhance effectiveness and reduce risks.

**Nanotechnology:** Use of silver and copper nanoparticles showing high bactericidal activity, though concerns remain about potential health and environmental impacts.

Promising is the combination of different water disinfection methods, such as ozonation and UV irradiation, chlorination and ozonation of water, and a combination of membrane methods and UV irradiation.

In recent years, there has been a significant increase in the use of gaseous chlorine dioxide as a disinfectant for drinking water. The advantage of chlorine dioxide is that it reduces the formation of harmful halogenated disinfection byproducts; however, at concentrations of 0.5 mg/L, it also forms chlorites and chlorates, and can affect taste and odor. As a disinfectant, chlorine dioxide is advisable to use for pre-oxidation or in combination with sodium hypochlorite to reduce the formation of chlorite and chlorate, as a high dose of chlorine dioxide can lead to water toxicity [7].

Novel disinfection technologies have great potential for destroying pathogenic microflora and viruses in water. By using the synergistic effect of different disinfection methods, their disadvantages can be leveled out, and the formation of hazardous byproducts can be reduced. For example, to reduce the formation of toxic disinfection byproducts but increase virus inactivation, UV irradiation can precede chlorination, and this will reduce the amount of chlorine consumed. However, the main disadvantage is the high cost of operating various equipment and its maintenance. Furthermore, the feasibility of applying these combined technologies in large-scale water treatment plants still hinders the industrial-scale implementation of these methods, despite their advantages. The problem of drinking water disinfection is complex and interdisciplinary. Ongoing scientific research aims to improve current technologies and develop safer, more effective approaches. There is no universal solution; therefore, disinfection strategies must be adapted to specific conditions. Continuous improvement of water treatment technologies and public awareness are vital for ensuring access to safe drinking water.

## References

1. UNICEF and WHO. Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000–2020. 2021.
2. World Health Organization. Drinking-water: Key facts. WHO, 2022.
3. ДСТУ ISO 24510:2008. Activities relating to drinking water and wastewater services. Guidelines for the assessment and improvement of the service to users.
4. Bartram, J., Cairncross, S. Hygiene, sanitation, and water: forgotten foundations of health. *PLoS Medicine*, 2010, 7(11), e1000367. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000367>
5. Bitton, G. Wastewater Microbiology. 4th Edition. *Wiley-Blackwell*, 2010.

6. Richardson, S.D. Disinfection by-products and other emerging contaminants in drinking water. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2003, 22(10), 666-684. [https://doi.org/10.1016/S0165-9936\(03\)01003-3](https://doi.org/10.1016/S0165-9936(03)01003-3)

7. Lanrewaju, A. A., Enitan-Folami, A. M., Sabiu, S., Swalaha, F. M. A review on disinfection methods for inactivation of waterborne viruses. *Frontiers in microbiology*, 2022, 13, 991856. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.991856>

## LIGNIN-DERIVED SORBENTS FOR THE REMOVAL OF CONTAMINANTS FROM WATER

*Nataliia Smyk<sup>1</sup>, Olena Sevastyanova*

<sup>1</sup>*Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine, [nataliiasmyk@knu.ua](mailto:nataliiasmyk@knu.ua)*

<sup>2</sup>*KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden*

**Background:** Lignin, a highly abundant by-product of pulp- and biorefinery operations, often constitutes up to 40 % of the dry mass of lignocellulosic feedstocks. Its under-utilisation represents both a waste challenge and an opportunity for valorisation. Heavy metal ions (e.g., Fe<sup>3+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, Cr(VI)) are persistent water-borne contaminants arising from industrial processes, and their removal remains a major challenge in water treatment. The aromatic, three-dimensional polymeric nature of lignin, enriched with hydroxyl and carboxyl functional groups, suggests potential as a low-cost sorbent for heavy metal remediation.

**Methods:** Different technical lignins were investigated: Kraft lignins derived from spruce and eucalyptus (both in native and methacrylated form), Organosolv spruce lignin, and a commercial alkali lignin. Comprehensive structural characterisation included elemental analysis, <sup>31</sup>P NMR quantification of OH and COOH groups, and gel permeation chromatography for molecular weight distribution. Batch adsorption experiments were conducted for Fe(III), Cu(II), Zn(II), and Cr(VI) ions under varying pH, contact time and initial concentration. Adsorption isotherms were analysed via the Langmuir model to assess sorption capacity and binding affinities.

**Results:** Under optimal conditions, removal efficiencies of up to ~93 % were achieved for chromate, copper, zinc and ferric ions. The sorption capacity correlated not only with the content of polar functional groups but also with the supramolecular structure of lignin—its mesh-like three-dimensional network and polydispersity. Methacrylated Kraft lignins exhibited enhanced sorption compared to unmodified samples, likely due to improved accessibility of active sites and modified hydrophilicity. Organosolv lignin also showed strong performance, attributable to its lower molecular weight and higher phenolic hydroxyl concentration. Kinetic studies indicated rapid initial uptake, with adsorption reaching equilibrium in a relatively short time. The optimal pH range was slightly acidic to neutral, correlating with favourable ion-speciation and lignin functional group ionisation.

**Conclusions:** Lignin-derived materials present a sustainable and cost-effective alternative to conventional synthetic sorbents for heavy metal removal from aqueous streams. Their structural tunability and abundance render them promising candidates for integration into water-treatment processes. Future work will focus on regeneration performance, composite sorbent design and the extension of this approach to other contaminant classes.

# STUDY ON THE SEPARATION OF SURFACE-ACTIVE AGENTS IN THE AQUATIC ENVIRONMENT

*Petru Spataru*

*Institute of Chemistry, Moldova State University, Chisinau, Republic of Moldova*

## Abstract

Laboratory simulations with surfactant-polluted water from the Dniester and Prut rivers initiated with  $\text{NH}_4^+$  ions demonstrated an acceleration of the conversion to nitrates, approximately four to seven times faster than in reference samples, when granulated granite or expanded clay was applied. In contrast,  $\text{CaCO}_3$  particles caused a visible inhibition for the same samples, while in the water of the Isnovat River, characterized by a higher organic matter content, the same procedure enhanced ammonium oxidation. UV spectral investigations were conducted using aqueous solutions of anionic, nonionic, and cationic surfactants individually and in mixtures at various ratios ( $\sim 10^{-5}$  mol/L, near the critical micelle concentration), recorded with PerkinElmer Lambda 25 and UV 2005 SELECTA spectrophotometers. The UV spectra confirmed formation of SAA anionic–SAA cationic complexes. Cationic surfactant activity in natural waters depends on the organic matter index, reflecting the anionic character of the sample. Separation of cationic surfactants using  $\text{CaCO}_3$  can be achieved by applying an excess of anionic surfactant (SAA An/SAA Ct > 1), while expanded clay completely adsorbs cationic surfactants. The expanded clay substrate adsorbs on its surface completely cationic AAS. The accelerated ammonium-to-nitrate conversion in the presence of expanded clay and granite suggests catalytic effects of mineral surfaces enhancing adsorption and oxygen transfer. These results provide insights into surfactant behavior and ammonium oxidation in natural waters.

**Keywords** Surfactants; laboratory simulations; ammonium oxidation; separation process; organic matter; calcium carbonate; expanded clay adsorbent

## 1. Introduction

Laboratory simulations using river or lake water have shown that specific substrates can accelerate ammonium oxidation (nitrification), while  $\text{CaCO}_3$  particles inhibit it, raising interest in understanding these processes. Investigations on the Nistru and Prut rivers revealed a four- to sevenfold acceleration when small granite granules or expanded clay were added to water samples. Model experiments with river water contaminated by surfactants demonstrated varying inhibition of ammonium oxidation. Nitrite oxidation proved highly sensitive to environmental conditions; for example, the maximum nitrite concentration ratio in samples with and without  $\text{CaCO}_3$  (Nistru River, Varancau) differed by nearly two orders of magnitude, indicating surfactant pollution. In contrast, ammonium oxidation in the Cunicea stream, free of synthetic surfactants, was unaffected by  $\text{CaCO}_3$ , confirming the system's sensitivity to surfactant presence, type, and concentration [1,2]. Heterotrophic bacteria showed distinct growth patterns: a single growth peak on days 30–35 with cationic surfactants alone, and two peaks (days 12 and 30) with both cationic and anionic surfactants, suggesting environmental toxicity or nutrient limitation influenced development [3]. Further studies in urban-polluted rivers demonstrated that  $\text{CaCO}_3$  improved water quality, especially in samples with high organic matter, such as the Isnovat River (Ialoveni).

Anionic and nonionic surfactants were relatively non-toxic, whereas quaternary ammonium salts were more harmful. These findings highlight the need to consider anionic-to-cationic surfactant ratios and interactions with mineral substrates when evaluating environmental impacts. Mineral substrates and surfactant composition significantly influence ammonium oxidation dynamics. Clay and granite fractions accelerate oxidation via surface-mediated catalytic effects, while  $\text{CaCO}_3$  inhibits the process. Surfactant contamination, particularly by cationic species, affects chemical equilibria and microbial activity, altering nitrification rates. Understanding these heterogeneous interactions is essential for designing water treatment strategies to minimize surfactant toxicity and enhance water quality.

## 2. Materials and Methods

Aqueous solutions containing anionic, nonionic, and cationic surfactants were prepared individually and in binary mixtures at various molar ratios. The total surfactant concentration was maintained near  $10^{-5}$  mol L<sup>-1</sup>, below the critical micelle concentration. The systems were analyzed spectrophotometrically to evaluate surfactant interactions and complex formation. UV spectra were recorded using Perkin Elmer Lambda 25 and UV-2005 SELECTA spectrophotometers under identical optical and temperature conditions.

## 3. Results and Discussion

UV spectra of N-CPy (N-cetylpyridinium) with LS (lauryl sulfate) showed consistent absorbance changes depending on the anionic-to-cationic surfactant ratio (SAA An/Ct) rather than total N-CPy concentration (Fig. 1). Adding LS increased absorbance to a maximum, then decreased with further anionic surfactant addition, identifying the optimal ratio for stable complex formation. For CTMA and TBA, the ratio effect persisted only when cationic surfactant exceeded the anionic amount; inverse ratios yielded similar spectral curves, indicating compact surfactant aggregation. After CaCO<sub>3</sub> sedimentation, most surfactant complexes were removed, except in the LS + 2N-CPy system, where some N-CPy remained in solution. This indicates that part of the anionic surfactant neutralizes CaCO<sub>3</sub> surface charges, forming stable SAA An·SAA Ct complexes, while leaving excess cationic surfactant in solution. Spectral data allow estimation of carbonate particle surface charge, and lower pH enhances LS dissociation and partial complex decomposition. Treatment with expanded clay demonstrated complete adsorption of cationic surfactants, confirming its potential for selective removal of charged organic compounds. These results highlight that surfactant–substrate interactions are governed primarily by electrostatics and adsorption. Preferential adsorption of cationic surfactants onto negatively charged substrates such as clay underscores the competitive nature of surface binding in heterogeneous aqueous systems.

## 4. Conclusions

UV spectra confirmed SAA An·SAA Ct complex formation, showing strong interactions between anionic and cationic surfactants in water. Cationic surfactant activity depends on the organic matter index, reflecting anionic content. Separation using CaCO<sub>3</sub> requires an anionic excess (SAA An/SAA Ct > 1), while expanded clay completely adsorbs cationic surfactants, highlighting its efficiency as a low-cost adsorbent.

These findings emphasize the importance of substrate type, surfactant ratios, and solution chemistry in controlling surfactant behavior in natural and engineered systems. Understanding these mechanisms supports the design of targeted remediation strategies for rivers, lakes, and wastewater systems, mitigating surfactant effects on ammonium oxidation and nitrification, and improving water quality.

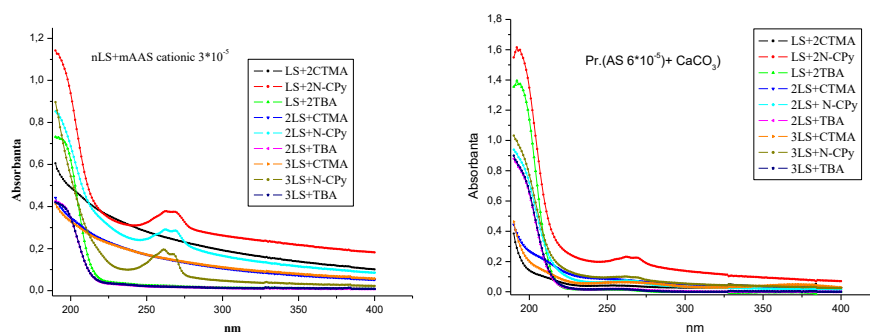


Fig. 1. UV spectra of solutions containing LS with CTMA, NCPy, or TBA at a concentration of  $3 \cdot 10^{-5}$  mol/L, and of solutions containing LS with CTMA, NCPy, or TBA at a concentration of  $6 \cdot 10^{-5}$  mol/L in the presence of CaCO<sub>3</sub>.

## References

1. Spataru P., Povar I., Mosanu E., Trancalan A. (2015) Study of stable nitrogen forms in natural surface waters in the presence of mineral substrates. *Chem J Moldova* 10:26–32
2. Spataru P., Fernandez Francisco, Povar I., Spataru T. (2019) Behavior of Nitrogen Soluble Forms in Natural Water in the Presence of Anionic and Cationic Surfactants and Mineral Substrates. *Advances in Sciences and Engineering* 11,2, p 70-77.
3. [Spataru P. \(2011\) Transformations of organic substances in surface waters of the Republic of Moldova](#). PhD thesis (in Romanian)

## SUSTAINABLE LOW ENERGY TREATMENT OF MUNICIPAL SLUDGE THROUGH MESOTHERMOPHILIC AEROBIC ANAEROBIC PROCESSING

*Spataru Petru, Visnevschi Alexandru, Spinu Oxana, Povar Igor\**

*Institute of Chemistry, Moldova State University, Chisinau, Republic of Moldova*

*\*Corresponding author: ipovar@yahoo.ca*

### Abstract

The sustainable management of municipal wastewater sludge remains a critical environmental and operational challenge, especially in rapidly urbanizing areas. Conventional sludge treatment methods such as open air drying and chemical dewatering are increasingly unsustainable because of high energy use, odor emissions, and limited opportunities for resource recovery. This study introduces a meso-thermophilic aerobic anaerobic treatment (AAMT) process designed to improve sludge stabilization and dehydration with minimal energy input and without chemical additives. A pilot scale thermally insulated reactor was constructed to process mixtures of raw sediment and excess activated sludge in different ratios. Laboratory results showed that optimal mixtures containing 25 to 35 percent raw sediment and 65 to 75 percent activated sludge achieved more than 70 percent water separation efficiency. The process operated at 38-41 °C, sustained by its exothermic microbial activity, which significantly reduced external energy demand. The activity of nitrites and nitrates actually helps reduce odor by oxidizing hydrogen sulfide (H<sub>2</sub>S) and organic thiols, while aeration mainly serves for mixing rather than oxidation. Chemical analyses confirmed that the solid fraction retained valuable nutrients such as nitrogen, phosphorus, and potassium while meeting the heavy metal limits specified in EU Directive 86/278/EEC, making it suitable for agricultural use as a soil conditioner or fertilizer. The AAMT process reduces the need for flocculants, decreases the volume of sludge for transport and disposal, and extends the service life of dewatering infrastructure. Overall, the proposed method provides a sustainable and environmentally sound solution for wastewater treatment facilities aiming to lower operational costs, recover useful resources, and minimize ecological impacts. It combines energy efficiency, nutrient recycling, and odor control into a single approach that supports circular economy and green technology goals.

**Keywords** Municipal sludge; Meso-thermophilic aerobic anaerobic treatment; Low energy process; Wastewater management; Resource recovery; Circular economy; Sustainable sludge stabilization

### 1. Introduction

The treatment and disposal of sewage sludge generated in municipal wastewater treatment plants represent a growing environmental and economic concern worldwide. The large volume and high moisture content of sludge make it difficult and costly to handle, transport, and dispose

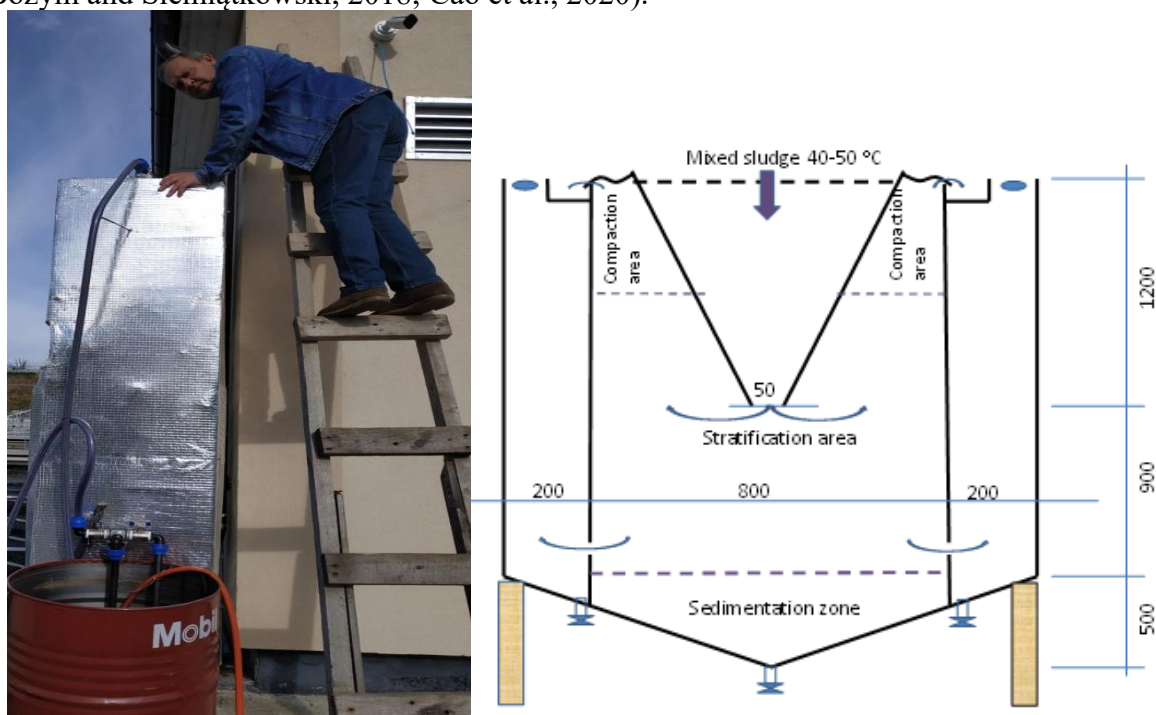
of. Conventional methods such as open air drying, mechanical dewatering, and chemical conditioning are energy intensive and may produce secondary pollution. In recent years, sustainable sludge management approaches have gained attention, aiming to minimize energy use while recovering nutrients and organic matter for agricultural or industrial reuse (Andreoli et al., 2007; Wu et al., 2020).

## 2. Materials and Methods

A pilot scale installation (Fig. 1) was designed for meso-thermophilic aerobic anaerobic sludge treatment. The reactor consisted of a thermally insulated cylindrical chamber equipped with an aeration unit and temperature monitoring system. Raw sediment and excess activated sludge from a municipal wastewater treatment plant were mixed at different ratios and introduced into the reactor. The temperature was maintained near 38–41 °C, sustained by biological heat generation. Samples were taken periodically to analyze physicochemical parameters including moisture content, nutrient composition, and heavy metal concentrations according to ISO and SM SR standards (ISO 5664:2007; SM SR EN ISO 6878:2011).

## 3. Results and Discussion

The AAMT process effectively enhanced sludge dewatering and stabilization. The optimal mixture of 25 to 35 percent raw sediment and 65 to 75 percent activated sludge achieved the highest water removal efficiency of over 70 percent. The meso-thermophilic conditions supported microbial activity while maintaining stable fermentation, resulting in a self-sustaining process with low energy input (Kim et al., 2002). The aeration phase reduced odors and promoted oxidation of organic matter, improving the quality of the final biosolid. The treated sludge exhibited nutrient-rich composition suitable for use as fertilizer, and heavy metal contents were below EU limits (Bożym and Siemiątkowski, 2018; Cao et al., 2020).



**Fig. 1.** A pilot scale installation designed for meso-thermophilic aerobic anaerobic sludge treatment.

#### 4. Conclusions

The meso-thermophilic aerobic anaerobic treatment of organic wastewater sludge provides a sustainable, low energy, and cost-effective solution for municipal wastewater management. The method ensures efficient dehydration, odor control, and nutrient recovery while eliminating the need for chemical additives. The resulting stabilized sludge meets safety standards for agricultural reuse, offering an environmentally responsible option consistent with circular economy principles. Further research will focus on scaling up the technology and optimizing operational parameters under real-world conditions.

#### References

1. Andreoli, C.V., Von Sperling, M., Fernandes, F., & Ronteltap, M. (2007). Sludge treatment and disposal. IWA Publishing, London, 241 p.
2. Bożym, M., & Siemiątkowski, G. (2018). Characterization of composted sewage sludge during the maturation process: a pilot scale study. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(34), 34332–34342. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3335-x>
3. Cao, B., Zhang, T., Zhang, W., & Wang, D. (2021). Enhanced technology based for sewage sludge deep dewatering: A critical review. *Water Research*, 189, 116650. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116650>
4. Kim, M., Ahn, Y.H., & Speece, R.E. (2002). Comparative process stability and efficiency of anaerobic digestion: mesophilic vs. thermophilic. *Water Research*, 36(17), 4369–4385. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00147-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00147-1)
5. Wu, B., Dai, X., & Chai, X. (2020). Critical review on dewatering of sewage sludge: Influential mechanism, conditioning technologies and implications to sludge reutilizations. *Water Research*, 180, 115912. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115912>

### OPTIMISATION OF A MICROWAVE PRETREATMENT OF ORANGE WASTES FOR IMPROVING BIODEGRADABILITY

*A. Szaja<sup>1</sup>, I. Bartkowska<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Faculty of Environmental Engineering and Energy, Lublin University of Technology, Nadbystrzycka 40B, 20–618 Lublin, Poland*

*<sup>2</sup>Department of Water Supply and Sewage Systems, Faculty of Civil Engineering and Environmental Sciences, Białystok University of Technology, 15–351 Białystok, Poland*

Among the various organic wastes generated by food industry, the residues from orange juice production constitute a significant technological and environmental problem. During the juice processing, more than half of fruit becomes a waste, which consists of seeds, fibres and peels. Due to significant organic content and high humidity, their properties deteriorate quickly; moreover, they contain essential oils that might hinder biological processes. Another problematic factor is the presence of lignocellulose that constitutes a complex structure which makes their further use difficult. On the other hand, orange wastes indicate a potential for energy production in the anaerobic digestion process. Therefore, this type of waste should be pre-treated to improve biomass structure, making it more susceptible to bioconversion. The pre-treatment strategy should reduce biomass crystallinity, eliminate lignin, prevent sugar degradation, and should not contribute to the formation of inhibitors. Additionally, the energy aspect should be considered.

Currently, among various physical methods microwave irradiation gains more attention. Numerous studies has confirmed the effectiveness in breaking the complex lignocellulose structure, thus improving biomass availability for microbial action in biological processes. This technique presents several advantages, such as high specificity for selective heating and rapid processing. As compared to other pre-treatment methods, microwave irradiation generates fewer inhibitors of biological processes and indicates significant flexibility due to the ease of combining with other methods. However, there are still few installations operating on a technical scale. This is mainly due to the large investment costs.

The work presents optimisation studies pertaining to the microwave pre-treatment of orange wastes for improving biodegradability. Microwave pre-treatment was conducted using an Advanced Microwave Digestion System provided by ETHOS EASY equipped with two 950 W magnetrons for a total of 1900 W. The adopted operational parameters were as follows: temperature of  $T = 50^{\circ}\text{C}$ , input power of  $P = 900\text{ W}$ . The following time intervals were evaluated: 0, 3, 5, 10, 20 and 30 min, which corresponded to the following energy use of 37.7, 62.8, 125.6, 251.2, and 376.7 MJ/kg, respectively.

The obtained results indicated that use of microwave pre-treatment led to destruction of organic matter expressed as COD (chemical oxygen demand), TS (total solids) and TOC (total organic carbon). With regard to COD, this parameter was reduced by 10-15%, TS by 8-12%. In the case of TOC, a minor effect was observed. Simultaneously, solubilisation was noted, the increases of sCOD (soluble chemical oxygen demand) and DOC were observed. The sCOD parameter was enhanced by 14-33%, whereas DOC by 8-18%. Additionally, the biodegradability index expressed as the DOC/TOC ratio was also improved by 8 – 17%, as a result of microwave pre-treatment. Among all the cases considered, the most favourable effect was recorded for a time of 5 minutes. Therein, the highest improvement in biodegradability was achieved with the lowest energy consumption.

## **POLLUTION OF STORMWATER FROM URBAN AREAS: RESEARCH, MONITORING, AND NEW MEASUREMENT METHODS**

*Edyta Wojtaś, Justyna Kujawska, Grzegorz Łagód*

*Lublin University of Technology, Faculty of Environmental Engineering and Energy, Poland*

*e-mail: e.wojtas@pollub.pl*

Water is a key element of life on Earth. As a good solvent, it provides organisms with essential nutrients and minerals. Although 2.5% of the Earth's water resources consist of freshwater, only about 1% is suitable for consumption. Therefore, the rational management of water resources is of great importance—particularly in urban environments, where limited resources or uneven temporal distribution make a well-organized water and wastewater management system essential. The water and sewage system is one of the pillars of environmental management in cities. It includes, among others, water supply and sewage networks, wastewater treatment plants, water treatment stations, retention tanks, and installations for the drainage and retention of stormwater.

These components directly affect the condition of aquatic environments, and their improper functioning—such as failures or leaks—can lead to contamination of available water resources. Stormwater drainage systems form an important part of urban infrastructure, responsible for removing rainwater and meltwater. Their main task is to ensure the safe and rapid removal of water from the surfaces of urban catchments, thus preventing local flooding and urban inundation. These waters flow from roofs, roads, squares, sidewalks, parking lots, and industrial areas, carrying

pollutants usually present as suspended solids, as well as heavy metals, petroleum compounds, and nutrients. Although stormwater drainage systems are not intended for the discharge of domestic wastewater, they are an important source of pollutants entering rivers, lakes, and retention reservoirs. Rainwater washes various organic substances and pathogens from urban surfaces.

Therefore, monitoring the quality of stormwater is becoming increasingly important—both from an environmental protection perspective and in terms of compliance with water legislation. Regular testing of stormwater quality makes it possible to identify pollution sources, assess the efficiency of treatment devices (e.g., sedimentation tanks, separators), and adjust stormwater management strategies. Monitoring is also essential for the protection of surface and groundwater and for preventing eutrophication. Currently, a variety of analytical techniques are used in research—ranging from classical gravimetric and spectrophotometric methods to advanced instrumental analyses. The most commonly used include measurements of total suspended solids, determination of heavy metals (AAS, ICP), and photometric and conductometric analyses for nutrients, pH, and conductivity.

Although these methods are highly accurate, stormwater monitoring is challenging due to the irregularity of precipitation and the dynamic nature of the “first flush,” in which pollutant concentrations are the highest. For this reason, new automated solutions for remote monitoring of stormwater quality are being sought. A promising direction involves so-called **electronic senses**—such as the “*electronic tongue*” and “*electronic eye*.” Their advantages include the absence of chemical reagents and the ability to perform real-time measurements at low operational costs compared to traditional laboratory methods. Preliminary research was conducted on the campus of Lublin University of Technology, where the stormwater drainage system has a total length of 2,501.70 meters. Rainwater is discharged into the Bystrzyca River through pipes with diameters ranging from 0.16 m to 0.5 m. The network includes 144 inspection manholes and 73 storm inlets. Samples for analysis were collected from six points: three inlets (W14, W43, W51) and three manholes (D41, D79, D82), located near campus roads and parking areas. The obtained results will serve as reference data for the development of laboratory prototypes of an electronic tongue, enabling the detection of water pollution indicators based on signal analysis from multisensor arrays.

## APPLICATION OF IMMOBILIZED MICROORGANISMS FOR RESTORATION OF BIOLOGICAL WASTEWATER TREATMENT

*Zhukova V.*

*National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”,  
Ukraine, [zhukova.veronika@iit.kpi.ua](mailto:zhukova.veronika@iit.kpi.ua)*

Modern technologies for biological wastewater treatment are based on the use of microorganisms capable of biochemical decomposition of organic substances and nitrogen compounds. Activated sludge systems remain the most common, but they have several significant limitations, including the sensitivity of microbial communities to hydraulic and temperature fluctuations, instability to toxic impurities and the need for continuous energy supply. These disadvantages are especially critical for small treatment plants operating in seasonal or intermittent mode, when long shutdowns lead to loss of biological activity and the need to re-form the biocenosis after start-up, which can take from 2 to 4 weeks, requiring significant costs to provide the biological process with “fresh” activated sludge or restore the efficiency of activated sludge by long-term feeding [1].

Significant progress in water treatment biotechnology is associated with the development of systems in which microorganisms are immobilized on artificial carriers, forming a stable biofilm. Unlike free-floating activated sludge, immobilized consortia have increased resistance to stress conditions, and their biochemical activity can be maintained even during interruptions in wastewater supply [2].

Anhydrobiosis is the ability of some organisms to survive almost completely loss of water. Important biological agents of activated sludge are the nitrifying bacteria *Nitrosomonas* and *Nitrobacter*. Nitrifying bacteria are autotrophs and sensitive to environmental changes, including temperature, pH, oxygen, and water availability, unlike the spore-forming bacteria *Bacillus*. *Bacillus* spores are among the most resistant to desiccation, high temperatures, radiation, and chemicals of biological objects. They can remain viable for decades in a completely dried state, which is a classic example of anhydrobiosis. Nitrifying bacteria do not have natural mechanisms for surviving complete natural desiccation. However, they can tolerate moderate dehydration as part of a biofilm, where they are partially protected by a polysaccharide matrix that can hold small amounts of water, providing a buffer against complete dehydration. This allows them to survive at moderate humidity levels for a certain period [3].

The aim was to experimentally study the rate of biofilm recovery on a polymer carrier after a period of downtime. The main idea was to create a stable biofilm system that can maintain viability and functional activity during periods without load, which allows to reduce the reactivation time after restarting the treatment plants. Achieving this goal involves studying the processes of biofilm formation, preservation and recovery in laboratory conditions using consortia of microorganisms obtained from activated sludge of operating treatment plants.

The research was conducted at the Department of Bioenergy, Bioinformatics and Ecobiotechnology of Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. Immobilization of microorganisms on a polymer carrier was carried out using activated sludge collected at the Bortnytsky aeration station in Kyiv. The formed biofilm provided effective treatment of wastewater from organic matter and ammonium nitrogen. Then, the carrier with a surface area of 5255 cm<sup>2</sup> was moved to an empty bioreactor, where it dried naturally. After 3 months, a nutrient solution was added to the bioreactor with the dried carrier with the biofilm, the composition of which was calculated from the ratio BOD:N:P=100:5:1 to maintain the vital activity of biofilm microorganisms. The composition included glucose as a source of sugar, organic matter, sources of biogenic elements - nitrogen and phosphorus.

At the beginning of the recovery process, before adding the nutrient solution, the number of live cells was  $8,84 \cdot 10^4$  in 1 cm<sup>3</sup> of biofilm, which was determined using a cell counter Countess. Within a week, the value increased to  $3,01 \cdot 10^5$  live cells in the biofilm recovered on the carrier. During the studies, the sizes of live cells were within 3,78 – 8,54 μm, for comparison - in the working activated sludge the cell size is 9-12 μm. This indicates the absence of higher trophic levels, such as ciliates, rotifers, that the energy of the biomass is directed exclusively to the division and formation of the primary biocenosis. The percentage of live cells in the total number increases from 4 to 26% during the first week of recovery, which indicates the possibility of recovering naturally dried biofilm in a short period of time.

The number of cells increased 3,4 times in just the first week of recovery. The increase in the percentage of live cells to 26% indicates not only an increase in their number, but also the successful reactivation of a significant part of the population.

The tasks of further research will be to verify the efficiency of the restored biofilm, establish technological modes of operation of structures with immobilized microorganisms during the shutdown, stoppage and restart period, and optimize processes during this period to minimize its duration and save material and financial costs.

1. Grandclément, C., Seyssiecq, I., Piram, A., Wong-Wah-Chung, P., Vanot, G., Tiliacos, N., Roche, N., & Doumenq, P. (2017). From the conventional biological wastewater treatment to hybrid processes: The evaluation of organic micropollutant removal — A review. *Water Research*, 111, 297–317. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.01.005>
2. Zhukova V. New approaches to wastewater treatment of periodic operations Pure water. Fundamental, applied and industrial aspects (9-10 November 2023, Kyiv): proceedings of the VIII International Scientific and Technical Conference / Editors: Zhukova V., Koltysheva D. – 2023.– 47-48 p. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/62840>
3. Feng, L., Chen, K., Han, D., Zhao, J., Lu, Y., Yang, G., Mu, J., & Zhao, X. (2017). Comparison of nitrogen removal and microbial properties in solid-phase denitrification systems for water purification with various pretreated lignocellulosic carriers. *Bioresource Technology*, 224, 236-245. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.11.002>

## ПОРІВНЯННЯ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ МЕТОДІВ ОЧИСТКИ СТІЧНИХ ВОД МОЛОКОПЕРЕРОБНИХ ПІДПРИЄМСТВ

*Бабій Д. В., ст., Саблій Л. А., д.т.н., проф.*

*Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Україна, Київ, [babii.daria@lil.kpi.ua](mailto:babii.daria@lil.kpi.ua)*

Останніми роками в Україні суттєво зросло виробництво молочних і кисломолочних продуктів, а разом із цим — кількість молокопереробних підприємств. У процесі виробництва утворюються значні об'єми стічних вод, що містять органічні (жири, білки, цукри) та неорганічні (солі, кислоти, сода) домішки, залишки молочних продуктів і ПАР. Скидання таких вод без очищення призводить до дефіциту кисню у водоймах і загибелі риби. Фізико-хімічні методи очищення забезпечують ефективне видалення завислих речовин, емульгованих жирів і колоїдних частинок. Їхня основна перевага полягає у високій швидкості процесу та високій ефективності очищення [1].

Метою роботи є порівняння ефективності різних методів фізико-хімічного очищення стічних вод молокопереробних підприємств.

Коагуляція є одним із найважливіших фізико-хімічних методів очищення промислових стічних вод, що забезпечує зменшення вмісту колоїдних, завислих речовин і каламутності води. За оптимальної дози коагулянтів сульфату алюмінію та сульфату заліза 1000 мг/дм<sup>3</sup> при рН 5 ефективність видалення ХСК зі стічних вод молокопереробної промисловості становила 68% для сульфату алюмінію і 62% для сульфату заліза. Використання сульфату алюмінію в поєднанні з поліферосульфатом і поліакриламідом як допоміжних реагентів дозволило досягти 82% зниження ХСК за набагато нижчої дози — 100 мг/дм<sup>3</sup> [2]. При рН 6 для FeCl<sub>3</sub> та рН 7 для Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> оптимальна доза Al<sup>3+</sup> становила 188,4 мг/дм<sup>3</sup>, а ефективність видалення ХСК сягала 33%. Для Fe<sup>3+</sup> оптимальна доза дорівнювала 172,5 мг/дм<sup>3</sup>, а зниження ХСК — 45%. Таким чином, кращі результати очищення були отримані за використання FeCl<sub>3</sub> порівняно з Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> [3].

Метод коагуляції було використано для очищення модельних стічних вод молокопереробних підприємств за допомогою неорганічних коагулянтів, таких як поліалюмінійхлорид (РАС), сульфат заліза (FeSO<sub>4</sub>) та галун калієво-алюмінієвий (KAl(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>·12H<sub>2</sub>O) [4]. Експерименти проводили для оцінки впливу початкового рН (5–10) і дози коагулянту (100–5000 мг/дм<sup>3</sup>) на ефективність видалення ХСК. Оптимальне значення

pH становило 8,0 для всіх трьох реагентів, а оптимальні дози — 300 мг/дм<sup>3</sup> для PAC, 800 мг/дм<sup>3</sup> для FeSO<sub>4</sub> і 500 мг/дм<sup>3</sup> для KAl(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>·12H<sub>2</sub>O. За таких умов ефективність за ХСК через 30 хвилин контакту складала, %: 69,2, 66,5 і 63,8, відповідно [4].

Основними проблемами використання методу коагуляції є високі витрати реагентів, утворення великих об'ємів осадів та складність їх подальшої утилізації [1].

Електрокоагуляція є перспективною альтернативою традиційним методам хімічної коагуляції. У цьому процесі коагулянт утворюється *in situ* внаслідок електрохімічних реакцій, що відбуваються безпосередньо у водному середовищі [5]. Серед різноманітних методів очищення стічних вод електрохімічні методи, зокрема електрокоагуляція та електрокоагуляція-флотація, займають важливе місце завдяки низці переваг:

- значне зменшення або повне виключення використання хімічних реагентів;
- зменшення об'ємів утворених осадів;
- незаражувальна, коагулююча та флокулююча дія електричного струму;
- відсутність підвищення мінералізації води, що дозволяє використовувати очищену воду повторно;
- уніфікована й компактна апаратура, придатна для інтеграції з іншими очисними спорудами;
- зниження трудомісткості обслуговування та можливість автоматизації процесу [1].

Використання електрокоагуляції дозволяє отримати вищу ефективність видалення ХСК, БСК<sub>5</sub> і завислих речовин зі збільшенням напруги та тривалості процесу. За напруги 10 В показник ХСК зменшився з 6114,25 до 2405,96 мг/дм<sup>3</sup>, що відповідає приблизно 60,6% видалення; БСК<sub>5</sub> знизився з 2919,3 до 892,2 мг/дм<sup>3</sup> (близько 57,9%), а ефективність видалення завислих речовин становила приблизно 49,3% [6]. Попри численні переваги, електрокоагуляція має й певні недоліки. Основними проблемами є нестабільна робота установок при коливаннях складу та витрат стічної води, виділення вибухонебезпечних газів (водню та кисню), можливе утворення хлору та вільних радикалів, що можуть пригнічувати подальше біологічне очищення. Також метод характеризується відносно високими витратами електроенергії та пасивацією електродів [1].

Іноді для підвищення ефективності відокремлення фаз після коагуляції замість відстоювання застосовують флотацію. Флотація дозволяє швидко видаляти тонкодисперсні частинки, емульговані жири та легкі флокули, які не осідають при звичайному відстоюванні, що підвищує ефективність очищення і зменшує вміст завислих речовин в очищеній воді. Такий підхід також сприяє зменшенню об'єму осадів і покращує підготовку води до подальшої біологічної обробки. Порівняльний аналіз ефективності флотації з використанням розчиненого повітря (ФРП) та флотації з розчиненим озоном (ФРО) для очищення стічних вод молочної промисловості показав, що обидва методи забезпечують високе зниження показників забруднення, проте ФРП демонструє кращі результати. Для найбільш забрудненої проби стічних вод (ХСК 8876 мг/дм<sup>3</sup>) метод ФРП забезпечив видалення ХСК на рівні 74,8%, БСК — 85,9%, завислих речовин — 92,6%, жирів — 94,9%, загального азоту - 77,7%, загального фосфору — 39,2%. За тих самих умов метод ФРО показав дещо нижчі показники: видалення ХСК становило 74,5%, БСК — 85,6%, завислих речовин — 92,4%, жирів — 85,9%, азоту - 77,4%, фосфору - 32,6% [7].

Для досягнення повного руйнування органічних забруднюючих речовин дедалі ширше застосовують методи окиснення [8], що дозволяють окиснювати більшість органічних сполук, зменшувати їхню токсичність або підвищувати біорозкладність. Зокрема, озонування широко використовують для очищення стічних вод. Використання методів коагуляції-флокуляції з FeSO<sub>4</sub> та озонування стічних вод молокопереробної промисловості (ХСК = 6300 мг/дм<sup>3</sup>) показало, що при pH 12 після 240 хв озонування було досягнуто 71% видалення ХСК, тоді як коагуляція-флокуляція забезпечила лише 60%.

Проте, незважаючи на більшу ефективність, озонування є економічно значно дорожчим методом [3]. Порівнювали ефективність очищення з використанням озону ( $O_3$ ), ультрафіолету (УФ),  $O_3/H_2O_2$ ,  $O_3/УФ$ ,  $УФ/H_2O_2$  та  $O_3/УФ/H_2O_2$ . Випробування проводили в циліндричному реакторі з УФ та введенням озону. За результатами визначали ефективність очищення за ХСК та зниженням лактози. Найвища ефективність була отримана для комбінації  $УФ/H_2O_2/O_3$ : 88% зниження ХСК та 93,4% зниження лактози за оптимальних умов (рН 5, тривалість обробки 180 хв, циркуляція - 50 мл/год, доза  $H_2O_2$  - 0,5 мл) [8].

Застосування нанотехнологій має великий потенціал, оскільки наноматеріали володіють унікальними фізичними та хімічними властивостями завдяки високому співвідношенню площі поверхні до об'єму. Дослідження ефективності нанокompatитних адсорбентів, створених на основі активованого вугілля, кальцію алгілату та нанокремнезему, показало, що такі матеріали володіють надзвичайно високою здатністю до видалення органічних забруднень зі стічних вод молочної промисловості. Максимальну ефективність очищення досягали за оптимальних умов — рН 2, концентрації нанокремнезему 10% за масою та тривалості контакту близько 4 годин. За таких умов ступінь видалення ХСК становив 99,7%, що свідчить про значний потенціал нанокompatиту як адсорбційного матеріалу для глибокого очищення стічних вод [9].

Мембранну фільтрацію зазвичай використовують для доочищення стічних вод, що дозволяє досягти високої якості очищеної води, необхідної для безпечного скидання або повторного використання. Залежно від типу мембрани застосовують пористі [мікрофільтрація (МФ), ультрафільтрація (УФ), нанофільтрація (НФ)] або щільні мембрани [деякі процеси нанофільтрації та зворотного осмосу (ЗО)]. Останні дослідження показали ефективність різних комбінацій мембранних процесів (МФ, УФ, МФ+УФ, МФ+НФ, МФ+ЗО) для очищення стічних вод молокопереробних підприємств після біологічного очищення. Зокрема, поєднання МФ+УФ забезпечило до 99% зниження ХСК, повне видалення завислих речовин та понад 99% зниження каламутності. Комбінація МФ+ЗО давала до 84% видалення загального органічного вуглецю, 100% кольоровості, 94% загального азоту (за К'ельдалем) і 100% каламутності [10].

Отже, фізико-хімічні методи ефективні для зниження концентрацій низки забруднюючих речовин, що містяться в стічних водах молокопереробних підприємств. Метод коагуляції забезпечує видалення до 70–80% органічних речовин і завислих частинок, однак супроводжується утворенням значних об'ємів осаду та потребує оптимізації доз реагентів через їх високу вартість. Електрокоагуляція зменшує витрати реагентів і дозволяє досягати до 60% зниження ХСК і БСК<sub>5</sub>, але характеризується високими енергозатратами та пасивацією електродів. Флотаційні процеси, особливо флотація з використанням розчиненого повітря, демонструють високі показники очищення (до 95% видалення жирів і завислих речовин), підвищуючи ефективність подальшої біообробки. Методи окиснення забезпечують майже повне руйнування органічних сполук (до 88% зниження ХСК), проте залишаються економічно затратними. Особливу перспективу мають нанокompatитні адсорбенти на основі активованого вугілля, кальцію алгілату та нанокремнезему, що демонструють до 99,7% видалення ХСК. Використання мембранних технологій дозволяє видалити зі стічної води до 99% завислих частинок та органічних речовин різного ступеня дисперсності, що робить їх ефективними методами доочищення.

#### Література

1. Саблій Л.А. Фізико-хімічне та біологічне очищення висококонцентрованих стічних вод: Монографія. - Рівне: НУВГП, 2013. – 292 с.

2. Loloei, Mahshid; Alidadi, Hosein; Nekonam, Gholamabbas; Kor, Yousef. Study of the coagulation process in wastewater treatment of dairy industries. *International Journal of Environmental Health Engineering* 3(1):p 12.
3. GÜNEŞ E. Treatment of dairy industry wastewater by variations of coagulation-flocculation and ozonation. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences – Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*. 2022.
4. Jai Prakash Kushwaha, Vimal Chandra Srivastava, Indra Deo Mall. Treatment of dairy wastewater by inorganic coagulants: Parametric and disposal studies. *Water Research*, Volume 44, Issue 20, 2010.
5. Enhancement of dairy wastewater treatment efficiency in batch chemical-assisted solar-powered electrocoagulation-adsorption system / Z. Al-Qodah et al. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. 2024.
6. Application of Electrocoagulation Process for Dairy Wastewater Treatment/E. Bazrafshan et al. *Journal of Chemistry*. 2013. Vol. 2013.
7. DOF/DAF comparison for the treatment of milk industry wastewater / M. D. S. Pereira et al. *Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*. 2020. Vol. 15, no. 5. P. 1.
8. Experimental analysis on the synergistic effect of combined use of ozone and UV radiation for the treatment of dairy industry wastewater / R. Suresh et al. *Environmental Engineering Research*. 2020. Vol. 26, no. 5. P. 200375–0.
9. Talafha, A., Abu-Dalo, M., Albiss, B.A. et al. Design and fabrication of nanocomposite adsorbents for dairy industry wastewater treatment. *Discov Sustain* 5, 530 (2024).
10. International Dairy Federation. *Wastewater Treatment in Dairy Processing*. Bulletin of the IDF No. 489/2020. Brussels: IDF, 2020. 84 p.

## **ВИКОРИСТАННЯ *CHLORELLA VULGARIS* ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ СТИЧНИХ ВОД ВІДХОДІВ ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ ШЛЯХОМ АКУМУЛЯЦІЇ БІОМОЛЕКУЛ**

**Борцюх В.В., Голуб Н.Б.**

**Науковий керівник: д. т. н., доцент Голуб Наталія Борисівна**

Стичні води м'ясопереробної та тваринницької промисловості характеризуються високим навантаженням органічних речовин, сполук азоту й фосфору, а також залишкових вітамінів, зокрема кобаламіну, який природно присутній у продуктах тваринного походження, а отже, і у промивних водах, що контактували з такою сировиною [1].

**Мета роботи** — проаналізувати сучасні літературні дані щодо використання *Chlorella vulgaris* у процесах очищення органічно забруднених стічних вод харчової промисловості та оцінити її потенціал як біотехнологічного агента, здатного одночасно зменшувати вміст забрудників і формувати біомасу, збагачену біологічно активними сполуками.

За даними досліджень, хімічне споживання кисню (ХСК) у м'ясопереробних стоках може сягати 800–2000 мг/л, біохімічне споживання кисню (БСК) — понад 1200 мг/л, загальний вміст азоту — 70–200 мг/л, а фосфору — 16–40 мг/л [1–3]. Такі показники спричиняють серйозні екологічні ризики: надмірне надходження стічних вод у навколишнє середовище призводить до евтрофікації водойм, зниження вмісту розчиненого кисню, масового розвитку ціанобактерій та інших водоростей, що погіршує якість води й викликає загибель водних організмів. Крім того, органічно збагачені стоки є джерелом патогенних мікроорганізмів, антибіотиків та залишкових гормональних сполук, які можуть негативно

впливати на здоров'я людини і тварин. Традиційні методи очищення таких вод (хімічне осадження, аеробне чи анаеробне біологічне очищення) часто є дорогими, енергоємними та не дають можливості відновлювати цінні біомолекули.

Мікрододорості, зокрема *Chlorella vulgaris*, демонструють унікальну здатність поєднувати видалення забрудників із накопиченням біомаси, збагаченої поживними речовинами. Ряд досліджень підтвердили, що *Chlorella* може ефективно видаляти до 90% біогенних елементів із промислових стічних вод, одночасно акумулюючи вітамін В<sub>12</sub> з органічних залишків [4–6]. Використання такого підходу є прикладом раціонального використання ресурсів, коли побічні продукти харчового виробництва трансформуються у високоартісні біопродукти (дієтичні добавки, біопаливо) та одночасно зменшують негативний екологічний вплив.

У даній роботі проведено аналітичний огляд сучасних літературних джерел (2010–2024 рр.), які висвітлюють здатність *Chlorella vulgaris* до росту на органічних субстратах та акумуляції вітаміну В<sub>12</sub> у присутності харчових та м'ясних відходів [5,6]. Особливу увагу приділено дослідженням, у яких мікрододорості використовували для очищення стічних вод, включаючи біогазові субстрати, анаеробні дигестати та промислові стоки [4,7]. Проаналізовано ефективність видалення азоту, фосфору та органічних речовин, а також накопичення вітаміну В<sub>12</sub> у біомасі.

Літературні дані показують, що при культивуванні на стічних водах м'ясопереробних підприємств *Chlorella vulgaris* досягає високої ефективності очищення: видалення хімічного споживання кисню (ХСК) перевищує 75–85%, амонійного азоту — понад 80%, фосфатів — 85–90% [4,7]. Одночасно біомаса накопичує значну кількість білка (до 45–50% сухої маси) та біологічно активного кобаламіну. Використання молочної сироватки та її пермеатів як середовища підвищувало вихід біомаси у 1,5–2 рази в порівнянні з контролем на мінеральних середовищах [6].

Анаеробні дигестати, отримані після зброджування відходів харчової промисловості, забезпечують ще кращі результати: концентрація вітаміну В<sub>12</sub> у біомасі досягала 10–12 мкг/г сухої маси [10]. Крім того, доведено, що симбіоз водоростей із бактеріями у таких середовищах сприяє швидшому вилученню поживних речовин і підвищує стійкість культур [8,9]. Водночас застосування екстрактів яловичої печінки як додаткового субстрату є перспективним завдяки високому вмісту природного В<sub>12</sub>, що може сприяти подальшому збагаченню біомаси мікрододоростей [5].

Аналіз літератури підтверджує, що використання *Chlorella vulgaris* для очищення органічних стічних вод є перспективним напрямом, який поєднує економічні, екологічні та біотехнологічні переваги. Такий підхід дозволяє зменшити забруднення довкілля, одночасно отримуючи біомасу з підвищеним вмістом цінних сполук. Подальші дослідження повинні бути спрямовані на оптимізацію умов для отримання більшого виходу біомаси зі збагаченим хімічним складом, тобто збільшення ефективності очищення стічних вод. Таким чином, використання *Chlorella vulgaris* у системах очищення стічних вод харчової промисловості має подвійну цінність: одночасне вирішення проблеми утилізації органічних забрудників і формування збагаченої на поживні речовини біомаси мікрододоростей - високоцінного біопродукту для харчових і фармацевтичних застосувань.

#### **Список використаної літератури:**

1. Campos J.L., Garrido J.M., Méndez R., Lema J.M. Biological nutrient removal from meat processing wastewater using a sequencing batch reactor. *Water Research*. 2002. Vol. 36, Iss. 3. P. 764–772. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(01\)00281-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(01)00281-4).
2. Bustillo-Lecompte C.F., Mehrvar M., Quiñones-Bolaños E. Slaughterhouse wastewater characterization and treatment: An economic and public health necessity of the meat processing

industry in Ontario, Canada. *Journal of Geoscience and Environment Protection*. 2016. Vol. 4, No. 4. P. 175–186. DOI: <https://doi.org/10.4236/gep.2016.44021>.

3. Ziels R.M., de Oliveira V.F., Phan A., Novins C., Koeck D.E., Nielsen J.L., Nielsen P.H. Effect of aeration mode on microbial structure and efficiency of treatment of TSS-rich wastewater from meat processing. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10, Iss. 21. Art. 7414. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10217414>.

4. Lu Q., Zhou W., Min M., Ma X. Growing *Chlorella* sp. on meat processing wastewater for nutrient removal and biomass production. *Bioresource Technology*. 2015. Vol. 198. P. 189–197. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.08.133>.

5. Papadopoulos K.P., Kyriakopoulou K., Angelidaki I. Vitamin B12-enriched digestate as a growth medium for *Chlorella vulgaris*: a new approach to valorize anaerobic fermentation residues. *Bioresource Technology*. 2023. Vol. 368. Art. 128325. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128325>.

6. Espinosa-Gonzalez I., Parashar A., Bressler D.C. Heterotrophic growth and lipid accumulation of *Chlorella protothecoides* in whey permeate, a dairy by-product stream, for biofuel production. *Bioresource Technology*. 2014. Vol. 155. P. 170–176. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.12.028>.

7. Hernández-Aguilar E., Alvarado-Lassman A., Méndez-Contreras J.M. Kinetics of obtaining microalgal biomass and removal of organic contaminants in photobioreactors operated with microalgae — study case: treatment of wastewater from a poultry slaughterhouse. *Water*. 2024. Vol. 16, No. 11. Art. 1558. DOI: <https://doi.org/10.3390/w16111558>.

8. Nguyen M.T., Pham T.H., Duong T.T. Removal of nutrients and COD in wastewater from Vietnamese piggery farm by the culture of *Chlorella vulgaris* in a pilot-scaled membrane photobioreactor. *Water*. 2022. Vol. 14, No. 22. Art. 3645. DOI: <https://doi.org/10.3390/w14223645>.

9. Li W., Wang L., Qiang X. Design, construction and application of algae-bacteria synergistic system for treating wastewater. *Journal of Environmental Management*. 2024. Vol. 359. Art. 121720. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121720>.

10. Acién F.G., Gómez-Serrano C., Morales-Amaral M.M., Fernández-Sevilla J.M., Molina-Grima E. Wastewater treatment using microalgae: how realistic a contribution might it be to significant urban wastewater treatment? *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2016. Vol. 100, Iss. 22. P. 9013–9022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00253-016-7835-7>.

## ОЦІНКА ТОКСИЧНОСТІ ДЛЯ *DAPHNIA MAGNA* РЕАКЦІЙНИХ СУМІШЕЙ ПІСЛЯ ФОТОХІМІЧНОГО ТА ФОТОКАТАЛІТИЧНОГО ОКИСНЕННЯ ВОДНИХ РОЗЧИНІВ СТРЕПТОЦИДУ РІЗНИМИ ОКИСНИКАМИ

**Головков А. М., Столярова І.В., Вакулєнко В.Ф.**

*Інститут колоїдної хімії та хімії води ім. А.В. Думанського НАН України, м. Київ*  
[vakulvera@ukr.net](mailto:vakulvera@ukr.net)

**Вступ.** Удосконалені процеси окислення (AOPs) стали загально визнаною технологією очищення води в останні десятиліття. Проте, незважаючи на високу ефективність AOPs для видалення цільових органічних домішок, повної мінералізації більшості з них зазвичай легко досягти не вдається. Водночас кінцевою метою всіх деструктивних технологій є детоксикація усіх домішок у воді, а не лише видалення цільових сполук. Тому

випробування на *Daphnia magna* є надзвичайно важливими як одна з можливостей неспецифічної оцінки біологічної дії сумішей усіх відомих, а також невідомих продуктів розкладання цільових забруднюючих речовин [1]. Цей підхід особливо корисний при вивченні біологічно активних органічних домішок, таких як антибіотики. Антибіотики належать до найбільш поширених мікродомішок фармацевтичних препаратів, присутність яких останнім часом фіксують в природних і стічних водах усього світі в концентрації від  $\text{нг/дм}^3$  до  $\text{мкг/дм}^3$ . Серед них велику групу (більше 150 сполук) складають сульфаніламідні антибіотики, які є похідними 4-амінобензолсульфаміду, відомого як стрептоцид [2].

**Мета роботи** – екотоксикологічна оцінка реакційних сумішей після фотолітичного, фотохімічного та гомогенного фотокаталітичного окиснення двома окисниками – пероксидом водню та персульфатом натрію розчинів стрептоциду в дистильованій воді.

**Методика експерименту.** Об'єктом дослідження був комерційний препарат стрептоциду ( $\text{C}_6\text{H}_8\text{N}_2\text{O}_2\text{S}$ , М.м. = 172,2 г/моль) (99 %, Китай).

Фотолітичне (УФ), фотохімічне ( $\text{H}_2\text{O}_2/\text{УФ}$ ) і гомогенне фотокаталітичне ( $\text{Fe}^{3+}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{УФ}$ ,  $\text{Fe}^{3+}/\text{S}_2\text{O}_8^{2-}/\text{УФ}$ ) окиснення розчинів стрептоциду в дистильованій воді проводили в скляному реакторі ( $V = 400 \text{ см}^3$ , товщина шару ( $l$ )  $\sim 1,5 \text{ см}$ ) з зануреною ртутно-кварцовою лампою ДРБ-15 ( $\lambda = 254 \text{ нм}$ ) у кварцовому кожусі при перемішуванні магнітною мішалкою протягом 2 год. Окиснення проведено при низькій концентрації  $\text{Fe}^{3+}$  (0,02–0,04 мМ) та молярних концентраціях обох окисників, близьких до стехіометричної концентрації  $\text{H}_2\text{O}_2$  (22 моль/моль), необхідної для повної деструкції стрептоциду до  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  та неорганічних іонів (його мінералізації). В процесі досліджень контролювали зміну оптичної густини максимуму поглинання розчину стрептоциду в УФ-області ( $A_{258}$ ), яка характеризує розклад його ароматичної структури (первинна деструкція); концентрацій загального органічного вуглецю (ЗОВ) (ступінь мінералізації), пероксиду водню і персульфату натрію та рН розчину. Параметри окиснення і характеристика початкових та оброблених розчинів стрептоциду наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Параметри окиснення і характеристика досліджених розчинів стрептоциду і розчинів  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  в контрольному середовищі (КН)

Процес обробки	№ п/п	Початкові розчини		Параметри обробки		Після обробки (нейтралізації)		
		pH	ЗОВ <sub>0</sub> , мг/дм <sup>3</sup>	$\text{Fe}^{3+}$ , мг/дм <sup>3</sup>	$[\text{H}_2\text{O}_2]_0$ чи $[\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8]_0$ , мг/дм <sup>3</sup>	ЗОВ <sub>к</sub> , мг/дм <sup>3</sup>	$[\text{H}_2\text{O}_2]_к$ чи $[\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8]_к$ , мг/дм <sup>3</sup>	pH <sub>н</sub>
Без обробки	1	6,1	16,6	0	0	–	–	7,1
УФ	2	6,5	16,9	0	0	12,9	0	6,8
$\text{H}_2\text{O}_2/\text{УФ}$	3	6,3	11,5	0	143	2,02	3,3	7,5
$\text{Fe}^{3+}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{УФ}$	4	6,2	11,4	1,12	144	1,5	3,9	7,5
$\text{Fe}^{3+}/\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8/\text{УФ}$	5	6,2	11,1	1,12	986	1,56	1,4	7,0
$\text{Fe}^{3+}/\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8/\text{УФ}$ <i>проба/КН = 1:1*</i>	6	6,5	16,2	2,24 1,12*	883 442*	2,17 1,08*	0	7,5
Розчини	7	7,3	0	0	250	–	–	–
$\text{Na}_2\text{SO}_4$ в КН	8	7,3	0	0	500	–	–	–

Примітка.  $[\text{H}_2\text{O}_2]_к$  чи  $[\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8]_к$  – залишкова концентрація  $\text{H}_2\text{O}_2$  чи  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$  в окиснених розчинах стрептоциду до дезактивації; pH<sub>н</sub> – pH нейтралізованого розчину стрептоциду після окиснення. \*Окиснений персульфатом розчин стрептоциду, розведений у 2 рази контрольним середовищем.

Екотоксичність оцінювали шляхом тестування летальності *Daphnia magna* протягом 72 год відповідно до стандартного протоколу, описаного в [3]. Метод біотестування на дафніях заснований на визначенні ступеня виживання ракоподібних при токсичному впливі хімічних речовин, що містяться у воді, і порівняння їх з контрольними показниками (КН). Критерієм гострої токсичності є загибель 50 % і більше особин, а хронічної токсичності – загибель від 20 % до 40 % дафній за період до 96 год у тестованій воді порівняно з контрольним середовищем. Токсичність розчинів стрептоциду оцінювали після дезактивації незначних залишків ( $\leq 3$  %) окисників ( $0,2$  М  $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ) та нейтралізації розчинів ( $0,1$  М  $\text{NaOH}$ ) (табл. 1). Крім того, враховуючи суттєву відмінність молярних мас  $\text{H}_2\text{O}_2$  і  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$  (М.м. відповідно 34 і 238 г/моль) і значний вплив останнього на зміну мінерального складу окисненого розчину стрептоциду, оцінили також токсичність двох розчинів сульфату натрію різної концентрації (табл. 1).

#### Результати і їх обговорення.

Встановлено, що саме УФ-опромінення ( $\lambda = 254$  нм) без окисників розчину стрептоциду ( $C_0 = 0,2$  мМ, рН<sub>0</sub> 6,3) протягом 2 год спричиняло суттєву його трансформацію – зниження інтенсивності максимуму поглинання розчину ( $A_{258}$ ) на  $\sim 70$  % та деякий ступінь мінералізації ( $\sim 24$  % в пробі № 2), однак супроводжувалось значним потемнінням розчину внаслідок полімеризації частини утворених первинних інтермедіатів. В той час, як досліджені фотохімічні та фотокаталітичні ( $\text{H}_2\text{O}_2/\text{УФ}$ ,  $\text{Fe}^{3+}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{УФ}$ ,  $\text{Fe}^{3+}/\text{S}_2\text{O}_8^{2-}/\text{УФ}$ ) процеси окиснення при концентрації окисників, близькій до стехіометричної, і низькій концентрації  $\text{Fe}^{3+}$  за 2 год забезпечували повну первинну деструкцію препарату (98–100 %) та високий ступінь його мінералізації ( $\geq 83$  %).

В цілому, за результатами тестування, гостру токсичність виявлено для початкового розчину стрептоциду (№ 1) та більшості реакційних сумішей після його деструкції дослідженими методами (№ 2–5), оскільки протягом 72 год летальність дафній в них досягала 100 %, на відміну від контрольного середовища (КН) (табл. 2).

Спостереження протягом тестування показали значне прискорення відмирання дафній в частині окиснених розчинах стрептоциду (№ 2 і 5) порівняно з початковим (табл. 2). Їх летальність зростала найшвидше у пробі № 5 після фотокаталітичного окиснення стрептоциду персульфатом (40 % за 2 год) і в пробі № 2 після УФ-опромінення без окисників з найнижчими ступенями первинної деструкції і мінералізації препарату (10 % за 6 год) та досягала 100 % за 24 год в обох. В початковому розчині стрептоциду летальність дафній протягом першої доби була відсутня, проте фіксувалась уже на початку другої доби (10 % за 28 год і досягала 100 % за 44–48 год. В розчинах стрептоциду після фотохімічного ( $\text{H}_2\text{O}_2/\text{УФ}$ ) та фотокаталітичного окиснення пероксидом водню ( $\text{Fe}^{3+}/\text{H}_2\text{O}/\text{УФ}$ ) значна летальність дафній (60–70 %) фіксувалась лише наприкінці третьої доби (68–72 год).

Найменш токсичним був фотокаталітично окиснений персульфатом розчин стрептоциду, розведений у 2 рази контрольним середовищем (№ 6), на відміну від найбільш токсичного аналогічно обробленого нерозведеного розчину (№ 5) (табл. 2), незважаючи на однаковий ступінь первинної деструкції препарату (99 %) і близький залишковий вміст ЗОВ (табл. 1). Це підтвердило необхідність тестування розчинів сульфату натрію. Для обох розчинів  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  в контрольному середовищі (№ 7 і 8), дійсно, була характерна деяка летальність (10–20 % протягом 2–3 доби), аналогічна пробі № 6. Проте, в пробах № 7 і № 8 зафіксовано явище резистентності. Організми пристосовувались до дії хімічної сполуки і відновлювали нормальний режим діяльності.

Таблиця 2. Токсичність для *Daphnia magna* початкового та окиснених різними способами розчинів стрептоциду та розчинів Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> в контрольному середовищі

Час, год	Летальність <i>Daphnia magna</i> , %								
	КН	№ проби							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	40	0	0	0
6	0	0	10	0	0	100	0	0	0
24	0	0	100	0	0	100	0	0	0
28	0	10	100	0	0	100	0	0	0
44	0	100	100	0	0	100	0	0	10
48	0	100	100	0	20	100	0	0	10
52	0	100	100	0	60	100	0	20	10
72	0	100	100	60	70	100	20	20	10

Ймовірні причини залишкової токсичності в досліджених пробах: недостатній ступінь первинної деструкції і мінералізації стрептоциду (проба № 2) чи недостатньо точно знешкоджені залишкові концентрації застосованих окисників або ймовірних утворених органічних перексокислот, не врахованих застосованими методами контролю, в решті окиснених розчинів стрептоциду. Недостатньо високий ступінь розкладу ароматичної структури антибіотиків після окиснення може свідчити про присутність ароматичних проміжних продуктів, деякі з них є дуже токсичними для дафній, зокрема, гідрохінон та бензохінон (ЕК<sub>50-48</sub> відповідно 0,15 мг/дм<sup>3</sup> та 0,059 мг/дм<sup>3</sup> [4]). Як відомо, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> є токсичною для *Daphnia magna*. Наприклад, концентрація H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, яка спричиняє загибель 50 % дафній за 24 год (ЛК<sub>50-24</sub>), становить 6,51±0,19 мг/дм<sup>3</sup> [5].

**Висновки.** Таким чином, застосування АОРs, пов'язаних з використанням пероксиду водню чи персульфату натрію для деструкції стрептоциду, потребує, окрім обґрунтування раціональних параметрів процесів для досягнення максимального ступеня мінералізації антибіотика, ретельного контролю залишкових концентрацій окисників, включно з виниклими в процесі обробки, для отримання екологічно безпечної очищеної води.

#### Перелік посилань

1. Tkaczyk A., Bownik A., Dudka J., Kowal K., Ślaska B. [Daphnia magna model in the toxicity assessment of pharmaceuticals: A review](#). *Sci Total Environ*. 2021. V. 763. 143038.
2. Oving A., Bhattacharyya J. Sulfonamide drugs: structure, antibacterial property, toxicity, and biophysical interactions. *Biophys Rev*. 2021 V. 13. N 2. P. 259–272.
3. ДСТУ 4173:2003 Якість води. Визначення гострої летальної токсичності на *Daphnia magna* Straus та *Ceriodaphnia affinis* Lilljeborg (Cladocera, Crustacea) (ISO 6341:1996, MOD). Офіц. вид. К.: Держспоживстандарт України, 2004. 22 с.
4. Kravos A., Žgajnar Gotvajn A., Lavrenčič Štangar U., Malinović B.N., Prosen H. Combined Analytical Study on Chemical Transformations and Detoxification of Model Phenolic Pollutants during Various Advanced Oxidation Treatment Processes. *Molecules*. 2022. V. 27. 1935.
5. Weenink E.F.J., Kraak M.H.S., van Teulingen C., Kuijt S., van Herk M.J., Sigon C.A.M., Piel T., Sandrini G., Leon-Grooters M., de Baat M.L., Huisman J., Visser P.M. Sensitivity of phytoplankton, zooplankton and macroinvertebrates to hydrogen peroxide treatments of cyanobacterial blooms. [Water Research](#). 2022. V. 225. 119169. **РОЗРОБКА КОМПЛЕКСНОЇ**

## ТЕХНОЛОГІЇ ОЧИЩЕННЯ МІНЕРАЛІЗОВАНИХ ВОД З ОТРИМАННЯМ КОНКУРЕНТОСПРОМОЖНИХ РЕАГЕНТІВ

*Гомеля М.Д., Крижановська Я.П., Пляцук Я.М.*

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського»,*

*Україна, м.Київ, e-mail: [yanamart93@ukr.net](mailto:yanamart93@ukr.net)*

Україна належить до країн із відносно обмеженими запасами прісної води. Основне джерело водних ресурсів — це річка Дніпро та її притоки, однак через значне антропогенне навантаження і кліматичні зміни якість цих вод поступово знижується. Для забезпечення стабільного водопостачання часто здійснюється перекачування води між регіонами, що лише частково вирішує проблему дефіциту. У західних областях, зокрема у Львівській, населення здебільшого користується водою з артезіанських свердловин. Проте ефективність використання водних ресурсів в Україні залишається низькою, а експлуатація водосховищ на Дніпрі супроводжується значними втратами через випаровування та погіршення якості води, особливо влітку, через процеси евтрофікації [1].

Одним із додаткових джерел водопостачання можуть стати шахтні води. Сьогодні значні їх обсяги скидаються у природні водойми практично без очищення, що спричиняє підвищення мінералізації та погіршення якості поверхневих вод. Однак досвід свідчить, що очищення таких вод за допомогою сучасних мембранних технологій, як-от нанофільтрація чи зворотний осмос, є цілком можливим. Прикладом є водоочисна станція в Алчевську, де ще у 2008 році впроваджено установку продуктивністю 12 тис. м<sup>3</sup>/добу, яка забезпечувала отримання питної води, що відповідає національним і міжнародним стандартам [2-3].

Незважаючи на технічну ефективність мембранних процесів, головною перешкодою для їх широкого впровадження є проблема утилізації концентратів — розсолів, що утворюються під час знесолення води. Такі концентрати містять високу кількість хлоридів і сульфатів, а їхнє зберігання або скидання у природне середовище становить небезпеку. Існують різні способи переробки цих відходів — хімічне осадження, іонний обмін, сорбція, дистиляція, випаровування чи виморожування. Проте всі вони мають істотні недоліки: високу енергоємність, невисоку продуктивність або утворення нових відходів, що потребують подальшої утилізації. Наприклад, іонний обмін супроводжується появою великої кількості регенераційних розчинів, які мають ще більшу мінералізацію, ніж вихідна вода [4-5].

Одним із сучасних і перспективних підходів є електрохімічна переробка концентратів, зокрема методом **електродіалізу**, який дає змогу не лише вилучати іони солей із розчину, але й отримувати цінні продукти. При переробці хлоридовмісних концентратів за допомогою електродіалізу можливе утворення активного хлору або гіпохлориту натрію — сполук, що широко використовуються у технологіях знезараження води. Такий підхід дозволяє одночасно зменшувати негативний вплив на довкілля і забезпечувати підприємства власними реагентами для дезінфекції.

У промисловості для отримання активного хлору зазвичай застосовують електроліз концентрованих розчинів хлориду натрію (NaCl) із концентрацією понад 100 г/дм<sup>3</sup>. Водночас концентрати, що утворюються після знесолення води зворотним осмосом чи нанофільтрацією, містять лише 4–30 г/дм<sup>3</sup> NaCl, тобто у кілька разів менше. Через це традиційні технології не дають змоги ефективно синтезувати активний хлор із таких розчинів. Тому дослідники ставлять за мету розробити способи переробки малоконцентрованих розчинів хлориду натрію в умовах знижених енергетичних витрат і високого виходу кінцевого продукту.

Метою описаного в статті дослідження було **вивчення процесів електрохімічного синтезу активного хлору та гіпохлориту натрію** з розчинів NaCl різної концентрації у двокамерних електролізерах — як відкритих, так і герметичних. Основне завдання полягало у визначенні оптимальних умов проведення електролізу: щільності струму, тривалості процесу, концентрації вихідних розчинів та впливу цих параметрів на вихід продукту за струмом і ступінь перетворення хлоридів.

Дослідження проводили із використанням двокамерного електролізера, розділеного аніонообмінною мембраною типу МА-41. Як анод застосовували титанову пластину, покриту оксидом рутенію, а як катод — леговану сталь. Процес вели при щільності струму від 1,67 до 12,5 А/дм<sup>2</sup> і температурі близько 25 °С. У катодну камеру подавали лужний розчин, а в анодну — робочий розчин NaCl. Для контролю хімічного складу та ходу реакцій визначали вміст хлоридів, активного хлору, рН та інші параметри за стандартними методиками.

Результати експериментів показали, що при невеликих концентраціях хлориду натрію (близько 3,5 г/дм<sup>3</sup>) у розчині вдається отримати помітну кількість гіпохлориту натрію — до 80 мг-екв/дм<sup>3</sup> по активному хлору. Проте збільшення щільності струму призводить до інтенсивного утворення газоподібного хлору, який частково втрачається внаслідок дегазації. Через це реальний вихід активного хлору за струмом зменшується, а концентрація кінцевого продукту залишається невисокою. Найкращі результати при таких умовах спостерігалися при анодній щільності струму 1,67–4,17 А/дм<sup>2</sup> (рис.1).

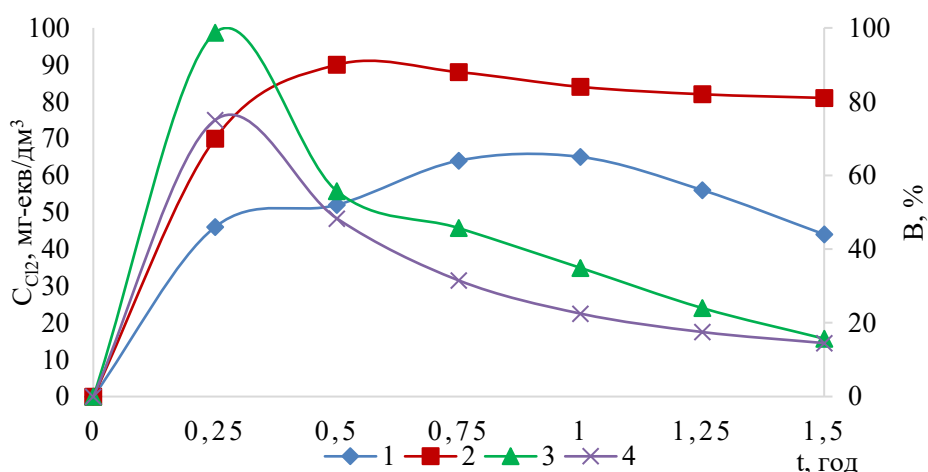


Рисунок 1 - Зміна концентрації активного хлору (1; 2) в аноліті двокамерного електролізера (мембрана МА-41), його виходу за струмом (3; 4) від часу електролізу розчину NaCl концентрацією 61 мг-екв/дм<sup>3</sup> при анодній щільності струму, А/дм<sup>2</sup>: 4,17 (1; 3) та 8,33 (2; 4) (католіт – розчин NaOH концентрацією 200 мг-екв/дм<sup>3</sup>)

При підвищенні концентрації NaCl у вихідному розчині (до 26 г/дм<sup>3</sup>) концентрація активного хлору зростала майже втричі. Це свідчить, що насиченіші розчини хлориду натрію сприяють утворенню більшої кількості гіпохлориту при помірних значеннях струму. Водночас занадто інтенсивне електролітичне окиснення (вище 8 А/дм<sup>2</sup>) призводило до значних втрат активного хлору внаслідок його переходу в газову фазу.

Додаткові дослід з більш концентрованими розчинами (до 1700 мг-екв/дм<sup>3</sup>) підтвердили, що навіть при підвищенні вмісту NaCl у розчині вихід активного хлору не зростає пропорційно. Значна його частка все одно втрачається при дегазації, особливо за високої анодної щільності струму. Разом з тим, спостерігалось поступове підвищення рН

анолітів у процесі електролізу, що пояснюється накопиченням гідроксид-іонів і частковим переходом активного хлору у форму гіпохлорит-іонів.

Таким чином, дослідження показало, що ефективність переробки розчинів хлориду натрію методом електродіалізу визначається низкою факторів. Найкращих результатів можна досягти при середніх значеннях струму та помірних концентраціях солі. За таких умов утворюється достатня кількість активного хлору або гіпохлориту натрію, які можуть бути використані як дезінфектанти. Надмірне підвищення густини струму чи концентрації NaCl, навпаки, знижує ефективність через дегазацію та збільшення енергетичних витрат.

У підсумку можна зазначити, що електродіаліз є перспективним методом переробки шахтних та солонуватих вод із високим вмістом хлоридів. Його застосування дозволяє вирішити одразу дві проблеми — зменшення мінералізації води та отримання корисних хімічних реагентів, необхідних для знезараження питної води. Розробка таких технологій особливо актуальна для України, де питання ефективного використання водних ресурсів і екологічно безпечної утилізації відходів є надзвичайно гострим.

#### Перелік посилань

1. Рисухін, В.В., Шаблій, Т.О., Гомеля, М.Д. (2011). Переробка концентратів, що утворюються при нанофільтраційному очищенні вод з підвищеною мінералізацією. Східно-Європейський журнал передових технологій, Т.5, 3 (53), 51–55.
2. Trus, I.M., Gomelya, M.D. (2021). Desalination of mineralized waters using reagent methods. Journal of Chemistry and Technologies, 29 (3), 417–424. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v29i3.214939>
3. Директива Ради 98/83/ЄС від 03.11.1998 Про якість води, призначеної для споживання людиною.
4. Shokriani, F., Solaimani, K., Nematzadeh, G.H., Biparva, P. (2015). Removal of NaCl from aqueous solutions by using clinoptilolite. International Journal of Farming and Allied Sciences, 4 (1), 50–54.

## ПРОБЛЕМИ ВИКОРИСТАННЯ ІММОБІЛІЗОВАНИХ МІКРООРГАНІЗМІВ У БІОЛОГІЧНОМУ ОЧИЩЕННІ СТІЧНИХ ВОД

*Гриневич А.О., Саблій Л.А.*

*Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"  
abarabaha@gmail.com*

На сьогодні використання активного мулу залишається основним методом біологічного очищення міських стічних вод у всьому світі. За різними оцінками, технології, засновані на процесі активного мулу, застосовують більш ніж у 90 % очисних споруд у світі. Попри це, глобально близько 44 % стічних вод усе ще не проходять належного очищення або скидаються у водойми без відповідної підготовки. Окрім того, за несприятливих зовнішніх факторів і змін умов навколишнього середовища (таких як температура, рН, концентрація розчиненого кисню, солоність або наявність токсичних речовин) системи активного мулу можуть зазнавати значного зниження ефективності, зокрема через спливання мулу, розмноження нитчастих бактерій. Така ситуація зумовлює необхідність подальшої оптимізації існуючих технологій та пошуку нових підходів до інтенсифікації біологічних процесів [1-2].

На відміну від традиційної технології активного мулу, методи, що ґрунтуються на іммобілізованих мікроорганізмах, забезпечують вищу щільність та стабільність біомаси

мікроорганізмів. Використання іммобілізованих клітин сприяє покращенню масообміну, підвищенню стійкості до токсичних впливів і збільшенню тривалості активного функціонування біоценозів. У зв'язку з цим дослідження процесів формування та функціонування біоплівки набуває особливої актуальності для підвищення ефективності сучасних технологій і очисних споруд біологічного очищення стічних вод [1, 3].

Попри очевидні переваги біоплівкових систем, їх практичне впровадження супроводжується низкою невирішених питань, пов'язаних із процесами формування та стабільності біоплівки. Зокрема, залишаються актуальними проблеми ефективної адгезії між мікроорганізмами і носієм, забезпечення рівномірного масообміну в товщі біоплівки, а також оптимізації фізико-хімічних властивостей і форми зовнішньої поверхні носіїв. Додаткові технологічні складнощі виникають під час експлуатації систем типу MBBR, біофільтрів та FBVR-реакторів. Вирішення зазначених питань є ключовим для підвищення ефективності, стабільності та довговічності біоплівкових технологій очищення стічних вод.

Метою даної роботи є визначення основних чинників, що обмежують ефективне практичне застосування іммобілізованих мікроорганізмів в очищенні стічних вод.

Іммобілізація мікроорганізмів передбачає їх закріплення на поверхні твердого носія або в об'ємі полімерної матриці, що дозволяє підвищити концентрацію активної біомаси у реакторі та забезпечити підвищення ефективності очищення стічної води і стабільність біохімічних процесів. Основною перевагою таких систем є можливість тривалої роботи біоценозу без вимивання мікроорганізмів із зони реакції. Водночас, низка фізико-хімічних і технологічних обмежень ускладнює практичну реалізацію цих процесів у промислових масштабах.

Першочерговим етапом формування біоплівки є адгезія між мікроорганізмами і поверхнею носія. Від ефективності цього процесу залежить стабільність біоплівки. На інтенсивність прикріплення впливають гідрофобність, заряд поверхні, шорсткість, пористість матеріалу носія, а також морфологічні особливості клітин, наявність фімбрій, джгутиків і білків-адгезинів. Зважаючи на те, що мікроорганізми навіть споріднених таксономічних груп демонструють різну адгезійну активність, що сильно ускладнює дослідження цього процесу [1 – 3].

Після прикріплення клітин формується позаклітинний полімерний матрикс, який забезпечує механічну стабільність мікробного шару, слугує бар'єром для токсичних речовин і створює мікрогетерогенне середовище з різною концентрацією кисню та субстратів. Проте склад і структура матриксу суттєво залежать від умов середовища - температури, швидкості потоку, наявності поживних речовин та інтенсивності аерації, а також інших факторів – форми, розмірів та матеріалу носія, тощо. Формування щільного матриксу безпосередньо впливає на масообмін у товщі біоплівки. Збільшення товщини призводить до дифузійних обмежень для кисню й субстратів, створення анаеробних зон та зниження метаболічної активності. З іншого боку, надто тонкий шар біоплівки не забезпечує достатньої кількості біомаси для ефективного очищення. Таким чином, оптимальна товщина біоплівки має підтримувати баланс між активною поверхнею реакції та ефективністю масообміну [2, 4].

Одним із визначальних факторів у цьому контексті виступає матеріал і форма носія. Від них залежать не лише умови прикріплення клітин, але й гідродинамічний режим реактора. Носії з надмірно гладкою або занадто шорсткою поверхнею однаково ускладнюють формування стабільної плівки. Важливими також є питома площа поверхні, форма, розмір та ступінь заповнення реактора носіями, оскільки вони визначають характер перемішування, турбулентність потоку і процеси масообміну. Недостатня заповненість зменшує біомасу, тоді як надмірна – підвищує гідравлічний опір і погіршує умови аерації.

Ці закономірності особливо чітко проявляються у системах типу MBBR (Moving Bed Biofilm Reactor) і FBBR (Fixed Bed Biofilm Reactor). Для MBBR характерна необхідність інтенсивного перемішування, що забезпечує рівномірний розподіл носіїв, проте зумовлює високі енерговитрати та механічне зношування матеріалів. Натомість у FBBR-системах основною проблемою є кольматація поверхні носіїв, накопичення надлишкової біомаси і, як наслідок, збільшення гідравлічного опору. Обидва типи систем потребують пошуку компромісних технічних рішень для підтримання стабільної товщини біоплівки при мінімальних витратах енергії [5].

Початковий етап формування біоплівки також характеризується низькою стабільністю. Тривалість періоду адаптації може становити від кількох днів до кількох тижнів залежно від виду стічних вод і властивостей носія. На цьому етапі біоплівка є механічно нестійкою, а склад мікробного консорціуму ще не сформований остаточно. Внаслідок цього очищення може відбуватись нерівномірно, що створює труднощі при введенні системи в експлуатацію.

З іншої сторони, у процесі тривалої роботи біоплівка зазнає морфологічних змін. Відбувається нерівномірний ріст шару, утворення зон з низькою метаболічною активністю, а також часткове відшарування поверхневих фрагментів. Це призводить до коливань у показниках ефективності та зменшення стабільності процесу. Тому питання контролю товщини та структури біоплівки у реальному часі є одним із ключових напрямів розвитку сучасних систем моніторингу [4, 5, 6].

Важливо також враховувати експлуатаційні аспекти: поступове зношування носіїв, потребу в їхній регенерації чи заміні, а також очищення реактора від надлишкової біомаси. Ці фактори прямо впливають на тривалість життєвого циклу споруди та визначають економічну доцільність використання іммобілізованих мікроорганізмів у комунальному та промисловому очищенні стічних вод.

Отже, технології біологічного очищення стічних вод із використанням іммобілізованих мікроорганізмів демонструють значний потенціал підвищення ефективності, стабільності та екологічної надійності очисних споруд. Водночас низка проблем, пов'язаних із формуванням, структурною стабільністю та масообмінними властивостями біоплівки, обмежує їх широке застосування. Подальші дослідження мають бути спрямовані на глибше розуміння механізмів адгезії мікроорганізмів, оптимізацію матеріалів та конструкції носіїв, а також на розроблення моделей, що описують взаємозв'язок між гідродинамікою потоку води в реакторі та розвитком біоплівки.

Список використаних джерел:

1. Zhang J., Wang H., Shao Y., Liu G., Qi L., Dang W., Yuan J., Li Y., Xia Z. Analysis on common problems of the wastewater treatment industry in urban China // *Chemosphere*. – 2022. – Vol. 291, Part 2. – P. 132875. – DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.132875.
2. Challenges of Wastewater and Wastewater Management // *Sustainable Industrial Wastewater Treatment and Pollution Control*. – 2023. – P. 229–255. – DOI: 10.1007/978-981-99-2560-5\_12.
3. Zhang X., You S., Ma L., Chen C. The Application of Immobilized Microorganism Technology in Wastewater Treatment // *Proceedings of the 2nd International Conference on Machinery, Materials Engineering, Chemical Engineering and Biotechnology (MMECEB 2015)*. – Atlantis Press, 2016. – DOI: 10.2991/mmeceb-15.2016.22.
4. Hou L., Hu K., Huang F., Pan Z., Jia X., Liu W., Yao X., Yang Z., Tang P., Li J. Advances in immobilized microbial technology and its application to wastewater treatment: A

- review // *Bioresource Technology*. – 2024. – Vol. 413. – P. 131518. – DOI: 10.1016/j.biortech.2024.131518.
5. Ghafari-Arsoon F., Ramezani O., Partovinia A. Optimization of immobilized activated sludge performance in electro-sprayed matrices for treatment of cellulose industry wastewater // *Scientific Reports*. – 2025. – Vol. 15. – P. 32155. – DOI: 10.1038/s41598-025-16985-4.
  6. Ogundolie F. A., Oyewole Babalola O., Adetunji C. O., Aruwa C. E. A review on bioremediation by microbial immobilization—an effective alternative for wastewater treatment // *AIMS Environmental Science*. – 2024. – Vol. 11, No. 6. – P. 918–939. – DOI: 10.3934/environsci.2024046.

## ПРИКЛАДНІ МЕТОДИ МОНІТОРИНГУ ТА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ БІОПРОЦЕСАМИ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАБІЛЬНОСТІ Й ЯКОСТІ

*Грицина О.О.*

*Національний університет водного господарства та природокористування,  
м. Рівне, о.о.hrytsyna@nuwm.edu.ua*

В останні десятиліття важливість надійних стратегій моніторингу та контролю в біопроцесах стає все більш очевидною, особливо в сферах водоочищення та екологічної біотехнології. У міру інтенсифікації урбанізації та погіршення дефіциту води біотехнологічні підходи до відновлення та повторного використання води обумовлені критичними практичними та науковими потребами. Ефективний моніторинг біопроцесів не тільки забезпечує стабільність і якість операцій з очищення води, але й лежить в основі сталого, ресурсоефективного та стійкого управління навколишнім середовищем - завдання, яке ускладнюється зростанням обсягів забруднення, більш суворими нормативними вимогами та необхідністю відновлення цінних ресурсів із потоків відходів [1]. У цьому контексті передові технології моніторингу та автоматизації, включаючи інновації в області сенсорів, машинне навчання та модельне управління, стали необхідними інструментами для забезпечення надійності біопроцесів, якості продукції та зменшення впливу на навколишнє середовище у всьому спектрі сучасного управління водою та стічними водами зокрема [2].

Протягом останніх кількох років значні досягнення в області моніторингу біопроцесів та автоматичного управління змінили ландшафт екологічної біотехнології. Перехід до прийняття рішень у режимі реального часу на основі даних значно поліпшив не тільки ефективність процесів, але й здатність динамічно адаптуватися до нестаціонарних або непередбачених збурень у складних біопроцесних системах [3].

Незважаючи на значний прогрес, залишаються невирішені критичні проблеми. Головними з них є властива біологічним системам нелінійність і мінливість, які ускладнюють точне моделювання, моніторинг та автоматичний контроль; обмежена надійність і селективність датчиків для багатьох цільових показників; а також потреба в узгодженні конфліктних цілей, таких як енергоефективність, якість стічних вод і відновлення ресурсів [4]. Крім того, існує розрив у впровадженні передових систем цифровізації та автоматизації в промислових масштабах через проблеми інтеграції

апаратного й програмного забезпечення, стандартизації даних і валідації моделей за умов невизначеності або змінних режимів експлуатації.

Огляд останніх досліджень підкреслює швидку еволюцію як апаратних, так і програмних платформ для моніторингу та контролю біопроцесів у водоочищенні та екологічній біотехнології. Глобальне впровадження передових сенсорних мереж, технологій аналітичного контролю процесів (PAT) та платформ автоматизації процесів, таких як Biobrain® Supervise (Sartorius), Lucullus® (Securecell) та TruBio (Thermo Fisher), прискорює перехід від ручного контролю якості до моніторингу процесів у режимі реального часу на основі моделей та їх постійної оптимізації. Ці інтегровані системи сприяють надійному збиранню даних з різних джерел, забезпечують комплексну візуалізацію динаміки процесів та підтримують передові стратегії контролю [5].

Важливою сферою інновацій є поширення технологій вбудованих, онлайн- та приладових датчиків для моніторингу біореакторів та водоочищення. Оптичні, електрохімічні та спектроскопічні датчики тепер регулярно забезпечують вимірювання в режимі реального часу параметрів, критичних для ефективності біопроцесів та якості стічних вод: рН, розчинений кисень, окисно-відновний потенціал (ORP), температура, загальна кількість завислих речовин, концентрація біогенних речовин ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ), хімічне споживання кисню (COD) та нові забруднювачі, такі як мікропластик та мікроелементи. Інновації включають мініатюрні оптичні датчики на основі флуоресценції для DO/pH, ємнісні та акустичні зонди для біомаси, вдосконалені ферментативні та біосенсори для метаболітів і токсинів, а також аналітичні системи, що забезпечують моніторинг BOD/COD в режимі реального часу з мінімальним обслуговуванням.

Технології штучного інтелекту (AI) та машинного навчання (ML) зараз відіграють центральну роль як у моніторингу, так і в контролі, особливо в таких завданнях, як інтерпретація спектральних даних, розпізнавання аналітичних шаблонів, виявлення аномалій, «м'яке» зондування змінних, що не піддаються прямому вимірюванню, превентивне технічне обслуговування та адаптивна оптимізація систем. Такі методи, як штучні нейронні мережі (ANN), гібридні підходи, такі як ANFIS і LSTM, досягли значних успіхів у прогнозуванні точності, ефективності обробки та контролю показників.

Методологія досліджень для моніторингу та оцінки систем контролю включає: вибір цільового процесу або реактору; встановлення датчиків та платформи даних; побудова моделей; розробка та впровадження алгоритмів управління; оцінка управління в замкнутому циклі; оцінка за ключовими показниками ефективності; перевірка моделей та алгоритмів.

Основним завданням досліджень у сфері моніторингу та контролю біопроцесів є розробка, апробація та впровадження систем, які можуть:

- Забезпечувати високочастотні, точні та надійні вимірювання всіх відповідних параметрів процесу та змінних стану в режимі реального часу або майже в режимі реального часу, з мінімальним технічним обслуговуванням та ризиком відмови або забруднення.

- Автоматично підтримувати або оптимізувати біопроцес у межах визначених проектних параметрів, досягаючи стабільності, якості продукції, ефективності використання ресурсів та відповідності нормативним вимогам, навіть за динамічно мінливих умов та непередбачених збурень.

- Адаптуватися до мінливих операційних стратегій, таких як інтеграція повторного використання ресурсів (наприклад, енергії, біогенних речовин, повторного використання води).

- Зниження експлуатаційних витрат, споживання енергії та впливу на навколишнє середовище (наприклад, шляхом мінімізації використання надмірної аерації або хімікатів).

Це вимагає узгодженої інтеграції апаратного забезпечення датчиків, програмного забезпечення для автоматизації, моделей процесів (механічних, заснованих на даних, гібридних) та платформ штучного інтелекту/аналітики, що забезпечує взаємодію (часто за допомогою OPC UA та хмарних сховищ даних), кібербезпеку та можливість постійного вдосконалення за допомогою цифрової трансформації (Bioprocessing 4.0).

Результати досліджень, демонструють ефективність та трансформаційний вплив сучасних систем моніторингу та автоматичного контролю в біопроцесах:

#### 1. Моніторинг та контроль в системах з активним мулом та MBR:

- Застосування контролерів прогнозування вихідних даних (Output MPC) у реальних та модельованих системах очищення стічних вод активним мулом (ASP) забезпечило значне поліпшення якості стічних вод, стабільності роботи та відновлення енергії/ресурсів у порівнянні з традиційним або відкритим контуром управління [6]. У сценаріях пікових навантажень ці MPC забезпечили дотримання нормативних вимог щодо азоту, зберігаючи при цьому оптимальний баланс витрат та енергії, продемонструвавши гнучкість у збалансуванні суперечливих цілей.

- Мембранні біореактори (MBR): Системи моніторингу та контролю на основі штучного інтелекту, продемонстрували ефективність у мінімізації забруднення мембран, підтримці високого рівня видалення біогенних речовин (>98% для азоту та фосфору) та підтримці якості стічних вод у межах граничних значень навіть за мінливих характеристик вхідних стічних вод [3]. Використання моніторингу трансмембранного тиску та розчинних мікробних продуктів у реальному часі, реалізованого за допомогою передових спектроскопічних та багато сенсорних аналітичних методів, сприяє превентивному технічному обслуговуванню та оптимальним циклам очищення, скорочуючи час простою та споживання енергії.

2. Цифровізація, Індустрія 4.0 та інтеграція Bioprocessing 4.0: швидка еволюція програмного забезпечення платформ (SCADA, DCS, хмарна аналітика) та незалежних від постачальників інтерфейсів дозволила забезпечити безперебійне з'єднання між датчиками PAT, PLC, програмною аналітикою та хмарними інформаційними панелями. Ці системи підтримують моніторинг декількох реакторів (32+ одиниці), електронний запис партій та можливість аудиту відповідно до стандартів GMP, 21 CFR Part 11 та EU Annex 11, що дозволяє швидко та масштабно розгортати їх від лабораторного/пілотного до повного комерційного виробництва.

Тим не менш, залишаються невирішені проблеми: забезпечення надійності та придатності моделей AI/ML для різних масштабів і об'єктів, стандартизація інфраструктури даних для забезпечення сумісності, перевірка гібридних моделей на відповідність нормативним вимогам, а також збалансування таких суперечливих цілей, як стабільність, вартість, енергоефективність та повторне використання ресурсів. Критичні області для майбутніх досліджень включають:

- Розробка датчиків, що не потребують клопіткого обслуговування та працюють у режимі реального часу, особливо для нових мікро- забруднювачів та мікробних/вірусних патогенів, інтегрованих з адаптивною, самодіагностичною аналітикою.

- Повномасштабне впровадження та порівняльний аналіз цифрових двійників та хмарних систем управління зі штучним інтелектом, з особливою увагою до кібербезпеки, конфіденційності даних та розуміння логіки прийняття рішень.

- Інтеграція комплексної оптимізації в режимі реального часу, що охоплює стабільність процесів, якість стічних вод, використання енергії та досягнення цілей циркулярної економіки.

- Міждисциплінарне навчання та нарощування потенціалу, забезпечення майбутніх фахівців, інженерів, необхідними вміннями для проектування, впровадження та аудиту цих систем у різних реальних сценаріях.

Таким чином, траєкторія моніторингу та контролю біопроцесів полягає у підвищенні рівня інтелекту, автоматизації та надійності, що дозволяє не тільки дотримуватися екологічних вимог та зменшити експлуатаційні витрати, але й перейти до сталого, ресурсоефективного здійснення біологічних процесів та управління ресурсами у швидкозмінному світі.

1. Rathore AS, Mishra S, Nikita S, Priyanka P. Bioprocess Control: Current Progress and Future Perspectives. *Life*. 2021; 11(6):557. <https://doi.org/10.3390/life11060557>.

2. Sharma, D., Singh, K. AI-enhanced bioprocess technologies: machine learning implementations from upstream to downstream operations. *World J Microbiol Biotechnol* 41, 278, 2025. <https://doi.org/10.1007/s11274-025-04494-5>.

3. Xu M, Liu D. AI-Enabled Membrane Bioreactors: A Review of Control Architectures and Operating-Parameter Optimization for Nitrogen and Phosphorus Removal. *Water*. 2025; 17(19):2899. <https://doi.org/10.3390/w17192899>.

4. Lyubenova V, Ignatova M, Zoteva D, Roeva O. Model-Based Adaptive Control of Bioreactors—A Brief Review. *Mathematics*. 2024; 12(14):2205. <https://doi.org/10.3390/math12142205>.

5. Butean A, Cutean I, Barbero R, Enriquez J, Matei A. A Review of Artificial Intelligence Applications for Biorefineries and Bioprocessing: From Data-Driven Processes to Optimization Strategies and Real-Time Control. *Processes*. 2025; 13(8):2544. <https://doi.org/10.3390/pr13082544>.

6. Otacilio B.L. Neto, Michela Mulas, Francesco Corona. A model-based framework for controlling activated sludge plants, *Chemical Engineering Journal*, Volume 488, 2024, 150750, ISSN 1385-8947, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.150750>.

## ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ОЧИЩЕННЯ ВОДИ ВІД ІОНІВ ЗАЛІЗА ТА МАРГАНЦЮ З ВИКОРИСТАННЯМ МАГНЕТИТУ

*Вікторія ДЕРМЕНЖИ, Микола ГОМЕЛЯ*

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського»*

*пр. Берестейський, 37, м. Київ 03056, Україна*

**e-mail:** [whiskas07otoo@gmail.com](mailto:whiskas07otoo@gmail.com)

Наявність заліза та марганцю у воді спричиняє переважно естетичні та експлуатаційні проблеми. Залізо забарвлює воду в жовтуватий або бурий колір і додає металевого присмаку. При його окисленні утворюється осад гідроксиду заліза. Марганець, у свою чергу, призводить до утворення темного осаду та плям на сантехніці [1, 2]. Крім того, підвищені концентрації заліза і марганцю сприяють розвитку залізо- та марганцеокислювальних бактерій, які утворюють слизові біоплівки в трубах і фільтрах, знижуючи пропускну здатність систем водопостачання [3]. В Україні гранично допустимі концентрації (ГДК) заліза та марганцю у питній воді регламентуються ДСанПіН 2.2.4-171-10. Для централізованих джерел постачання допустимий рівень заліза складає 0,2 мг/дм<sup>3</sup>, а марганцю — 0,05 мг/дм<sup>3</sup> [4]. Для води з колодязів і каптажів допускається більше: до 1,0 мг/дм<sup>3</sup> Fe і до 0,5 мг/дм<sup>3</sup> Mn.

Метою нашої роботи було визначення ефективності очищення води від іонів заліза та марганцю за умов інтенсивності їх аерації при кімнатній температурі з подальшим фільтруванням на насипному фільтрі.

На першій стадії водні розчини заліза ( $C_{Fe} = 5 \text{ мг/дм}^3$ ) та марганцю ( $C_{Mn} = 5 \text{ мг/дм}^3$ ) інтенсивно перемішували 30 хвилин для ефективного окиснення заліза та марганцю. Для інтенсифікації окиснення металів додавали каталізатор – магнетит у дозах  $200 \text{ мг/дм}^3$  та  $600 \text{ мг/дм}^3$ . У контрольних дослідах магнетит не додавали. Після перемішування воду фільтрували через насипний механічний фільтр. Швидкість фільтрування була  $1,9 \text{ м/год}$  та  $4,5 \text{ м/год}$ . У фільтратах визначали концентрацію іонів заліза або марганцю. Як видно із рис.1.1-1.2 у водопровідній воді при перемішуванні протягом 30 хвилин досить ефективно окиснюються іони заліза. При швидкості фільтрування  $1,9 \text{ м/год}$  залишкова концентрація заліза знижується з  $0,19 \text{ мг/дм}^3$  до  $0,12 \text{ мг/дм}^3$ . При швидкості фільтрування  $4,5 \text{ м/год}$  залишкова концентрація заліза знижується з  $0,23 \text{ мг/дм}^3$  до  $0,14 \text{ мг/дм}^3$ . Очевидно, що у другому випадку гідроксид заліза (III) затримується гірше, ніж у першому за рахунок підвищення швидкості фільтрування.

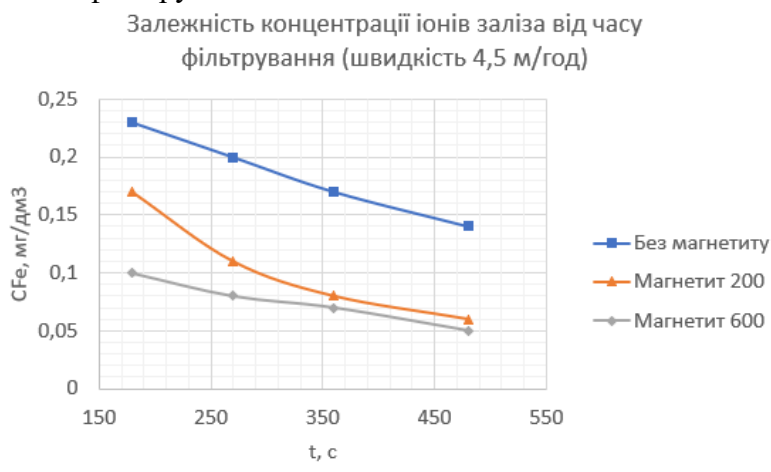


Рисунок 1.1 – Залежність концентрації іонів заліза від часу фільтрування.

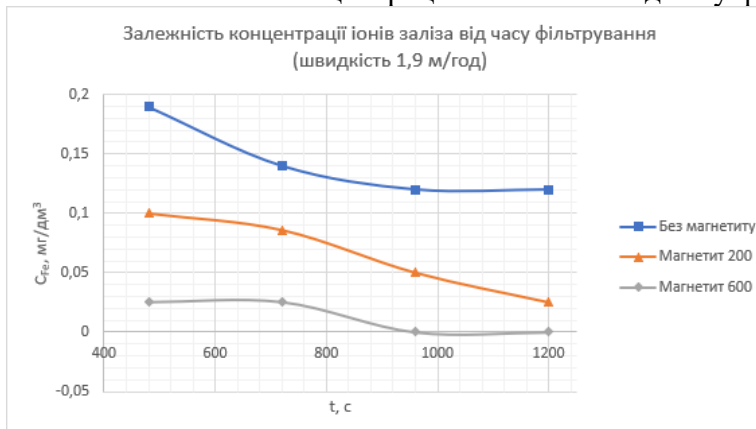


Рисунок 1.2 – Залежність концентрації іонів заліза від часу фільтрування.

Досить високих значень ступеню очищення води від іонів заліза було досягнуто в даних дослідах (рис.1.3-1.4). Як видно з рис.1.3 ступінь очищення води від іонів заліза при швидкості фільтрування  $4,5 \text{ м/год}$  без каталізатора сягав  $95,0-97\%$ , при дозі магнетиту  $200 \text{ мг/дм}^3$  – сягав  $96,5-98,7\%$ , при дозі магнетиту  $600 \text{ мг/дм}^3$  цей показник був на рівні  $98-99\%$ . При швидкості фільтрування  $1,9 \text{ м/год}$  показники були вищими і сягали рівнів – без каталізатора  $96,0-97,5\%$ , при дозі магнетиту  $200 \text{ мг/дм}^3$  –  $98,0-99,5\%$ , а при дозі  $600 \text{ мг/дм}^3$  –  $99,5-100\%$ .

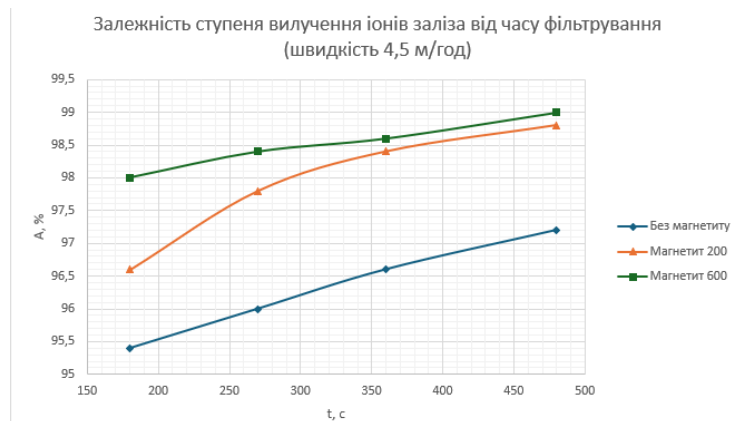


Рисунок 1.3 – Залежність ступеня вилучення іонів заліза від часу фільтрування.

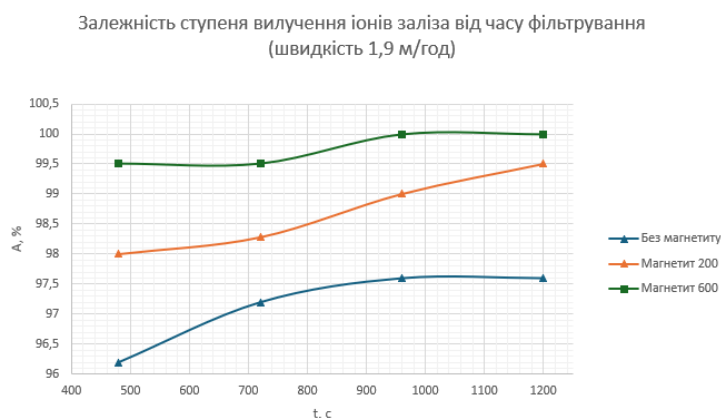


Рисунок 1.4 – Залежність ступеня вилучення іонів заліза від часу фільтрування.

Залишковий вміст марганцю знижувався з  $0,9 \text{ мг/дм}^3$  до  $0,7 \text{ мг/дм}^3$  (рис.1.5). При дозі магнетиту  $200 \text{ мг/дм}^3$  концентрація марганцю знижувалась з  $0,6 \text{ мг/дм}^3$  до  $0,4 \text{ мг/дм}^3$ , а при дозі  $600 \text{ мг/дм}^3$  концентрація марганцю знижувалась до  $0,4-0,25 \text{ мг/дм}^3$ .

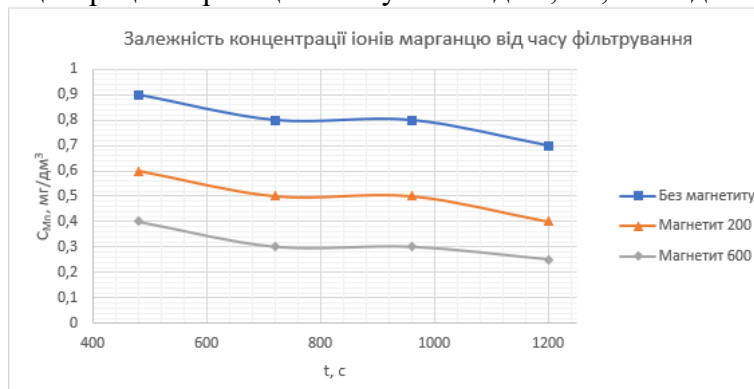


Рисунок 1.5 – Залежність концентрації іонів марганцю під час фільтрування.

Результати по ступеню вилучення іонів марганцю з води приведені на рис.1.6. Ступінь вилучення іонів марганцю без каталізатора сягав 82-86%. При дозі магнетиту  $200 \text{ мг/дм}^3$  ступінь вилучення марганцю сягав 88-92%, а при дозі  $600 \text{ мг/дм}^3$  цей показник був на рівні 92-95%.

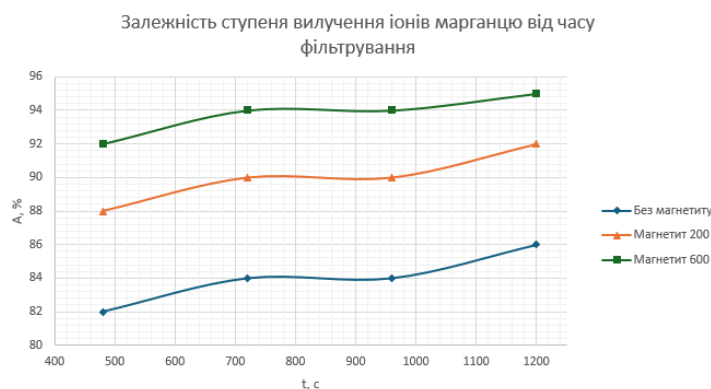


Рисунок 1.6 – Залежність ступеню вилучення іонів марганцю від часу фільтрування.

Таким чином, у результаті дослідження було: обґрунтовано актуальність проблеми забруднення вод залізом і марганцем, експериментально підтверджено ефективність використання магнетиту як функціональної добавки до процесу фільтрації, доведено, що магнетит може виступати в ролі адсорбента, каталізатора або структурного активатора при фільтрації та визначено оптимальні умови його використання.

#### Література

1. Рижков О. О. Хімічні елементи у природних водах України. – Львів: Вид-во ЛНУ, 2012. – 312 с.
2. Iron and Manganese in Private Water Systems [Електронний ресурс] // PennState Extension. – 2020.
3. Iron and Manganese in Well Water [Електронний ресурс] // Connecticut DPH. – 2022.
4. Державні санітарні норми та правила "Гігієнічні вимоги до питної води, призначеної для споживання людиною". ДСанПіН 2.2.4-171-10.

## СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ БІОЛОГІЧНОГО ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД ПІДПРИЄМСТВ М'ЯСОПЕРЕРОБНОЇ ГАЛУЗІ

*Дубовенко В.Ю. ст., Саблій Л.А. д.т.н., проф.*

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна, м. Київ, [dubovenko.vladislav@iill.kpi.ua](mailto:dubovenko.vladislav@iill.kpi.ua)

Забруднення водних ресурсів промисловими стічними водами (СВ) є однією з важливих екологічних проблем сучасності. Підприємства м'ясопереробної галузі генерують значні обсяги висококонцентрованих стічних вод, які без належного очищення можуть спричинити деградацію водних екосистем. Скидання неочищених або недостатньо очищених стоків призводить до евтрофікації водойм, масової загибелі гідробіонтів, погіршення якості питної води, що створює загрози для здоров'я населення.

Стічні води м'ясопереробних підприємств (СВМП) утворюються внаслідок процесів забою тварин, переробки м'яса, а також миття обладнання та виробничих приміщень. Вони характеризуються високим вмістом органічних речовин, біогенних елементів (азоту та фосфору), жирів, завислих речовин, а також можуть містити патогенні мікроорганізми, детергенти та дезінфектанти. Основними джерелами забруднень є кров, жир, дрібні частинки м'яса, шерсті, пір'я, шкіра та миючі засоби, що використовують для санітарної обробки обладнання та приміщень.

Показники забруднення стічних вод забійних цехів і м'ясокомбінатів характеризуються значними коливаннями: ХСК – 1100-15000 мг/дм<sup>3</sup> (в окремих випадках до 40000 мг/дм<sup>3</sup>); БСК<sub>5</sub> – 600-4600 мг/дм<sup>3</sup>; завислі речовини – 220-6400 мг/дм<sup>3</sup>; загальний азот – 50-840 мг/дм<sup>3</sup>; амонійний азот – 20-300 мг/дм<sup>3</sup>; загальний фосфор – 8-200 мг/дм<sup>3</sup>; жири – 40-1400 мг/дм<sup>3</sup>; рН 5-7,8 [1, 2].

Співвідношення БСК<sub>5</sub>/ХСК зазвичай перевищує 0,6, що свідчить про високу біодеградабельність СВ. Оптимальне співвідношення ХСК:N:P створює сприятливі умови для мікробіологічної деструкції забруднень в ході біологічного очищення.

Для очищення СВМП застосовують комплексний підхід, що включає механічні, фізико-хімічні та біологічні методи. Механічне очищення (решітки, сита, пісковловлювачі, жировловлювачі) використовують на першому етапі для видалення грубодисперсних домішок та значної частини жирів.

Фізико-хімічні методи, такі як коагуляція, флокуляція, напірна флотація, електрокоагуляція, мембранні технології (ультрафільтрація, зворотний осмос), часто дозволяють досягти високого ступеня очищення. Проте, вони мають суттєві недоліки: висока вартість, значне споживання енергії, необхідність використання хімічних реагентів та проблема утилізації великої кількості утворених осадів і шламів. Це зумовлює пріоритетність біологічних методів очищення висококонцентрованих органічних стоків [3].

Однак, методи коагуляції та напірної флотації можна ефективно застосувати на стадії попереднього очищення таких СВ перед скидом їх в міську систему водовідведення з досягненням ефективності за ХСК – 58-62%; ЗР – 90-95%; СПАР – 88%; фосфатами – 62-65%; азотом амонійним – 40-42%, з показниками очищеної води, відповідно: ХСК – 460-670 мг/дм<sup>3</sup>; ЗР – 10-23 мг/дм<sup>3</sup>; СПАР – 0,43-0,08 мг/дм<sup>3</sup>; фосфати – 3,6-5,4 мг/дм<sup>3</sup>; азот амонійний – 15,3-17,0 мг/дм<sup>3</sup> [4].

Анаеробні процеси є надзвичайно привабливими для першого ступеня біологічного очищення висококонцентрованих СВМП. Їх перевагами є низьке енергоспоживання (відсутність потреби в аерації), менша кількість утвореної біомаси, а головне – можливість отримання біогазу як цінного енергетичного ресурсу. Недоліками є чутливість до змін температури, токсичних забруднень (СПАР, іони важких металів та ін.), складність забезпечення відсутності кисню, довший період запуску та нижча ефективність видалення сполук азоту та фосфору.

Серед анаеробних біореакторів найпоширеніші – UASB-реактори (Upflow Anaerobic Sludge Blanket). Стічна вода в них подається знизу вгору через шар гранульованого анаеробного мулу. Висока концентрація біомаси в гранулах забезпечує інтенсивне очищення при високих органічних навантаженнях. Однак реактори чутливі до високого вмісту жирів та ЗР, що може призводити до спливання та виносу мулу. Ефективність видалення ХСК досягає 70% при органічному навантаженні 1,27-17 кг ХСК/(м<sup>3</sup>·добу). Основними перевагами є високий ступінь зниження ХСК, мала тривалість процесу, низьке утворення надлишкового мулу, вихід біогазу – 0,3-0,67 дм<sup>3</sup> СН<sub>4</sub>/г ХСК, відсутність потреби в аерації [2].

EGSB-реактори (Expanded Granular Sludge Bed) – удосконалена модифікація UASB з рециркуляцією потоку для покращення масообміну. Висхідна швидкість потоку підтримується на рівні 4-10 м/год порівняно з 0,5-1,5 м/год в UASB. Це забезпечує кращий контакт біомаси зі стічною водою та стабільну роботу при змінних навантаженнях. Ефект видалення за ХСК досягає 83% при навантаженнях до 35 кг ХСК/(м<sup>3</sup>·добу) [2, 5].

Анаеробні фільтри містять нерухомі носії (пластикові елементи, керамзит), на поверхні яких іммобілізована біомаса. Зниження ХСК становить 60-85% (навантаження 0,5-11 кг/(м<sup>3</sup>·добу)) [1]. Вони прості в експлуатації та стійкі до коливань навантаження, але мають ризик кольматації носія за високих концентрацій ЗР та жирів.

Анаеробні SBR (Sequencing Batch Reactor) працюють у періодичному режимі з послідовними фазами заповнення, анаеробної деструкції, відокремлення гранул від очищеної води. Зниження ХСК становить 68-95% при навантаженнях 0,6-12 кг/(м<sup>3</sup>·добу). Перевагами є гнучкість управління процесом та відсутність вторинних відстійників [1,2].

Анаеробні мембранні біореактори (AnMBR) – сучасна технологія, що поєднує анаеробний процес з мембранною фільтрацією. Мембрана з більшою ефективністю затримує гранули мулу в реакторі, що дозволяє підтримувати високі дози мулу і отримати очищену воду найвищої якості не тільки за ЗР, ХСК, а й за сполуками N і P. Ефективність за ХСК – понад 95%. Основні недоліки – забруднення мембран і необхідність їх регенерації та високі капітальні витрати [1].

Аеробне очищення можна використовувати як самостійний метод в двоступеневих технологіях і як другий ступінь після анаеробного процесу. Використовують активний мул (АМ) в умовах інтенсивної аерації. Цей метод також можна використовувати для видалення сполук азоту та фосфору. Переваги – висока ефективність видалення органічних речовин (ХСК та БСК на 85-89%), а також сполук азоту (нітри- та денітрифікація) і фосфору, менша чутливість до коливань температури. Недоліки – можливе «спухання» мулу через наявність жирів та розвиток нитчастих мікроорганізмів, що погіршує його осадження, високі енерговитрати (аерація, рециркуляція АМ) та утворення значних об'ємів надлишкового АМ.

Аеробні SBR – усі процеси (заповнення, аерація, перемішування, відстоювання) відбуваються циклічно в одному резервуарі. Це забезпечує гнучкість управління, компактність споруд. Такі реактори забезпечують високий ступінь очищення СВ від сполук азоту та фосфору завдяки чергуванню аеробних, аноксидних та анаеробних зон. Ефект за ХСК досягає 95-97%, загальним азотом – 90-98%, загальним фосфором – 72-98% [2].

IFAS-системи (Integrated Fixed Film Activated Sludge) – комбінована технологія, яка влаштована при розміщенні нерухомих носіїв біомаси (пластикові елементи з питомою поверхнею 200-800 м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>) в аеротенку з АМ. Це дозволяє одночасно функціонувати двом типам біоценозів – завислому та прикріпленому, що значно інтенсифікує процеси, особливо нітрифікацію. Ефект за ХСК становить 90-93%, загальним азотом – 67-90% [2].

MBBR (Moving Bed Biofilm Reactor) використовують рухомі (в об'ємі реактора) носії біоплівки (заповнення 25-70%). Носії забезпечують стабільну роботу при коливаннях навантажень, зниження ХСК до 97% при навантаженнях 5-15 кг/(м<sup>3</sup>·добу). Перевагами є відсутність рециркуляції АМ, низькі об'єми осадів, а відтак, матеріало- та енерговитрати на їх обробку [2, 6].

Аеробна грануляція – одна з найновіших технологій, що реалізується переважно в SBR-реакторах. За певних гідродинамічних умов мікроорганізми утворюють щільні гранули, а не пластівці. Внаслідок дифузійних обмежень кисню всередині гранули створюються аноксидні та анаеробні зони, що дозволяє одночасно здійснювати окиснення органіки та нітрифікацію в аеробних умовах, а денітрифікацію і видалення фосфору – в товщі гранул в анаеробних умовах. Це значно скорочує тривалість циклу та підвищує ступінь очищення води – понад 95% за ХСК і амонієм, 83-98% за загальним азотом [1].

Комбіновані (послідовні) анаеробно-аеробні системи. Для досягнення високого ступеня очищення СВМП найефективнішим є послідовне застосування анаеробних та аеробних методів. Така схема дозволяє оптимально використати переваги обох методів. На першому (анаеробному) ступені видаляється основна маса (до 80-90%) органічних забруднень з одночасною генерацією біогазу. На другому (аеробному) ступені відбувається очищення від залишкової органіки, окиснення амонійного азоту (нітрифікація) та видалення сполук фосфору. Це дозволяє суттєво знизити енерговитрати на аерацію порівняно з аеробною технологією та отримати очищену воду високої якості відповідно до

норм скиду у природні водойми або до норм повторного використання на виробництві. Наприклад, UASB + SBR, анаеробний фільтр + MBBR, EGSB + аноксидно-аеробні реактори [1, 2].

Отже, біологічні технології використовують для очищення СВ м'ясопереробних підприємств завдяки економічній ефективності та екологічності. Сучасні анаеробні реактори (UASB, EGSB) забезпечують ефективне видалення органічних забруднень з одночасним виробництвом біогазу. Аеробні технології нового покоління (SBR, IFAS, системи з гранулами АМ) дозволяють досягти глибокого видалення органічних речовин.

Оптимальним рішенням є застосування комбінованих анаеробно-аеробних систем, що поєднують переваги обох методів: енергоефективність анаеробної стадії та високу якість очищення аеробної. Вибір технології залежить від складу та витрати стічних вод, вимог до якості очищеної води, наявності вільних площ та капітальних інвестицій. Майбутній розвиток технологій очищення СВ пов'язаний з інтенсифікацією процесів у компактних реакторах (AnMBR, MBBR) та впровадженням концепції циркулярної економіки, що передбачає не лише очищення води, а й максимальне вилучення ресурсів (енергія з біогазу, поживні речовини для добрив, повторне використання очищеної води).

#### Література:

1. A. Aziz et al. Biological wastewater treatment (anaerobic-aerobic) technologies for safe discharge of treated slaughterhouse and meat processing wastewater. *Science of The Total Environment*. 2019. Vol. 686. P. 681–708. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.295>.
2. B. R. Baker et al. Advanced technologies for poultry slaughterhouse wastewater treatment: A systematic review. *Journal of Dispersion Science and Technology*. 2020. P. 1–20. URL: <https://doi.org/10.1080/01932691.2020.1721007>.
3. Musa M. A., Idrus S. Physical and Biological Treatment Technologies of Slaughterhouse Wastewater: A Review. *Sustainability*. 2021. Vol. 13, no. 9. P. 4656. URL: <https://doi.org/10.3390/su13094656>.
4. Саблій Л.А., Жукова В.С., Єпішова Л.Д. Вдосконалення технології локального очищення стічних вод м'ясокомбінату / Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки: наук.-техн. зб. 2022. Вип. 41. С. 66-75. DOI: <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2022.41.66-75>.
5. Shende A. D., Pophali G. R. Anaerobic treatment of slaughterhouse wastewater: a review. *Environmental Science and Pollution Research*. 2020. Vol. 28, no. 1. P. 35–55. URL: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10921-x>.
6. Kundu P., Debsarkar A., Mukherjee S. Treatment of Slaughter House Wastewater in a Sequencing Batch Reactor: Performance Evaluation and Biodegradation Kinetics. *BioMed Research International*. 2013. Vol. 2013. P. 1–11. URL: <https://doi.org/10.1155/2013/134872>.

## ВИЗНАЧЕННЯ МЕХАНІЗМУ ОСАДОУТВОРЕННЯ НА КЕРАМІЧНІЙ МІКРОФІЛЬТРАЦІЙНІЙ МЕМБРАНІ

*Дульнева Т.Ю., Деремешко Л.А.*

*Інститут колоїдної хімії та хімії води ім. А.В. Думанського НАН України,  
Україна, м. Київ, e-mail: t\_dulneva@ukr.net*

На сьогодні баромембранні методи зайняли важливе місце в технології водоочищення та мають широке практичне застосування. Особливо перспективним є використання керамічних мембран для очищення води, що пов'язане з їх численними перевагами в порівнянні з системами фільтрації на полімерній основі. Однак, проблемою при реалізації процесу мікрофільтрації є неоднорідний розподіл пор керамічних мембран за розміром, що обумовлено технологією їх виготовлення. З метою зменшення пор та покращення селективних властивостей розроблених в ІКХХВ ім. А.В. Думанського НАН України трубчастих мікрофільтраційних керамічних мембрани з глинистих матеріалів [1] запропоновано їх модифікування з подальшим утворенням динамічних мембран (ДМ) з гідроксидів металів на їх поверхні в процесі очищення води від зазначених сполук.

Як відомо, ДМ формується при проходженні через пористу основу (підкладку) наявних у розчині, що підлягає обробці, диспергованих речовин, які здатні утворювати мембрану та знаходяться у динамічній рівновазі з розчином [2]. В основу пояснення механізму утворення ДМ покладена теорія конвективного фільтрування [3].

Відповідно до теорії фільтрування, яку можна застосувати і для баромембранних процесів, виділяють чотири основні рівняння, які характеризують процес утворення ДМ з урахуванням різних механізмів фільтрування [4] (табл. 1).

Таким чином, використовуючи рівняння (табл. 1), можна кількісно описати процес утворення ДМ з гідроксидів металів Al(III). За результатами досліджень проводили обробку кінетичних даних, що графічно представлені в координатах згідно з табл. 1.

Таблиця 1. Механізми фільтрування, які описують процес утворення динамічних мембран

Механізми фільтрування	Рівняння, що характеризують закономірності процесу	Координати, в яких представлені експериментальні дані
Фільтрування із закупорюванням кожної пори однією частинкою (з повним закупорюванням пор мембрани). Такий механізм на практиці зустрічається вкрай рідко	$I_{\tau} = I_0 - k_1 \cdot q$	$q - J_v$
Фільтрування з поступовим закупорюванням кожної пори багатьма частинками (з поступовим закупорюванням пор мембрани)	$\tau/q = 1/I_0 + k_2 \cdot \tau/2$	$\tau - \tau/q$
Фільтрування за проміжним механізмом (між поступовим закупорюванням пор і утворенням осаду на поверхні мембрани)	$1/I_{\tau} = 1/I_0 + k_3 \cdot q/2$	$\tau - \tau/q$
Фільтрування з утворенням осаду на поверхні мембрани	$\tau/q = 1/I_0 + k_4 \cdot q/2$	$q - \tau/q$

\*Примітка:  $q$  – об'єм фільтрату, який пройшов крізь 1 м<sup>2</sup> поверхні мембрани, м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>;  $\tau$  – тривалість фільтрування, с;  $J_v$  – питома продуктивність мембрани в будь-який проміжок

часу,  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ;  $I_0$  – питома продуктивність мембрани на початку процесу,  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ;  $k_1$  –  $k_4$  – константи фільтрування.

Константи фільтрування ( $k$ ) характеризували інтенсивність зменшення швидкості процесу зі збільшенням кількості відфільтрованого розчину і визначалися як тангенс кута нахилу відповідної прямої до осі абсцис [3].

З метою встановлення механізмів утворення ДМ з гідроксисполук  $\text{Al}(\text{III})$  дослідження проводили на модельному розчині  $\text{AlCl}_3$  з концентрацією  $\text{Al}(\text{III})$   $65 \text{ мг/дм}^3$  і рН  $7 \text{ мг/дм}^3$ . У дослідженнях використовували розроблені нами мікрофільтраційні керамічні мембрани з глинистих матеріалів [1], виготовлені методом шлікерного лиття, які мали наступні параметри: загальна та робоча довжина, відповідно,  $125$  і  $95 \text{ мм}$ ; зовнішній і внутрішній діаметри –  $11$  і  $5 \text{ мм}$ ; робоча зовнішня і внутрішня поверхні, відповідно,  $3,28 \cdot 10^{-3}$  та  $2,36 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ ; максимальний діаметр пор мембран –  $11,7$ – $13,4 \text{ мкм}$ ; пористість –  $40,0$ – $42,2\%$ . Для експерименту використовували дослідну проточну мікрофільтраційну установку.

Як показали експерименти з очищення води від  $\text{Al}(\text{III})$  зазначеною керамічною мембраною зниження її питомої продуктивності впродовж процесу вказує на осадження на її поверхні нерозчинних гідролітичних форм (гідроксисполук)  $\text{Al}(\text{III})$  з подальшим утворенням ДМ. Механізм її утворення на поверхні мембрани визначали з прямолінійної залежності на відповідному графіку (рис. 1 (а)–(г)).

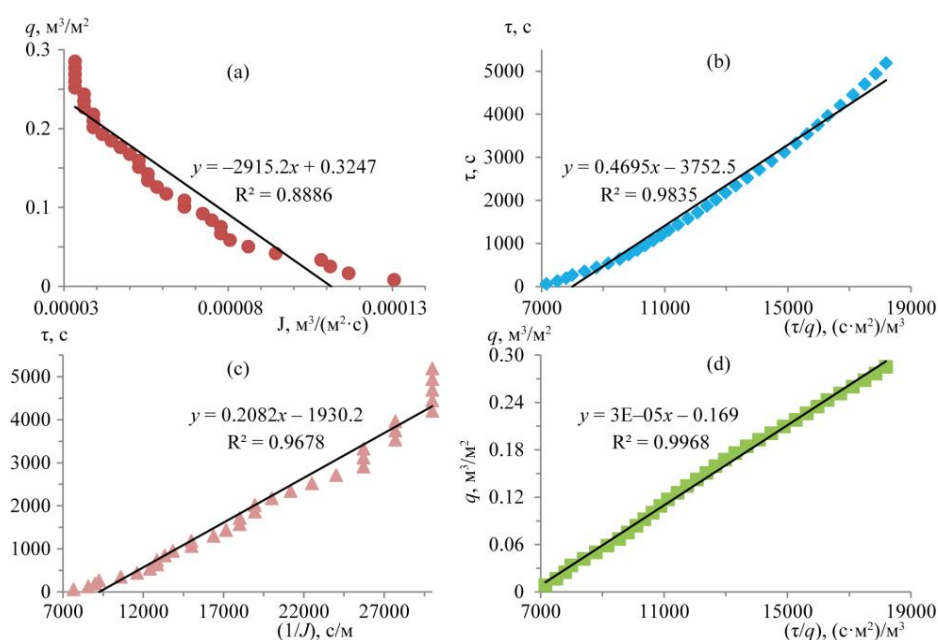


Рис. 1. Процес утворення динамічної мембрани з гідроксисполук  $\text{Al}(\text{III})$  на керамічній мембрані з використанням теорії конвективного фільтрування (згідно з таблицею): з повним закупорюванням пор мембрани (а); з поступовим закупорюванням пор мембрани (б); проміжний механізм (в); з утворенням осаду на поверхні мембрани (г).  $C_0\text{Al}(\text{III})$  –  $65,0 \text{ мг/дм}^3$ ; рН –  $7,0$ ;  $P$  –  $1,0 \text{ МПа}$

Для дослідженої системи – керамічна мембрана/розчин, що містив гідроксисполуки  $\text{Al}(\text{III})$ , переважав механізм утворення осаду на поверхні керамічної мікрофільтраційної мембрани, про що свідчила пряма лінія на рис. 1 (г) і високий коефіцієнт кореляції ( $R=0,99$ ) (для ідеальних випадків  $R = 1$ ). Припускаючи, що гідроксисполуки  $\text{Al}(\text{III})$  схильні

утворювати міцні пористі (аморфні) осади, які нездатні проходити крізь мембрану, відбувалося формування динамічного шару, що збільшувало гідравлічний опір і призводило до зниження продуктивності мембрани.

Однак, з рис. 1 (б) (механізм поступового закупорювання пор) видно, що коефіцієнт кореляції і в цьому випадку мав близьке до одиниці значення, а експериментальні дані утворювали три прямолінійні ділянки з різним нахилом. Можна припустити, що протягом перших 10 хв від початку процесу відбувалося часткове закупорювання пор мембрани частинками гідроксисполук  $Al(III)$ . Якщо розглядати поверхню керамічних мембран, то вона не має яскраво виражених пор круглої форми. Поверхня нагадує злиплі дрібні гранули твердих мінералів, які через свою форму не прилягають щільно одна до одної і утворюють щілини, крізь які проходить розчин, що фільтрується (очищується). Такий процес очищення дуже схожий на процес фільтрації у насипних самопромивних піщаних фільтрах, але в разі мембрани рейтинг фільтрації набагато вищий. Виходячи з опису механізму очищення і структури керамічної мембрани, можна зробити припущення, що часткове закупорювання пор відбувалося у верхніх шарах мембрани, адже такий механізм передбачає неповне перекриття пори частинкою.

Враховуючи, що гідроксисполук  $Al(III)$  представляють собою аморфний осад, очевидно, він міг затримуватися на поверхні керамічної мембрани і, тим самим, перекривати переріз щілин (пор). Однак, через розміри частинок гідроксисполук  $Al(III)$ , такий процес відбувався на поверхні керамічної мембрани, що збільшувало їх концентрацію у її верхньому шарі та призводило до утворення аморфного осаду на поверхні мембрани. Таким чином, можна припустити, що механізм часткового перекривання пор керамічної мембрани одночасно забезпечував формування осаду на її поверхні. Аморфний осад мав свою пористість, яка також поступово зменшувалася шляхом закупорювання частинками гідроксисполук  $Al(III)$ . Такий етап характеризувався зміною кута нахилу прямої лінії (рис. 1 (б)) в інтервалі від 10 до 58 хв процесу мікрофільтрації, а далі продуктивність мембрани практично стабілізувалася, що свідчило про встановлення динамічної рівноваги в системі мембрана/розчин. Слід зазначити, що через низьку швидкість фільтрації, рівень концентраційної поляризації знижувався, що змінювало швидкість формування осаду.

Отже, з використанням математичного апарату теорії конвективного фільтрування проаналізовано експериментальні результати зміни питомої продуктивності трубочастої мікрофільтраційної керамічної мембрани з глинистих матеріалів у процесі очищення води від сполук  $Al(III)$ . Аналіз кривих (рис. 1 (а)–(г)) дозволив зробити висновок, що зазначена мембрана змінювала механізм фільтрування від поступового закупорювання пор кількома частинками (рис. 1 (б)) до відкладення осаду з гідроксисполук  $Al(III)$  на її поверхні з утворенням ДМ, про що свідчила пряма лінія (рис. 1 (г)).

### Перелік посилань

1. ТУ У 29.2-05417348-014:2014. Мембрани керамічні "Керама". Київ. 2015. 17 с.
2. Брик М.Т. Енциклопедія мембран. Том 1. Київ: Вид. дім "Києво-Могилянська академія". 2005. 658 с.
3. Жужиков В.А. Фильтрация: Теория и практика разделения суспензий. М: Химия. 1980. 400 с.
4. Цапюк Е.А., Бадеха В.П., Кучерук Д.Д. Современные представления о кинетике образования динамических мембран. Химия и технология воды. 1980. Т. 2, № 2. С. 224–229.

## ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ СУПУТНЬО-ПЛАСТОВИХ ВОД ДЛЯ ЗАДОВОЛЬНЯННЯ ПОТРЕБ УКРАЇНИ У КРИТИЧНІЙ СИРОВИНІ

*Єлатонцев Д.О.*

*Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН, Україна, м. Дніпро,  
sauron11652@gmail.com*

У технологічних процесах видобутку, підготовки та транспортування нафти та газу утворюється значна кількість нафтовидобувних і газопромислових відходів, які являють собою екологічно небезпечні утворення. Проблема знешкодження таких відходів до теперішнього часу не має комплексного вирішення. Утилітарний підхід (наприклад, спалювання, біорозкладання або захоронення) передбачає одночасне фізичне знищення корисних компонентів, що містяться в нафтовидобувних відходах у вигляді органічних та неорганічних сполук. Унаслідок цього виникають безповоротні втрати вже видобутої мінеральної сировини, а самі процеси екологічного знешкодження відходів здебільшого не є завершеними – вони лише частково знижують екологічне навантаження. Проте у більшості випадків подібна практика пояснюється відсутністю економічних технологій із безвідходним циклом перетворення небезпечних для довкілля утворень у технологічно корисний і екологічно безпечний продукт. Це свідчить про те, що проблему забезпечення комплексності та екологічної безпеки при утилізації нафтовидобувних відходів із додатковим вилученням мінеральної сировини слід розглядати як один із пріоритетних напрямів розвитку технологій XXI століття [1].

У межах цього підходу вирішуються наступні завдання, що забезпечують:

- комплексність утилізаційного процесу, яка передбачає створення безвідходних виробничих систем із замкненим або оборотним технологічним циклом;
- екологічну безпеку, що полягає у переведенні всіх складових нафтовидобувних відходів у екологічно безпечні або інертні сполуки;
- додаткове вилучення критичної мінеральної сировини, яке забезпечує розширення мінерально-сировинної бази за рахунок трансформації нафтовидобувних і газопромислових відходів у корисний товарний продукт.

Пластові води Східного нафтогазового басейну України являють собою розсоли хлоридно-кальцієвого типу з мінералізацією від 250 до 400 г/дм<sup>3</sup>, які містять значні кількості бромиду (до 1000 мг/дм<sup>3</sup>), йодиду (20–600 мг/дм<sup>3</sup>), а також стронцію (100–300 мг/дм<sup>3</sup>), бору (5–100 мг/дм<sup>3</sup>), літію (2–20 мг/дм<sup>3</sup>), магнію (150–5500 мг/дм<sup>3</sup>) та інших елементів [2]. Варто зазначити, що пластові води Західного регіону (зокрема, Львівської області) мають подібний хімічний склад, а вміст літію в них навіть вищий. У зв'язку з цим пластові води, що піднімаються на поверхню під час видобутку нафти й газу, доцільно розглядати як додаткове джерело критичної мінеральної сировини.

Наявні методи утилізації нафтовидобувних і газопромислових відходів здебільшого орієнтовані на вирішення окремих технологічних завдань: підготовку та закачування попутних вод у пласт, спалювання агресивних газів або їх дегазацію, складування чи захоронення нафтовмісних відходів тощо. Ці заходи частково знижують екологічну небезпеку для природних об'єктів, однак проблема в цілому не розглядається у комплексному екологічно-технологічному аспекті. Водночас на сьогодні існують усі необхідні технологічні передумови для реалізації комплексної переробки нафтовидобувних і газопромислових відходів із одночасним вилученням мінеральної сировини для отримання додаткової товарної продукції. Це дозволяє зменшити техногенний негатив, розширити мінерально-сировинну базу та частково компенсувати витрати на видобуток некондиційних запасів із надр.

Перспективний підхід ґрунтується на принципі комплексної утилізації нафтовидобувних відходів, структурна схема якої була запропонована на основі аналізу сучасного промислового й наукового досвіду в галузі екологічних технологій знешкодження. Комплексна технологія вилучення йоду, бромиду, літію, стронцію та бору передбачає попереднє очищення вод від органічних домішок і нафтопродуктів, подальше окиснення та екстракцію галогенів, концентрацію залишкового розсолу, а також селективне виділення лужних і лужноземельних металів. Такий підхід забезпечує раціональне використання ресурсів пластових вод та підвищує економічну ефективність їх утилізації.

На першому етапі здійснюється попередня підготовка розсолу, що включає дегазацію, відстоювання, коагуляцію та фільтрування для видалення нафти, завислих речовин і органічних домішок. Після цього проводиться стадія окиснення, під час якої бромід-іони переводяться у вільний бром із подальшою його конденсацією або екстракцією. Вилучення йоду здійснюється за допомогою аніонообмінних смол, що сорбують іодид-іони, після чого проводиться десорбція та окиснення до молекулярного йоду.

Залишковий розсіл концентрують методами нанофільтрації, зворотного осмосу або випарювання, що дозволяє зменшити об'єм і частково видалити іони кальцію та магнію, які заважають подальшому виділенню літію. Для вилучення літію застосовуються іон-ситові сорбенти, оксидно-марганцеві та титанові адсорбенти або електрохімічні методи селективної екстракції. Стронцій видаляється шляхом осадження у вигляді карбонату  $\text{SrCO}_3$  або сульфату  $\text{SrSO}_4$ , а також за допомогою катіонообмінних матеріалів. Бор вилучається переважно за допомогою спеціалізованих сорбентів, іонообмінних матеріалів або шляхом мембранної обробки при підвищеному рН, що сприяє переходу бору у форму боратів і підвищує ефективність його видалення.

Схема процесу включає послідовні стадії: очищення і дегазацію, окиснення бромиду, сорбцію йоду, концентрацію розсолу, селективне вилучення літію, осадження стронцію та фінальну стадію вилучення бору. Для реалізації процесу використовуються типові промислові апарати: сепаратори, флотаційні установки, реактори окиснення, колони іонного обміну, установки мембранної фільтрації та випарювальні системи.

Літературні дані свідчать, що ефективність вилучення бромиду перевищує 90 %, йоду – 40–80 %, літію – 50–90 % (залежно від співвідношення  $\text{Mg/Li}$ ), стронцію – понад 80 %, бору – до 95 % при застосуванні комбінованих методів. Основними технологічними ризиками є висока енергоємність випарних процесів, чутливість сорбентів до органічних домішок, необхідність безпечного поводження з реагентами ( $\text{Cl}_2$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{NaOH}$ ) і потреба в утилізації концентратів і регенераційних розчинів.

Розроблювана в ІГТМ НАН України технологічна схема [3] дозволяє комплексно використовувати ресурси супутньо-пластових вод, знижуючи їх екологічну небезпеку та забезпечуючи отримання хімічних продуктів, які мають критичне значення для розвитку вітчизняної промисловості – йоду, бромиду, бору, сполук літію та стронцію. Її впровадження може стати перспективним напрямом раціонального природокористування та розвитку технологій «зеленої хімії» у нафтовидобувній галузі України.

### Перелік посилань

1. Логвин, М.С., Скляр, К.С., & Єлатонцев, Д.О. (2023). Комплексна утилізація супутньо-пластових вод: сучасні виклики і перспективи України. *Матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції «Чиста вода. Фундаментальні, прикладні та промислові аспекти»*. Київ, Україна, с. 98-99.
2. Мухачев, А.П., Шевченко, В.Г., Єлатонцев, Д.О., Голуб, П.С., & Політучий, О.І. (2023). Гідромінеральні ресурси Полтавщини – перспективне джерело цінних хімічних елементів.

Збірник наукових праць XVI Міжнародної науково-практичної конференції «Академічна й університетська наука: результати та перспективи». Полтава, Україна, с. 309-311.

3. Єлатонцев, Д.О., Мухачев, А.П., & Шевченко, В.Г. (2024). Перспективні технології видобутку літію в Україні. *Матеріали XXII міжнародної конференції молодих вчених «Геотехнічні проблеми розробки родовищ»*. Дніпро, Україна, с. 21-26.

## РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ УТИЛІЗАЦІЇ СОРБЕНТІВ НА ОСНОВІ МОДИФІКОВАНОГО ПАЛИГОРСЬКІТУ, ЩО МІСТЯТЬ ІОНИ Cr(VI) ТА Co (II) Жданюк Н.В.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського, Україна, Київ, zhdanyukn.,kpi@gmail.com

У дослідженні використовували відпрацьований сорбент на основі глинистого мінералу – палигорськіту Черкаського родовища, с. Дашуківка. Палигорськіт є магnezіальним алюмосилікатом з хімічною формулою –  $Mg_{2,5}Al_2 [Si_8O_{20}](OH)_2 \cdot 8H_2O$ . Кристалічна структура мінералу є проміжним типом між ланцюговими і шаруватими силікатами.

Катіонно-обмінна ємність палигорськіту складає 50–300 ммоль-екв/кг. Мінерал характеризується високим значеннями питомої поверхні, яка може сягати 800–900 м<sup>2</sup>/г. Таким чином, розвинена питома поверхня і здатність до катіонного обміну, робить доцільним його використання у сорбційних технологіях очищення водних середовищ від катіонів важких металів. З метою підвищення сорбційних властивостей мінералу, синтезували композит у якого поверхню палигорськіту модифікували катіонними ПАР та наносили шар нанорозмірного нуль-валентного заліза (nZVI). Такі сорбенти використовували для вилучення як катіонів так і аніонів важких металів. Очищення водних середовищ проводили від іонів хром(VI) та кобальту(II).

Для утилізації відпрацьованих сорбентів використано високотемпературну обробку із використанням керамічної технології. Відпрацьовані сорбенти були піддані термічній обробці за температур 300, 500, 700, 800, 900, 950, 1000, 1050 та 1100°C (рис. 1) та вивчено їх структуру, міцнісні характеристики та хімічну стійкість.



Рис. 1. Термооброблені зразки відпрацьованого сорбенту:  
1- 950 °C; 2 - 1000 °C; 3- 1050 °C; 4 - 1100°C

Термогравіметричні дослідження сорбентів проводили на приладі Derivatograph Q-1500 (Угорщина) системи «Паулік-Паулік-Ердей» (рис. 1). Було підтверджено, що за температури вище 700 °C спостерігається руйнування кристалічної решітки мінералу і залишається тільки деяка впорядкованість в розміщенні іонів. В температурному інтервалі

790–850 °С спостерігаємо незначний ендотермічний ефект на кривій ДТА, відбувається видалення залишків води.

У інтервалі температур 870–1000 °С присутній екзотермічний ефект, розміри якого залежать від вмісту Mg у мінералі. Цей ефект відповідає початку кристалізації нових фаз. При нагріванні чистого палигорськіту до температури до 1100–1200 °С утворюється  $\alpha$ -тридиміт і енстатит.

У досліджуваних композитах, крім палигорськіту, містяться оксиди заліза та хрому (вилучення Cr(VI)) та заліза та кобальту (вилучення Co(II)). Присутність катіонних ПАР в сорбентах не впливає на утворення кристалічних фаз, так як вигоряє при значно нижчих температурах.

Структуру отриманих керамічних матеріалів та ідентифікацію фаз термооброблених відпрацьованих сорбентів вивчали за допомогою рентгено-фазового аналізу (рентгенівський дифрактометр Rigaku Ultima-IV).

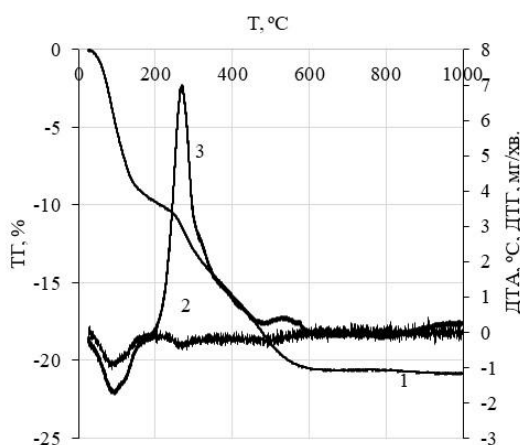
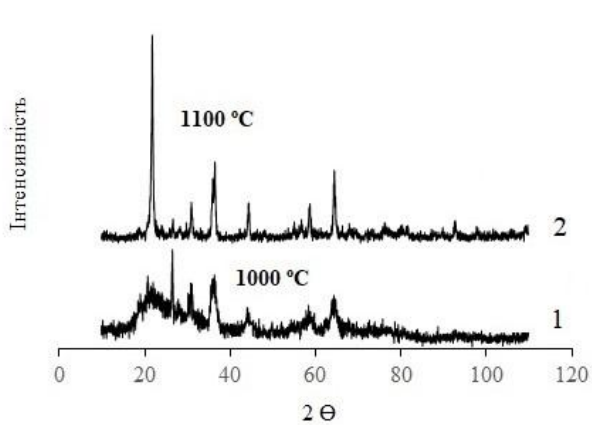


Рис. 2. Результати термічного аналізу комплексного сорбенту:  
1 – крива ТГ; 2 – крива ДТГ; 3 – крива ДТА

На дифрактограмі (рис. 3, крива 1) зразок переважно складається з аморфної силікатної фази в діапазоні 15 – 25 ( $2\theta$ ) з включеннями нанокристалічного могоаніту ( $\text{SiO}_2$ ), що чітко ідентифіковано піками при 26.64 та 20.88 ( $2\theta$ , градуси) та діагностується за відображеннями 3,36 та 4,25 Å. Могоаніт – це високодисперсний вторинний  $\text{SiO}_2$ , утворений з аморфної матриці. Він є найінтенсивнішим серед кристалічних фаз для даного зразка.

Піки при 31.24, 36.16, 44.28, 58.52, 64.40 ( $2\theta$ , градуси) діагностуються за відображеннями 2.87, 2.48, 2.05, 1,57 та 1,45 Å, що вказує на формування термічно стійкої шпінелі загальної формули  $(\text{Mg},\text{Al})_x\text{O}_4$ . Фази, ідентифіковані на дифрактограмі:  $(\text{Mg}_{0.714}\text{Al}_{0.286})(\text{Al}_{1.714}\text{Mg}_{0.286})\text{O}_4$ ,  $\text{Mg}_{0.88}\text{Al}_{1.14}\text{Fe}_{0.46}\text{O}_4$ ,  $\text{Mg}_{0.8}\text{Al}_{1.2}\text{O}_4$  та інші, що підтверджують неоднорідний склад і наявність нестехіометричних твердих розчинів в структурі шпінелі.



1 – за температури 1000°C; 2 – за температури 1100°C

На дифрактограмі (рис. 3, крива 2) присутні дві основні кристалічні фази: кристобаліт ( $\text{SiO}_2$ ) та змішані шпінелі. Піки при 21.19, 28.44, 42.40, 56.75 ( $2\theta$ , градуси), що діагностується за відображеннями 4.05, 3.13, 2.12 та 1,62 Å, вказують на формування кристобаліту. На дифрактограмах також ідентифіковані шпінелі складу:  $(\text{Mg}_{0.704} \text{Al}_{0.286})\text{O}_4$ ,  $(\text{Al}_{1.714} \text{Mg}_{0.286})\text{O}_4$  та інші. Частина  $\text{MgO}$  вбудовується у шпінелі. Наявність  $\text{Fe}^{3+}$  та  $\text{Cr}^{3+}$  суттєво змінює шлях кристалізації. Відбувається конкуруюча реакція:  $\text{MgO}$  має високу схильність реагувати з  $\text{Al}_2\text{O}_3$  з палигорськіту та оксидами ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ), утворюючи змішані шпінелі. Кінетичні фактори (час відпалу) та конкуруючі реакції з домішками  $\text{Fe}/\text{Cr}$  та  $\text{Al}$  можуть призвести до того, що переважна більшість  $\text{Mg}$  вбудовується у кристалічну шпінельну фазу. Але фазовий аналіз другого зразка підтвердив утворення шпінелі, яка характеризується дефіцитом  $\text{Mg}^{2+}$ , що ймовірно свідчить про початок взаємодії  $\text{MgO}$  з  $\text{SiO}_2$  та початок процесу утворення енстатиту ( $\text{MgSiO}_3$ ).

Наявність хрому у шпінелі підтверджується збільшенням параметра ґратки: 36.56, 44.42, 64.44 у бік менших кутів, так як іон  $\text{Cr}^{3+}$  має більший іонний радіус, ніж  $\text{Al}^{3+}$  ( $\text{Al}$ : 0.535 Å,  $\text{Cr}$ : 0.615 Å). Кобальт, як двовалентний іон ( $\text{Co}^{2+}$ ), буде конкурувати з  $\text{Mg}^{2+}$  за тетраедричні позиції (А-сайти) у шпінелі, утворюючи кобальтові ферити ( $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ ) та змішані шпінелі  $(\text{Mg,Co})(\text{Al,Fe})_2\text{O}_4$ .

Порівнюємо кристалічні фази зразків кераміки, отримані за 1000 та 1100°C. Використовуючи формулу Шеррера, проведемо розрахунки розмірів кристалітів:

$$L = \frac{K\lambda}{\beta \cos\theta}$$

де:  $L$  – середній розмір кристалітів (нм),  $K = 0.9\%$  (константа Шеррера),  $\lambda = 1.5406$  (довжина хвилі  $\text{CuK}\alpha$ ),  $\beta$  — фізичне розширення піка (FWHM) у радіанах,  $\theta$  – кут Бреґа (половина  $2\theta$ ) у радіанах.

Розрахунки показали, що підвищення температури випалу з 1000 °C до 1100 °C привело до зростання наночастинок шпінелі в 1,7 рази (табл. 1).

Фазовий перехід  $\text{SiO}_2$  від могоаніту до кристобаліту при 1100 °C є типовим для силікатних систем і підтверджує, що матеріал досяг більш стабільного стану.

Таблиця 1. Розрахунок розмірів кристалітів по дифрактограмам по формулі Шеррера.

Температура, °C	$2\theta$ (градуси)	FWHM (ширина піку напіввисоті)	Розмір кристалітів (L)
1000	36.22	1.46	6.0 нм
1100	36.56	0.6 - 0.8	10,4 нм

Результати є типовими для високотемпературної обробки глинистих мінералів з домішками оксидів металів, де кінцевий фазовий склад керується кінетикою та хімічним складом, а не лише термодинамікою чистої системи. Порівняння властивостей отриманих керамічних матеріалів представлені у таблиці 2.

Таблиця 2. Порівняння властивостей кристалічних фаз.

Властивість	1000°C (Моганіт + Шпінель ~6.0 нм)	1100°C (Крїстобалїт + Шпінель ~10.4 нм)	Зміна температури (1000°C→1100°C)
Хімічна стійкість	Добра, але вразлива	Дуже висока	Покращилася
Водостійкість	Добра/Задовільна	Відмінна	Покращилася
Міцність	Добра (Наноккомпозит)	Вища (Керамічний композит)	Покращилася

Для зразків, випалених за температури вище 1000 °C мінімальне водопоглинання не перевищувало 1 %, а відкрита пористість складала менше 0,5 %. За цієї температури одержані наноструктуровані матеріали мають най більшу стійкість – 42 МПа.

У роботі також було досліджено вплив температури обробки відпрацьованих сорбентів на процеси вимивання з матриці іонів Cr(VI) та Co(II) під дією води, кислот (0,1 М HCl) та лугів (0,1 М NaOH). Дослідження підтвердили, що вилуговування іонів важких металів у зразках термооброблених за температур 950-1100°C не перевищує 0,1% (концентрацію іонів металу визначали спектрофотометричним методом на приладі UNICO 2100UV).

Таким чином, утилізація відпрацьованих сорбентів по керамічній технології дає змогу міцно зафіксувати іони важких металів в силікатній матриці і не допустити їх вилуговування навіть під дією достатньо агресивних середовищ.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТА УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ОЧИЩЕННЯ СТИЧНИХ ВОД ШКІРЯНИХ ЗАВОДІВ

<sup>1</sup>Засць А. В., <sup>2</sup>Андрєєва О. А.

*Київський національний університет технологій та дизайну, Україна, м. Київ*

*<sup>1</sup>zaiets.antonina888@gmail.com, <sup>2</sup>andreyeva.aa@knutd.com.ua*

Внаслідок споживання величезної кількості води шкіряні заводи генерують тони рідких відходів. При цьому стічні води підприємств галузі характеризуються високою та мінливою концентрацією різних забруднювачів (важкі метали, феноли, барвники, поверхнево-активні речовини, біоциди і т.і.), що не лише ускладнює та здорожує очищення стоків, а й створює потенційну загрозу для навколишнього середовища та здоров'я людини. Виходячи з цього, увага вчених та практиків зосереджена на вивченні характеристик та стратегій очищення стічних вод у шкіряній промисловості, створенні нормативно-правової бази для управління цим процесом. Так, у роботі [1] висвітлено різні технології із застосуванням традиційних фізико-хімічних процесів (вирівнювання, коагуляція, адсорбція), передові підходи (окислення Фентону, озонування, кавітація), термодинамічні

та біологічні методи очищення стічних вод, комплексні підходи. Зроблено висновок про те, що стійкі альтернативи, які застосовуються в сучасних технологіях очищення стічних вод шкіряних заводів, дозволяють мінімізувати експлуатаційні витрати та забезпечити рециркуляцію очищеної води у навколишнє середовище. Надані авторами рекомендації корисні для галузі з метою управління методами очищення стічних вод та забезпечення рециркуляції води екологічно раціональним способом.

У пошуках стійких варіантів очищення стічних вод авторами [2] проаналізовано два пілотні горизонтальні підземні потоки сконструйованих водно-болотних угідь для очищення синтетичної води, якість якої ідентична якості попередньо очищених стічних вод шкіряних заводів. Вивчено декілька фаз очищення з поступовим збільшенням навантажень ГПК,  $\text{NH}^{4+}\text{-N}$  та Cr до досягнення та перевищення показників типового складу стічних вод шкіряного заводу. Відзначено високий (80-90%) рівень видалення ГПК й  $\text{NH}^{4+}\text{-N}$  та майже повне видалення хрому у стоках, що відповідає національним стандартам зі скидів у навколишнє середовище. Вміст азоту, хлорофілу та хрому в надземних частинах та коренях місцевої рослини *Phragmites sp.* вказує на її здатність виживати навіть за високих екологічних навантажень. Кількість гетеротрофних бактерій у субстраті та кореневищах рослини свідчить про розвиток біоплівки, окиснення органічної речовини та азоту. Таким чином, протестована конструкція виявилася цілком стійкою та альтернативною для очищення стічних вод шкіряного заводу у тропічному кліматі.

В Індії Dr. Vijayalakshmi P. зі співробітниками [3] вивчала доцільність електро- та глибокого окиснення як методи третинного очищення стічних вод шкіряних заводів. При комбінуванні процесів  $\text{UF/O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$  видалення загального органічного вуглецю було на рівні 85 %, тоді як при електроокисненні ледь сягало 50 %. Разом з тим, витрата енергії видалення одиниці маси загального органічного вуглецю за допомогою електроокиснення становила 738 кВт год/кг, що у 10 разів менше від глибокого окиснення. Тому у подальшому з метою енергозбереження застосували двоступеневий процес, що передбачає електроокиснення на першому етапі й глибоке окиснення на другому. Результати експерименту показали, що видалення загального органічного вуглецю методом глибокого окиснення уповільнюється після первісної обробки стічних вод методом електроокиснення при тому, що після електроокиснення стічні води повністю дезінфіковані.

Інша група індійських вчених [4] досліджувала розкладання органічних забруднювачів (феноли, таніни і т.і.), що містяться в стічних водах шкіряного виробництва, шляхом порівняння комбінованого ефекту кавітації та магнітного перемішування з процесами вдосконаленого окиснення. В одному випадку зразки стічних вод обробляли у присутності кавітації з використанням ультразвукового зонда, в іншому – з використанням магнітної мішалки. В обох випадках аналізували вплив параметрів обробки (рН, тривалості ультразвукового опромінення, витрати перекису водню) на вміст загального органічного вуглецю. Експериментально встановлено значне зниження цього показника при поєднанні кавітації та перекису водню порівняно із застосуванням лише перекису водню.

У Тунісі досліджували озонування стічних вод, отриманих після відмочувально-зольних процесів [5]. Метод виявився прийнятним для повного окиснення присутніх у стоках сульфідів ( $\text{S}^{2-}$ ,  $\text{HS}^-$ ...). Значне зниження ГПК (55 %) досягається при значенні рН = 8. Додавання перекису водню у якості окиснювача підвищує ступінь очищення: після 1 години озонування з дозуванням перекису водню 8 мл/л вапняних стічних вод показник ГПК підвищився до 64 %.

#### Література

1. Nigam, Mohit; Mishra, Puranjan; Kumar, Pradeep. Comprehensive technological assessment for different treatment methods of leather tannery wastewater. (2023), *Environ Sci Pollut Res*, 30, pp.124686-124703.

2. Susana Ramírez, Graciela Torrealba, Eudimar Lameda-Cuicas et al. Investigation of pilot-scale constructed wetlands treating simulated pre-treated tannery wastewater under tropical climate. (2019), *Chemosphere*, 234, pp. 495-504.
3. Vijayalakshmi, P.; Raju, G. Bhaskar; Gnanamani, A. Advanced Oxidation and Electrooxidation As Tertiary Treatment Techniques to Improve the Purity of Tannery Wastewater. (2011), *Industrial & engineering chemistry research*, 50(17), pp. 10194-10200.
4. Sneha Korpea, Bhaskar Bethib, Shirish H. Sonawaneb, K.V. Jayakumara. Tannery wastewater treatment by cavitation combined with advanced oxidation process (AOP). (2019), *Ultrasonics Sonochemistry*, 59. p. 104723.
5. Bouzid, Jalel; Aydi, Walid; Ksibi, Mohamed. Use of Ozonation Process for the Oxidation of Liming Float Wastewater Stream. (2008), *Environmental Engineering science*, 25(8), pp. 1139-1148.

## АДСОРБЦІЙНЕ ВИЛУЧЕННЯ ФОСФОРУ ЗІ СТІЧНИХ ВОД ТА УТИЛІЗАЦІЯ ОСАДІВ У ДОБРИВА

*Іванченко А.В., Воронов В.В.  
Науковий керівник Іванченко А.В.*

*Дніпровський державний технічний університет, Україна, місто Кам'янське,  
[ivanchenkodgtu@gmail.com](mailto:ivanchenkodgtu@gmail.com)*

Фосфор є головним чинником евтрофікації водойм, спричиняючи надмірний ріст водоростей та ціанобактерій, що призводить до дефіциту кисню та загибелі водних організмів. Видалення фосфатів зі стічних вод є критично важливим для захисту водних екосистем. Одночасно з цим, фосфор є обмеженим і невідновлюваним ресурсом, незамінним для сільського господарства.

Для вилучення фосфатів зі стічних вод перспективним вбачається застосування адсорбційних матеріалів, таких як активоване вугілля, цеоліти, силікагель або природних сорбентів. Метод адсорбції може використовуватися для очищення як побутових, так і промислових стічних вод різного складу. Установа адсорбційного очищення є відносно простою в експлуатації, не потребує складного обладнання та може бути легко інтегрована в існуючі системи очищення. Процес не утворює токсичних побічних продуктів, а відпрацьовані сорбенти можуть піддаватися утилізації або регенерації без шкоди для довкілля. На відміну від деяких інших методів, адсорбція не потребує нагрівання розчинів чи проведення складних хімічних реакцій.

В результаті виконання експериментальних досліджень встановлено особливості вилучення фосфатів із модельних розчинів із безпечною утилізацією цеолітових осадів у добрива. Порівняно ефективність природних сорбентів (шкарлупи волоського горіха, глауконіту, цеоліту) та активованого вугілля. Для проведення експериментальних досліджень у якості вихідних модельних стічних вод використано розчин натрій гідрофосфату концентрацією 100 та 25 мг/дм<sup>3</sup>. Результати дослідів в динамічних умовах із використанням адсорбційних колонок показали, що цеоліт є найбільш ефективним 94,5% в порівнянні з іншими сорбентами (зниження концентрації фосфатів з 100 мг/дм<sup>3</sup> до 5,5 мг/дм<sup>3</sup>). Результати в періодичних умовах (реактор з мішалкою): активоване вугілля найбільший ступінь вилучення фосфат-іонів 98 % за 2 години адсорбції (зниження з

25 мг/дм<sup>3</sup> до 0,5 мг/дм<sup>3</sup>). Серед усіх досліджених алюмосилікатів цеоліт продемонстрував найвищу ефективність очищення – 87 % за дві години, що забезпечило зниження концентрації забруднювача до 3,25 мг/дм<sup>3</sup>.

Цеоліти є природними мінералами з високорозвиненою пористою структурою. Їх унікальна кристалічна решітка має численні мікро- та мезопори, здатні вибірково поглинати іони та молекули різних забруднювачів із водного середовища. Однією з головних переваг цеолітів є їхня висока іоннообмінна здатність. Цеоліти також проявляють високу хімічну та термічну стабільність, що робить їх довговічними й економічно вигідними. Їх можна регенерувати за допомогою промивання розчинами солей або кислот, після чого вони зберігають свою адсорбційну активність.

Таким чином, природний цеоліт рекомендовано для промислового впровадження на очисних спорудах через високу ефективність та потенціал утилізації. Запропоновано технологічну схему, що включає доочищення стічних вод після біологічної обробки у контактних відстійниках, де використовується цеоліт (1 г/дм<sup>3</sup> при 60 хв контакту). Осад, насичений фосфатами після адсорбції на цеоліті, рекомендовано використовувати як сировину для одержання мінеральних та органо-мінеральних добрив пролонгованої дії.

## **СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ З ОСАДІВ СТІЧНИХ ВОД ТА ОРГАНІЧНИХ ВІДХОДІВ НА КАНАЛІЗАЦІЙНИХ ОЧИСНИХ СПОРУДАХ**

*Кізеєв М.Д., Проценко С.Б., Новицька О.С., Кравченко Н.В.*

*Національний університет водного господарства та природокористування  
Україна, Рівне [m.d.kizieiev@nuwm.edu.ua](mailto:m.d.kizieiev@nuwm.edu.ua)*

Повномасштабна війна в Україні та глобальна енергетична криза актуалізували питання енергетичної незалежності об'єктів критичної інфраструктури, до яких належать каналізаційні очисні споруди (КОС), що є великими споживачами електричної енергії (1–3% від загального споживання в країні) та теплової енергії. Проте зміна парадигми – від споживача до виробника енергії – дозволяє перетворити традиційні КОС на енергопозитивні комплексні підприємства з переробки стічних вод (СВ) та органічних відходів. СВ мають значний енергетичний потенціал у вигляді органічних речовин, низькопотенційного тепла та біогенних елементів. Анаеробне зброджування осадів КОС з виробництвом біогазу когенерацією енергії є ключовою технологією для реалізації цього потенціалу. Додаткове залучення органічних відходів (побутового, промислового або сільськогосподарського походження) у процес спільного зброджування з осадами КОС дозволяє значно підвищити вихід біогазу, зробити КОС енергонезалежними та одночасно вирішити проблему утилізації органічних відходів міста.

Європейський Союз встановив амбітні цілі щодо досягнення енергетичної нейтральності КОС з популяційним еквівалентом (PE) понад 10 000 осіб до 2045 року згідно з новою Директивою про очищення міських СВ. Багато європейських КОС вже перевищили цю мету та досягли енергопозитивності.

КОС «Марселісборг» в Орхусі (Данія) є взірцем енергоефективності. Завдяки комплексній модернізації вони виробляють 150–192% енергії, необхідної для їх експлуатації. Основні заходи, що були реалізовані на цих КОС, включали: оптимізацію процесу видалення азоту з контролем в режимі реального часу, заміну повітродувок на високошвидкісні турбоагнітачі, контроль віку активного мулу з використанням частотних

перетворювачів та модернізацію когенераційної установки (КГУ) з досягненням 90% ефективності використання енергії. КОС нині виробляють електроенергії на 50% більше власних потреб і 2,5 ГВт тепла для системи централізованого теплопостачання міста без використання додаткових вуглеводнів.

КОС «Кубратово» біля Софії (Болгарія) обслуговує 1,6 млн. жителів і виробляє на 16% більше електроенергії, ніж споживає. Надлишкову електроенергію реалізують в загальну мережу, забезпечуючи додатковий дохід підприємству.

Проект POWERSTEP у рамках Horizon 2020 за участю 15 організацій-партнерів з 7 країн Європи продемонструвала можливість досягнення 140–170% енергопозитивності на КОС у 6 містах Європи шляхом впровадження концепцій повномасштабного виробництва енергії за рахунок анаеробного зброджування осадів СВ і використання біогазу.

Провідні технології термічного гідролізу (ТНР) представлені процесами SAMBI, BIOTHELYS та Exelys (Veolia), BioTfuel та іншими. Проект біогазової станції на КОС м. Львів передбачає використання технології SAMBI від консорціуму RIKO-SAMBI.

Енергетичний баланс ТНР є позитивним – додатковий вихід біогазу (50% збільшення) повністю покриває енергетичні витрати на нагрів та підтримання тиску процесу, забезпечуючи енергетичну самодостатність технології. Економічної ефективності ТНР досягають головним чином через зменшення витрат на утилізацію осадів – для КОС на 500 тис. жителів економія становить 270 – 430 тис. євро/рік. Зменшення об'єму метантенків при використанні ТНР частково компенсує капітальні видатки установки термічного гідролізу осаду.

Осад СВ має відносно невисокий енергетичний потенціал – вихід біогазу 250 – 400 м<sup>3</sup>/т сухої органічної речовини (СОР). Це обумовлено значним вмістом у надлишковому активному мулі важкозброджуваних компонентів бактеріальних клітин. Для підвищення «калорійності» субстрату та збільшення виходу біогазу застосовується спільне анаеробне зброджування осадів КОС з органічними відходами різного походження, що дозволяє одночасно вирішити дві важливі задачі: утилізувати велику кількість органічних відходів міста та значно підвищити вихід біогазу на існуючих потужностях КОС. Різноманітність субстратів оптимізує співвідношення С/Н (вуглець/азот), забезпечує надходження мікроелементів та покращує сталість процесу анаеробного зброджування.

Для спільного зброджування з осадом СВ використовуються такі органічні відходи:

1. Харчові відходи – Енергетичний потенціал становить 550-750 м<sup>3</sup> біогазу/т СОР;
2. Органічна фракція твердих побутових відходів – Вихід біогазу - 400-600 м<sup>3</sup>/т СОР;
3. Жири, олії та мастила – мають найвищий енергетичний потенціал – до 1000 м<sup>3</sup> біогазу/т СОР. Однак вони вимагають контролю при дозуванні (не більше 5-10% від загального завантаження) через ризик інгібування процесу та утворення піни;
4. Сільськогосподарські відходи – 200–450 м<sup>3</sup> біогазу/т СОР залежно від сировини;
5. Промислові органічні відходи.

Співвідношення осаду та органічних відходів є критичним параметром для максимізації «виходу» біогазу та сталості процесу зброджування. Результати досліджень показують різні оптимальні співвідношення залежно від мети.

Для максимального виходу біогазу: співвідношення «Осад/Органічні відходи» = 1/3 (25% осаду та 75% органічних відходів за вмістом СОР) забезпечує максимальний вихід біогазу 618,7 мл/г СОР з вилученням органіки 52,8% за ХСК.

Для збільшення продуктивності приблизно в 4 рази: співвідношення «Органічні відходи/Осад» = 3/1 (75% органічних відходів та 25% осаду за СОР) у дослідженні в Швеції збільшило вихід біогазу приблизно вчетверо – з 1,0±0,1 до 3,8±0,3 л/(дм<sup>3</sup>·добу) при органічному навантаженні 5 г СОР/(дм<sup>3</sup>·добу).

Для сталої роботи існуючих КОС рекомендовано поступове впровадження спільного зброджування осадів з додаванням харчових відходів до 12 – 35% за вмістом СОР від кількості осаду. Такий підхід дозволяє апробувати технологію без ризику дестабілізації процесу на існуючих спорудах. Навіть невеликі додавання органічних відходів ефективні. Додавання лише 1–5% харчових відходів до осаду збільшує вихід біогазу на 25–50%, що робить спільне зброджування економічно привабливим. Прикладами реалізації спільного зброджування осаду та органічних відходів у світі є КОС в м. Векшо (Швеція); у компанії «Есорго» (Норвегія) та в м. Сеул (Південна Корея).

Біогаз, отриманий при анаеробному зброджуванні, використовують в КГУ для одночасного виробництва електричної та теплової енергії. Когенерація забезпечує ефективність використання енергії біогазу до 85-90%.

Електроенергію можна використовувати для власних потреб КОС (на аерацію і перекачування СВ, для живлення обладнання біогазової станції) або реалізовувати в мережу за «зеленим» тарифом. Теплову енергію витрачають на підігрівання осаду в метантенках (основна частина), опалення та гаряче водопостачання будівель КОС, підсушування зневодненого осаду для зменшення його об'єму перед утилізацією.

Львівський проєкт біогазової станції передбачає встановлення КГУ потужністю близько 5 МВт електричної енергії для виробництва 39,4 млн. кВт·год електроенергії на рік. Після зміни концепції у 2024 році вся електроенергія використовуватиметься для власних потреб КОС, забезпечуючи повну енергетичну незалежність споруд.

КОС є значним джерелом викидів парникових газів. У США КОС викидають близько 47 млн. т CO<sub>2</sub>-еквіваленту на рік, що є порівнянним з викидами 10 млн. автомобілів. Викиди від процесів очищення становлять біля 60% вуглецевого сліду КОС.

Основними видами парникових газів на КОС, що викидаються в повітря, є:

- 1) метан (CH<sub>4</sub>) – витоки з метантенків, газгольдерів, відкритих резервуарів з осадом;
- 2) закис азоту (N<sub>2</sub>O) – утворюється в процесі нітрифікації-денітрифікації в аеротенках (парниковий ефект N<sub>2</sub>O у 298 разів сильніший за CO<sub>2</sub>);
- 3) діоксид вуглецю (CO<sub>2</sub>) – непрямі викиди від споживання електроенергії та тепла з викопних джерел.

Біогазова технологія забезпечує істотне зменшення викидів парникових газів через:

- утилізацію метану при спалюванні біогазу в КГУ замість його надходження в атмосферу при відкритому зберіганні осаду;
- заміщення викопних палив відновлюваним біогазом (біометаном);
- зменшення споживання електроенергії з мережі за рахунок власного виробництва;
- оптимізацію процесів біологічного очищення для зниження утворення N<sub>2</sub>O.

Виробництво та використання біогазу може зменшити викиди парникових газів на КОС на 5-12%. При додатковому впровадженні термічного гідролізу та оптимізації процесів видалення азоту декарбонізація може досягати 15-20%. Європейський «зелений курс» встановлює обов'язкову декарбонізацію всіх секторів економіки до 2050 року, що робить модернізацію КОС з впровадженням біогазових технологій не тільки економічно вигідною, але й необхідною для країн ЄС та кандидатів на вступ, включаючи Україну.

В Україні «піонерами» впровадження біогазових технологій на КОС є «Водоканали» Львова та Харькова. Львівський проєкт є найбільш просунутим з точки зору підготовки документації, залучення фінансування та стану реалізації.

Технічні параметри оновленого проєкту біогазової станції на Львівських КОС такі:

- два метантенки по 15 000 м<sup>3</sup> для термофільного зброджування осадів;
- попереднє оброблення осаду термічним гідролізом за технологією «САМБІ» (температурі 160°C, тиск 6 бар);
- розрахунковий вихід біогазу: 42 000 нм<sup>3</sup>/добу з вмістом метану 65%;

- когенераційні установки загальною електричною потужністю порядку 5 МВт;
- виробництво електроенергії для власних потреб КОС;
- теплова потужність когенерації: 4,5 МВт;
- повна енергетична незалежність КОС м. Львів.

Проект біогазової станції з термічним гідролізом осаду на КОС м. Львів демонструє сучасний підхід до створення енергонезалежних КОС в Україні та може стати прикладом для реплікації його в інших містах країни (Вінниці, Харкові, Рівне, Луцьку) з адаптацією масштабу відповідно до місцевих умов, до фінансування подібних об'єктів із залученням міжнародних кредитів, грантів та місцевого співфінансування.

## Література

1. POWERSTEP Project. Full scale demonstration of energy positive sewage treatment plant concepts towards market penetration. Horizon 2020. URL: <https://powerstep.eu>
2. Aarhus Vand. Marselisborg WWTP - More than 100% energy self-sufficient. Denmark, 2024.
3. Sofiyska Voda. Kubratov WWTP Energy Positive Facility. Sofia, Bulgaria, 2023.
4. Gahlot P., Balasundaram G., Tyagi V.K., Atabani A.E., Suthar S., Kazmi A.A., Štěpanec L., Juchelková D., Kumar A. Principles and potential of thermal hydrolysis of sewage sludge to enhance anaerobic digestion // Environmental Research. – 2022. – Vol. 214. – 113856.
5. Kurbatova A., Bulatović J., Desnica E., Radetić L. Characteristics of Biogas Production and Synergistic Effect of Primary Sludge and Food Waste Co-Digestion // BioEnergy Research. – 2023. – Vol. 16. – P. 2339–2352.
6. Кізеєв М.Д., Проценко С.Б., Кравченко Н.В., Новицька О.С., Дебелий М.В. Оцінка економічної ефективності будівництва біогазової станції на каналізаційних очисних спорудах м. Львів. Сталій розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування. VIII Міжнародний конгрес, 16-18 жовтня 2024, Україна, Львів : зб. матер. – Електрон. дан. – Київ : ГО «МНГ», 2024. С. 123. doi: <https://doi.org/10.56287/8285-40-1>.

## ВПЛИВ МАГНІЮ ТА МАНГАНУ ОСВІТЛЕННЯ НА РІСТ І МЕТАБОЛІЗМ МІКРОВОДОРОСТІ *CHLORELLA VULGARIS*

*Ковальова С.О.*

*Науковий керівник – Голуб Н.Б.*

*КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна, Київ, [svitlayak@gmail.com](mailto:svitlayak@gmail.com)*

Мікрородості роду *Chlorella* є перспективними біооб'єктами для отримання цінних метаболітів – пігментів, ліпідів і антиоксидантів. Крім того, вони розглядаються як потенційні агенти біомоніторингу та біоочищення водних середовищ від забруднень [1].

Серед біогенних елементів для мікрородостей особливе значення мають магній ( $Mg^{2+}$ ) і манган ( $Mn^{2+}$ ), які є ключовими кофакторами фотосинтетичних процесів. Магній входить до складу хлорофілу та бере участь у стабілізації структури рибосом і фіксації вуглецю [2, 3], тоді як манган формує кластер  $Mn_4CaO_5$  у фотосистемі II, забезпечуючи фотоліз води й утворення молекулярного кисню [4].

Разом з тим, надлишкові концентрації цих металів, у поєднанні з різними умовами освітлення, можуть чинити як стимулюючий, так і інгібуючий вплив на фотосинтез і метаболізм клітин. Зважаючи на це, дослідження впливу комбінованої дії спектру світла та

іонів металів має важливе значення для оптимізації умов біотехнологічного культивування мікроводоростей і підвищення ефективності біоочищення вод.

Мета роботи – дослідити вплив іонів  $Mg^{2+}$  та  $Mn^{2+}$  у різних концентраціях і спектральних режимах освітлення на ріст, накопичення біомаси та пігментний склад мікроводорості *Chlorella vulgaris* для визначення оптимальних умов культивування.

#### **Матеріали та методи**

Культивування *Chlorella vulgaris* проводили в трубчатих фотореакторах на середовищі BG-11 із додаванням сульфатів магнію та мангану ( $MgSO_4$ ,  $MnSO_4$ ) у концентраціях 5, 10 та 20 мг/л. Контроль – середовище без додавання додаткових металів.

Застосовували чотири режими освітлення: природне яскраве (600–800 Вт/м<sup>2</sup>), природне приглушене (250 Вт/м<sup>2</sup>), біле LED-освітлення (600 Вт/м<sup>2</sup>) і червоно-синє LED-освітлення у співвідношенні 2:1 (600 Вт/м<sup>2</sup>).

Визначали оптичну густину, кількість клітин, суху біомасу та вміст пігментів (хлорофілу а, b, каротиноїдів) спектрофотометричними методами [5].

#### **Результати та обговорення**

Підвищення концентрації  $Mg^{2+}$  призводило до інтенсифікації росту культури *Chlorella vulgaris*, особливо за інтенсивного освітлення. Максимальний приріст оптичної густини (у 1.9 рази) та сухої біомаси (до  $3.05 \pm 0.067$  г, у 2 рази більше контролю) спостерігався при 20 мг/л  $Mg^{2+}$  за білого LED-освітлення (рис. 1).

За природного світла найвищий приріст біомаси ( $2.30 \pm 0.054$  г, у 2.4 рази більше контролю) також отримано при 20 мг/л  $Mg^{2+}$ . Вміст хлорофілу а коливався від 19.17 до 65.51 мг/г, а максимальне співвідношення Chl a/b (5.17) і загальний вміст хлорофілів (86.87 мг/г) зафіксовано при 10 мг/л  $Mg^{2+}$  за природного приглушеного освітлення. Це можна пояснити ключовою роллю магнію у фотосинтетичних процесах та його синергетичною взаємодією з енергією світла, яка посилює активність світлозалежних стадій метаболізму [3].

Для  $Mn^{2+}$  вплив був нелінійним. За природного яскравого освітлення концентрація 20 мг/л  $Mn^{2+}$  стимулювала приріст біомаси у 2.3 рази ( $3.03 \pm 0.014$  г), тоді як за білого LED-освітлення високі концентрації викликали зниження росту (у 1.7 рази). Це свідчить про фотосенсибілізуючу дію  $Mn^{2+}$  у поєднанні з широким спектром світла (рис. 2) [6].

Загальний вміст хлорофілів у варіантах із  $Mn^{2+}$  був значно нижчим (3.45–12.97 мг/г), що вказує на фотосистемне інгібування або перерозподіл ресурсів на антиоксидантний захист [7]. Оптимальне співвідношення Chl a/b (0.69) спостерігалось при 20 мг/л  $Mn^{2+}$  за природного освітлення.

Вміст хлорофілів показує, що для  $Mn^{2+}$  він залишався низьким (СІ заг. 6–9 мг/г), тоді як у варіантах із  $Mg^{2+}$  – у десятки разів вищим (до 80–86 мг/г).

Таким чином,  $Mg^{2+}$  стимулює фотосинтетичну активність і накопичення пігментів, тоді як  $Mn^{2+}$  проявляє двоїстий ефект – стимулювальний або інгібувальний росту залежно від спектра освітлення та загальне зниження фотосинтетичної активності у порівнянні з контролем.

У варіантах із магнієм спостерігається виражена залежність синтезу каротиноїдів від спектрального складу світла (рис. 2). Найвищі значення зафіксовані за природного приглушеного освітлення при концентрації 10 мг/л  $Mg^{2+}$ , де вміст каротиноїдів досягав 10.10 мг/г, що більш ніж у 2 рази перевищує контроль. Це узгоджується з високими показниками загального вмісту хлорофілів (86.87 мг/г), що вказує на стимулювання фотосинтетичної активності клітин і підвищену стабільність пігментного комплексу.

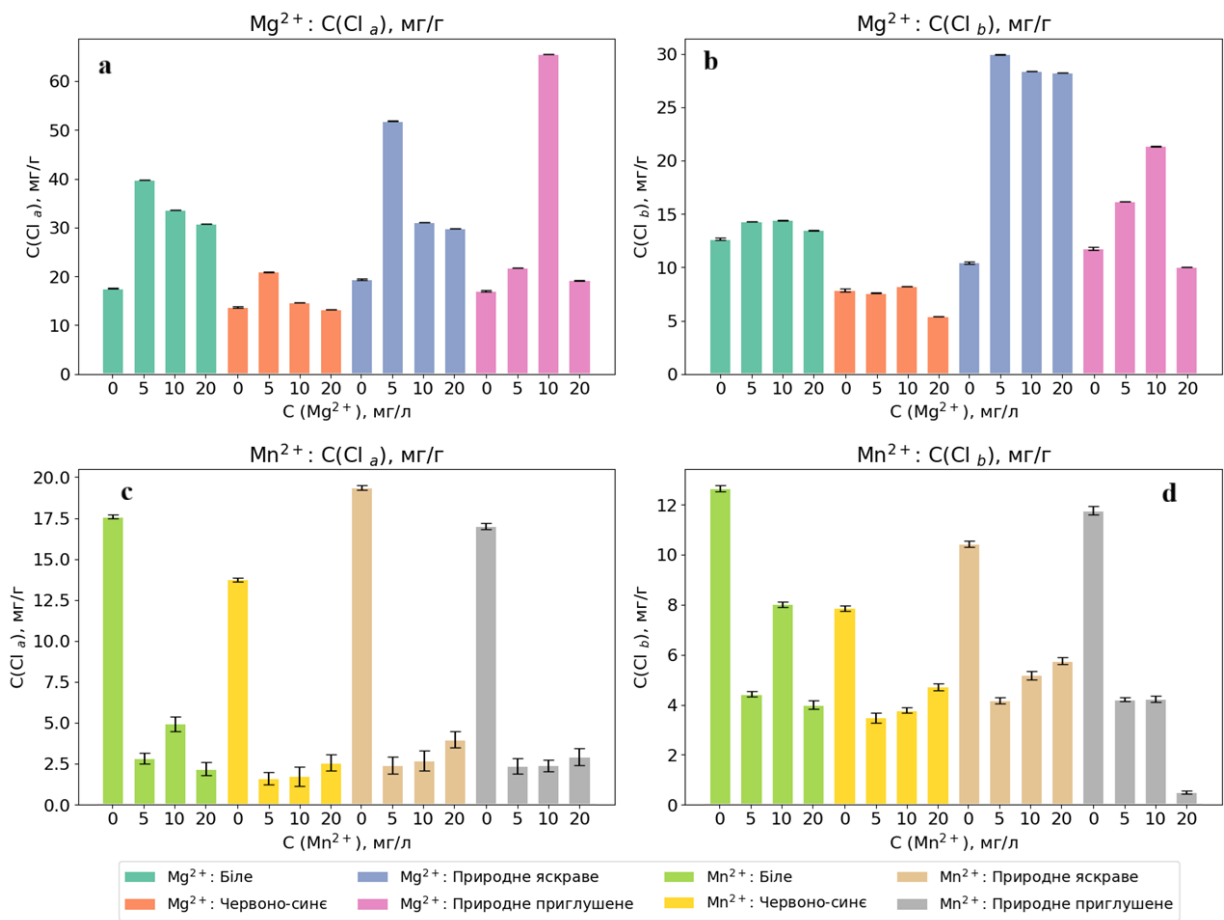


Рис 1. Вміст хлорофілу a та хлорофілу b (C) у культурі *Chlorella vulgaris*, культивованої за різних умов освітлення та з надлишковим вмістом  $MgSO_4$  (a, b) і  $MnSO_4$  (c, d).

На відміну від  $Mg^{2+}$ , у варіантах із  $Mn^{2+}$  спостерігається загальне зниження вмісту каротиноїдів у всіх спектральних режимах, що свідчить про пригнічення фотосинтетичного апарату при надлишку мангану.

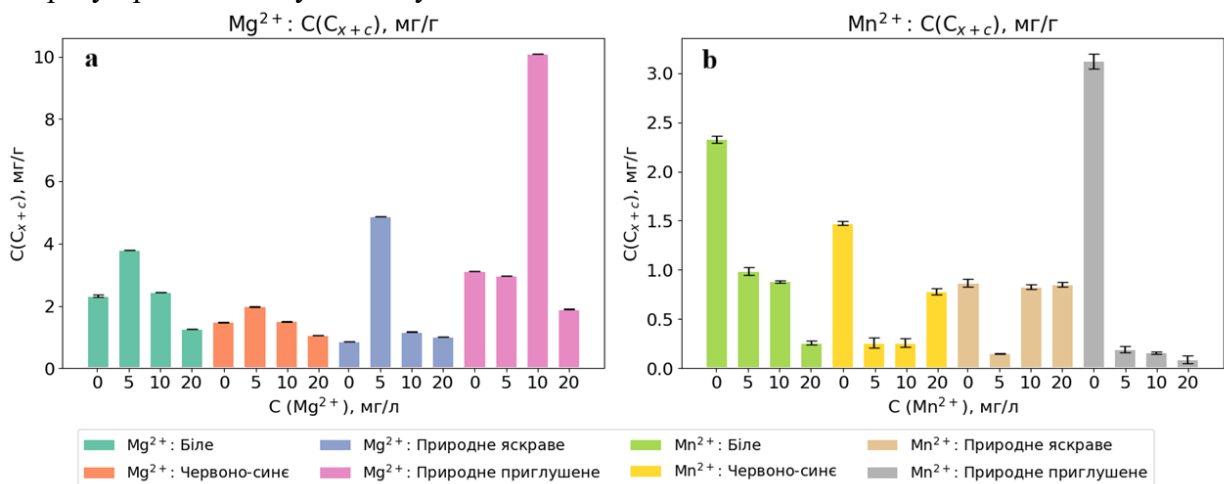


Рис. 2. Вміст каротиноїдів (C) у культурі *Chlorella vulgaris*, культивованої за різних умов освітлення та з надлишковим вмістом  $MgSO_4$  (a) і  $MnSO_4$  (b).

Загалом, культура *Chlorella vulgaris* демонструє підвищений вміст каротиноїдів при дії  $Mg^{2+}$  і значне пригнічення – при  $Mn^{2+}$ , що свідчить про різний механізм дії цих металів.

#### **Висновки**

Додавання  $Mg^{2+}$  у концентрації 10–20 мг/л підвищує ріст і вміст пігментів *Chlorella vulgaris*, особливо за білого та природного освітлення.  $Mn^{2+}$  чинить нелінійний ефект на ріст біомаси мікродоростей та переважно інгібуючий вплив на фотосинтетичну активність клітин.

Найбільший вміст хлорофілів і каротиноїдів спостерігався у зразках із 10–20 мг/л  $Mg^{2+}$ , що свідчить про активацію фотосинтетичних процесів у клітинах за надлишкових концентрацій  $Mg^{2+}$ .

Отримані результати підтверджують потенціал *Chlorella vulgaris* як об'єкта для біотехнологій отримання пігментів у системах із регульованим спектром освітлення і як моделі для біомоніторингу впливу металів.

#### **Література:**

1. Pacheco, D., Rocha, A. C., Pereira, L., & Verdelhos, T. (2020). Microalgae Water Bioremediation: Trends and Hot Topics. *Applied Sciences*, 10(5), 1886. <https://doi.org/10.3390/app10051886>
2. Shaul O. Magnesium transport and function in plants: the tip of the iceberg. *Biometals*. 2002 Sep;15(3):309-23. doi: 10.1023/a:1016091118585
3. Dukic E, van Maldegem KA, Shaikh KM, Fukuda K, Töpel M, Solymosi K, Hellsten J, Hansen TH, Husted S, Higgins J, Sano S, Ishijima S, Spetea C. Chloroplast magnesium transporters play essential but differential roles in maintaining magnesium homeostasis. *Front Plant Sci*. 2023
4.  $Mn_4Ca$  cluster in photosynthesis: where and how water is oxidized to dioxygen. *Chem Rev*. 2014 Apr 23;114(8):4175-205. doi: 10.1021/cr4004874
5. LICHTENTHALER HK, WELLBURN AR. Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. *Biochem Soc Trans* 1983;11:591–2. <https://doi.org/10.1042/bst0110591>.
6. Smythers, A.L., Crislip, J.R., Slone, D.R. *et al.* Excess manganese increases photosynthetic activity via enhanced reducing center and antenna plasticity in *Chlorella vulgaris*. *Sci Rep* 13, 11301 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-35895-x>
7. Liang, HZ., Zhu, F., Wang, RJ. *et al.* Photosystem II of *Ligustrum lucidum* in response to different levels of manganese exposure. *Sci Rep* 9, 12568 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-48735-8>

### **РЕЧОВИНИ КВОРУМУ (*QUORUM SENSING* ТА *QUORUM QUENCHING*) В БІОТЕХНОЛОГІЯХ ОЧИЩЕННЯ СТИЧНИХ ВОД**

**Колтишева Д.С., Щурська К.О.**

*КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна, м.Київ, [koltysheva.dina@iit.kpi.ua](mailto:koltysheva.dina@iit.kpi.ua)*

В процесах очищення міських та промислових стічних вод в біотехнологічних спорудах, таких як аеротенки, біофільтри, мембранні біореактори, а також новітні інтегровані технології, зокрема мікробні паливні елементи-біологічні ставки (CW-MFC), біопаливні елементи (BFC), біологічним агентом є консорціум мікроорганізмів, що здійснює біологічну деструкцію забруднюючих речовин [1, 2]. До складу консорціуму мікроорганізмів входять деструктори органіки, нітрифікатори, денітрифікатори та інші, при

чому видовий склад залежить від абіотичних та біотичних факторів, зокрема від температури, рН, освітлення, вмісту органічних та неорганічних речовин, а також антагоністичних та синергетичних взаємодій між мікроорганізмами консорціуму. Процеси очищення стічних вод відбуваються в біоплівці: біоплівка на носіях біофільтрів, пластівці активного мулу, гранули активного мулу [3]. Пластівці активного мулу складаються зі щільного консорціуму мікроорганізмів в матриці позаклітинних полімерних речовин, тому активний мул можна вважати біоплівкою без сформованих поверхневих зв'язків з носієм [4]. На формування біоплівки впливають речовини кворуму *quorum sensing* (QS, відчуття кворуму) та *quorum quenching* (QQ, гасіння кворуму). Серед сполук кворуму виділяють ацил-гомосерин лактони (AHL), автоіндукуючі олігопептиди (AIP), автоіндуктор 2 (AI-2), та автоіндуктор 3 (AI-3), дифузійні сигнальні молекули (DSF), хінолони (PQS), які забезпечують формування або пригнічення формування біоплівки, експресію генів, регулювання реакцій метаболізму, стійкість біоплівки до зовнішніх факторів, зокрема до концентрації поллютантів, в тому числі пластику та антибіотиків [5, 6]. Метою даного дослідження є огляд речовин кворуму та визначення їхньої ролі в очищенні стічних вод.

В мембранних біореакторах важливим є запобігання біообростанню мембран, що призводить до порушення процесів масообміну та очищення стічних вод, тому в даних технологіях розглядають можливі стратегії пригнічення формування біоплівки, а саме додавання речовин інгібіторів QS, культивування бактерій, що здатні синтезувати молекули QQ, деградація речовин QS активними формами кисню або ферментами [7].

Натомість формування збагачених екзоелектрогенними біоплівок сприяє збільшенню генерування електричної енергії в біопаливних елементах. Речовини кворуму QS сприяють виділенню позаклітинних полімерних речовин (EPS) та біосурфактантів, що підвищує ефективність очищення стічних вод. Розглядають такі стратегії формування біоплівки: додавання речовин QS, культивування бактерій, що здатні синтезувати молекули QS, контроль синтезу молекул QS [8].

На продукування речовин кворуму, а також формування біоплівки впливають температура, рН, наночастинки, антибіотики у складі стічної води [5]. Zhang та ін. [9] спостерігали при збільшенні рН до 9, зменшення синтезу AHL бактеріями, що входять до складу гранул ANAMMOX, внаслідок чого пригнічувався синтез EPS, в той час як рН 6 сприяло продукуванню молекул AHL та формуванню біоплівки. N-ацил-гомосеринлактон-опосередкована експресія генів кодується трьома з п'яти класів *Proteobacteria* ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ), що містяться в активному мулі стічних вод, та впливає на виробництво сигнальних молекул AHL.

Формування біоплівки забезпечує обмін метаболітами, генетичним матеріалом, а також сигнальними молекулами, що в свою чергу сприяє стійкості консорціуму та процесам регулювання метаболізму на зміну фізико-хімічного складу стічних вод. Моделювання впливу речовин кворуму на формування біоплівки та процеси очищення стічних вод є складним завданням, оскільки консорціум мікроорганізмів продукує велике різноманіття сигнальних молекул, що можуть мати як внутрішньовидовий, так і міжвидовий вплив, а також маловідома взаємодія між самими речовинами. Додавання речовин кворуму сприяє зміцненню біоплівки та збільшує ефективність біодеградації органічних речовин, наприклад, Gao та ін. [10] продемонстрували, що додавання 50 нМ AHL призвело до пришвидшення формування біоплівки на 25% та збільшення ефективності очищення стічних вод на 20%. Також речовини кворуму сприяють збільшенню потужності МПЕ, наприклад додавання AHL та PQS сприяло збільшенню потужності на 21,57% та 13,73% відповідно [11].

**Таблиця 1.** Речовини *quorum sensing* (QS) та *quorum quenching* (QQ)  
в біотехнологіях очищення стічних вод

Речовини кворуму	Мікроорганізм	QS/QQ	Вид консорціуму	Література
PQS	<i>Pseudomonas</i>	QS	Анодна біоплівка біопаливного елемента	[12, 13]
AHL	Бактерії процесу ANAMMOX	QS	ANAMMOX гранули	[5, 9]
AHL	<i>Aeromonas hydrophila</i>	QS	Активний мул	[14]
AHL	<i>Pseudomonas</i>	QS	Активний мул	[15]
AHL-лактоназа	<i>Bacillus cereus</i>	QQ	Біоплівка у мембранному біореакторі	[16]
DSF	<i>Xanthomonas sp.</i>	QS	Активний мул	[17]

Формування біоплівки та її стійкість, деструкція поллютантів, залежить від синтезу та розподілу речовин кворуму, тому регулювання процесів очищення має зокрема відбуватись шляхом додавання речовин кворуму або застосуванням стратегії пригнічення їх синтезу. Дослідження впливу речовин кворуму на сьогодні проводять переважно в лабораторних умовах і мало вивчені ці механізми в великих масштабах, в яких відбуваються процеси очищення міських та промислових стічних вод. Також маловідомою залишається між речовинами кворуму внутрішньовидова та міжвидова взаємодія, в тому числі механізми кворуму між мікрободоростями та бактеріями, які присутні в біотехнологіях очищення стічних вод, та мікроорганізмів катодної біоплівки. Застосування стратегій пригнічення формування біоплівки для запобігання біобростанню мембран та навпаки ініціація формування біоплівки стійкої до дії поллютантів може стати сталою стратегією в біотехнологіях очищення стічних вод.

#### Список використаної літератури:

1. Rusyn I., Gómora-Hernández J. C. Constructed wetland microbial fuel cell as enhancing pollutants treatment technology to produce green energy. *Biotechnology Advances*. 2024. Vol. 77. P. 108468. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2024.108468>
2. Koltysheva D., Shchurska K., Kuzminskyi Y. Microalgae and cyanobacteria as biological agents of biocathodes in biofuel cells. *BioTechnologia*. 2021. Vol. 102, no. 4. P. 437–444. URL: <https://doi.org/10.5114/bta.2021.111108>
3. An overview of quorum sensing in shaping activated sludge forms: Mechanisms, applications and challenges / X. Wang et al. *Science of The Total Environment*. 2024. P. 171886. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171886>
4. The presence and role of bacterial quorum sensing in activated sludge / G. Chong et al. *Microbial Biotechnology*. 2012. Vol. 5, no. 5. P. 621–633. URL: <https://doi.org/10.1111/j.1751-7915.2012.00348.x>
5. Research Progress on the Influence Factors of the Quorum Sensing System Regulating the Growth of Wastewater Treatment Biofilm / R. Wang et al. *Water*. 2025. Vol. 17, no. 13. P. 1944. URL: <https://doi.org/10.3390/w17131944>
6. Regulation of quorum sensing for the manipulation of conjugative transfer of antibiotic resistance genes in wastewater treatment system / X. Qiu et al. *Water Research*. 2024. P. 121222. URL: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.121222>

7. Exploring the Function of Quorum Sensing Regulated Biofilms in Biological Wastewater Treatment: A Review / S. Sahreen et al. *International Journal of Molecular Sciences*. 2022. Vol. 23, no. 17. P. 9751. URL: <https://doi.org/10.3390/ijms23179751>
8. Quorum sensing regulation methods and their effects on biofilm in biological waste treatment systems: A review / Z. Sun et al. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*. 2021. Vol. 16, no. 7. URL: <https://doi.org/10.1007/s11783-021-1495-2>
9. Effects of pH on AHL signal release and properties of ANAMMOX granules with different biomass densities / J. Zhang et al. *Environ. Sci.-Water Res. Technol.* 2019. Vol. 5, URL: <https://doi.org/10.1039/C9EW00581A>
10. Application and Mechanism of Quorum Sensing in Biological Wastewater Treatment Systems: Current State and Future Prospects / P. Gao et al. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2024. P. 113453. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.113453>
11. Role of bacterial quorum sensing and quenching mechanism in the efficient operation of microbial electrochemical technologies: A state-of-the-art review / S. Chakraborty et al. *Heliyon*. 2023. P. e16205. URL: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16205>
12. Quorum sensing signals improve the power performance and chlortetracycline degradation efficiency of mixed-culture electroactive biofilms / X.-L. Cheng et al. *iScience*. 2022. P. 104299. URL: <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.104299>
13. Bioremediation of wastewater through a quorum sensing triggered MFC: A sustainable measure for waste to energy concept / P. Sivasankar et al. *Journal of Environmental Management*. 2019. Vol. 237. P. 84–93. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.01.075>
14. The regulation of biofilm development by quorum sensing in *Aeromonas hydrophila* / M. J. Lynch et al. *Environmental Microbiology*. 2002. Vol. 4, no. 1. P. 18–28. URL: <https://doi.org/10.1046/j.1462-2920.2002.00264.x>
15. Production of acylated homoserine lactones by *Aeromonas* and *Pseudomonas* strains isolated from municipal activated sludge / F. Morgan-Sagastume et al. *Canadian Journal of Microbiology*. 2005. Vol. 51, no. 11. P. 924–933. URL: <https://doi.org/10.1139/w05-077>
16. Quorum sensing based membrane biofouling control for water treatment: A review / M. F. Siddiqui et al. *Journal of Water Process Engineering*. 2015. Vol. 7. P. 112–122. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2015.06.003>
17. Function of quorum sensing and cell signaling in wastewater treatment systems / H. Hu et al. *Water Science and Technology*. 2020. URL: <https://doi.org/10.2166/wst.2020.601>
18. Roles of quorum sensing in biological wastewater treatment: A critical review / N. R. Maddela et al. *Chemosphere*. 2019. Vol. 221. P. 616–629. URL: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.01.064>
19. Potential roles of quorum quenching in microbial aggregates during wastewater treatment / Y. Fu et al. *Bioresource Technology*. 2025. Vol. 419. P. 132027. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.132027>
20. Quorum sensing-mediated microbial interactions: Mechanisms, applications, challenges and perspectives / X. Zeng et al. *Microbiological Research*. 2023. Vol. 273. P. 127414. URL: <https://doi.org/10.1016/j.micres.2023.127414>
21. Quorum quenching bacteria isolated from industrial wastewater sludge to control membrane biofouling / A. Noori et al. *Bioresource Technology*. 2022. Vol. 352. P. 127077. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127077>
22. Quorum sensing in anaerobic wastewater treatment: Potential microbiological mechanisms and enhancement strategies / L. Chen et al. *Chemical Engineering Journal*. 2024. Vol. 499. P. 156150. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.156150>

# МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ СТУПЕНЯ ПЕРФОРАЦІЇ БІЧНИХ СТІНОК ЗБІРНИХ ДРЕНАЖНИХ ТРУБОПРОВОДІВ

*Кравчук О.А.<sup>1</sup>, Кравчук А.М.<sup>2</sup>*

*Київський національний університет будівництва і архітектури, Україна, Київ,  
kravchuk.aa2@knuba.edu.ua<sup>1</sup>, kravchuk.am@knuba.edu.ua<sup>2</sup>*

Як відомо, основними робочими елементами, які слугують для забору ґрунтової води підземними водозаборами променевого типу, є збірні дренажні трубопроводи. В якості останніх найчастіше використовуються сталеві перфоровані трубопроводи, в які вода надходить через отвори або щілини перфорації в бічних стінках. Окрім цього, для попередження потрапляння у збірний дренажний трубопровід частинок навколишнього ґрунту, останні додатково обмотуються спеціальними фільтруючими матеріалами, додатково також улаштовується зворотній фільтр з різних фільтруючих матеріалів [1-3].

Таким чином для того, щоб вода з навколишнього ґрунту надійшла у збірний трубопровід, вона повинна пройти через шар фільтруючого матеріалу і через отвори перфорації стінок труби. Очевидно, що витрата води в обох випадках буде однаковою.

З загального курсу гідравліки відомо, що витрата рідини через отвір (отвори на одиниці довжини перфорованого трубопроводу) визначається за залежністю [4]:

$$q = \frac{dQ}{dx} = \mu_{зб} \alpha_n \sqrt{2gz}, \quad (1)$$

де  $\mu_{зб}$  – коефіцієнт витрати отворів перфорації;  $\alpha_n = \Sigma \omega_o / l$  – площа отворів перфорації на одиниці довжини труби;  $z$  – перепад напорів, під дією якого відбувається втікання рідини з навколишнього простору у дренаж.

З іншого боку, у відповідності з [5], витрату через фільтруючий шар ґрунту до одиниці довжини дренажного трубопроводу розраховується за формулою:

$$q = \frac{dQ}{dx} = k_\phi \frac{z}{\bar{\Phi}}, \quad (2)$$

де  $\bar{\Phi}$  – фільтраційний опір дрени.

Очевидно, що витрати (1) і (2) будуть рівні між собою:

$$\mu_{зб} \alpha_n \sqrt{2gz} = k_\phi \frac{z}{\bar{\Phi}}. \quad (3)$$

З (3) після нескладних перетворень легко отримати:

$$\bar{\Phi} = \frac{k_\phi \sqrt{z}}{\mu_{зб} \pi D S \sqrt{2g}}, \quad (4)$$

де  $l, D$  – відповідно довжина і діаметр трубопроводу;  $S = \frac{\Sigma \omega_o}{\pi D l}$  – відношення сумарної площі отворів перфорації в дренажному трубопроводі до загальної площі бічної поверхні дрени (при рівномірній перфорації стінок трубопроводу – те ж саме на одиниці довжини труби).

Прийнявши в середньому для всієї труби  $\mu_{зб} = 0,62$  і  $z = z_{сер}$ , з виразу (4) легко визначити величину перфорації стінок дренажного трубопроводу, яка буде забезпечувати надходження необхідної витрати в дренажний трубопровід

$$S = 0,36 \frac{k_\phi}{D \bar{\Phi}} \sqrt{\frac{z_{сер}}{g}}. \quad (5)$$

В загальному випадку, при проєктуванні дренажних трубопроводів інженерних систем, в залежності від завдання, вирішуються різні задачі. Зазвичай при цьому відомими є: необхідна швидкість  $V_k$  (витрата  $Q_k$ ) в кінці труби; довжина трубопроводу  $l$ ; його діаметр  $D$ ; узагальнений параметр  $A$  [6].

Тоді, для трубопроводів (приймавши  $z = z_{cep}$ ), ступінь перфорації бічних стінок трубопроводу рекомендується визначати за формулою:

$$S = 0,1 \frac{D}{A_{зб} l}, \quad (6)$$

де  $A_{зб} = \frac{\Omega \bar{\Phi}}{2k_{\phi} l} \sqrt{\frac{g}{z_k}}$  – узагальнений параметр збірної дрени, який враховує її конструктивні і

фільтраційні характеристики;  $\Omega$  – площа поперечного перерізу збірного дренажного трубопроводу.

Загальна площа отворів (щілин) у бічних стінках дренажного трубопроводу складе ( $m^2$ ):

$$\sum \omega_o = S \cdot \pi \cdot D \cdot l = 0,14 \frac{\pi D^2}{A_{зб}}. \quad (7)$$

Задавшись діаметром одного отвору  $d_o$ , можна визначити їх загальну кількість по всій довжині дренажного трубопроводу:

$$N = 0,56 \frac{D^2}{d_o^2 A_{зб}}. \quad (8)$$

Тоді, за умови прийняття рівномірної перфорації вздовж шляху, кількість отворів на одному погонному метрі труби складе:

$$n = \frac{N}{l}. \quad (9)$$

Запропонована методика визначення ступеня перфорації бічних стінок збірного дренажного трубопроводу забезпечує їх рівномірний розподіл за довжиною напірного трубопроводу. Але при цьому досягти рівномірного приєднання рідини вздовж збірника досягти можна тільки при невеликій інтенсивності перфорації.

Для забезпечення відносно рівномірного приєднання рідини за довжиною напірного збірного дренажного трубопроводу необхідно розділити збірник на окремі відрізки і розраховувати за запропонованою методикою окремо кожен з них. При цьому вважається, що в межах кожної ділянки здійснюється рівномірне приєднання рідини, а в цілому по всьому збірнику буде мати місце нерівномірний збір рідини.

### Література

1. Collins S. L., Houben G. J. Horizontal and radial collector wells: simple tools for a complex problem. *Hydrogeology Journal*. 2020. Vol. 28. P. 1925-1935. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02120-2>
2. Bishnoi K., Kansal M. L., Mishra G. C. Flow to a collector pipe laid under a stream bed. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*. 2015. Vol. 22, No 1. P. 100-108. <https://doi.org/10.1080/09715010.2015.1088410>

3. Тугай Я. А., Майстренко Г. В. Доцільність використання променевих споруд; їх типи і напрями фільтраційних потоків. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*. 2013. Вип. 21, с. 58-63.

4. Кравчук А. М., Кравчук О. А. Спеціальні питання гідравліки систем водопостачання та водовідведення: навчальний посібник. Київ: КНУБА, 2020. – 175 с.

5. Кравчук А., Кравчук О. Визначення ефективних конструктивних характеристик збірних дренажних трубопроводів меліоративних систем. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*. 2023. Вип. 13. С. 149-159. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.13.2023.149-159>

6. Кравчук О.А. Розрахунок необхідної інтенсивності перфорації бічної поверхні розподільчих дренажних трубопроводів. *Комунальне господарство міст. Серія: «Технічні науки»*. 2025. Т. 1, № 189. С. 238-242. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2025-1-189-238-242>

## БІОТЕХНОЛОГІЧНІ ПІДХОДИ ДО ОЧИЩЕННЯ ТА РЕЦИРКУЛЯЦІЇ ВОДИ В АКВАПОНІЧНІЙ СИСТЕМІ

*Майборода Х.А.*

*Національний університет водного господарства та природокористування, Рівне,  
h.a.maiboroda@nuwm.edu.ua*

Сучасні аквапонічні системи розглядаються як інтегровані біотехнологічні комплекси замкненого водокористування, у яких поєднуються процеси аквакультури, гідропоніки та мікробіологічної регенерації середовища. Функціонування таких систем базується на перетворенні продуктів метаболізму риб на доступні для рослин поживні сполуки за участю мікроорганізмів, що забезпечує замкнений біогеохімічний цикл основних елементів живлення — азоту, фосфору та калію. Рослини виконують роль кінцевих споживачів мінеральних речовин та одночасно виступають як біологічні фільтри, стабілізуючи хімічний склад води, зменшуючи її токсичність і сприяючи формуванню рівноважного мікробного біоценозу. Такий комплексний підхід забезпечує багаторазову рециркуляцію води, природне очищення середовища та підтримання стабільного біогеохімічного балансу, що робить аквапоніку ефективною та екологічно безпечною технологією, особливо актуальною за умов обмежених водних ресурсів і зростаючого антропогенного навантаження на природні екосистеми.

Нами було проведено дослідження в лабораторних умовах на базі Національного університету водного господарства та природокористування. Дослідна система складалася з гідроблоку для риб та двох ємностей для вирощування рослин, що дозволяло моделювати замкнений цикл водокористування та створювало умови для точного контролю фізико-хімічних і біологічних параметрів.

У досліді використовували сома кларієвого (*Clarias gariepinus*) — вид із високою пластичністю та стійкістю до коливань гідрохімічних показників, а також листовий салат (*Lactuca sativa*), який характеризується високою здатністю поглинати нітратні форми азоту. Риб годували збалансованим комерційним кормом Aller Aqua у дозі 30 г/добу, що забезпечувало стабільне надходження органічних речовин та метаболітів у систему. Освітлення рослин здійснювалося LED-панелями з інтенсивністю 2500 лк/м<sup>2</sup> та фотоперіодом 16 годин, що відповідало оптимальним умовам фотосинтезу і росту салату.

Функціонування системи базувалося на інтегрованих мікробіологічних та фізіологічних процесах очищення води. Активними агентами біотрансформації були нітрифікуючі бактерії родів *Nitrosomonas* та *Nitrobacter*, які окиснювали амонійний азот

( $\text{NH}_4^+$ ) у нітрити ( $\text{NO}_2^-$ ) і далі — у нітрати ( $\text{NO}_3^-$ ), що були доступні для рослин. В результаті експерименту концентрація амонійного азоту знизилася з  $4,53 \text{ мг/дм}^3$  до  $0,72 \text{ мг/дм}^3$ , а концентрація нітратів — із  $30,4$  до  $16,0 \text{ мг/дм}^3$ , що підтверджує ефективність біотрансформації та поглинання азоту салатом.

Оптимальні умови для мікробного консорціуму забезпечувалися при розчиненому кисні  $6\text{--}8 \text{ мг/дм}^3$ , рН  $7,0\text{--}7,5$  та температурі  $19\text{--}21 \text{ }^\circ\text{C}$ , що сприяло стабільній роботі як мікроорганізмів, так і водних біоценозів риб та рослин. Хімічне (ХСК —  $51,7 \text{ мг O}_2/\text{дм}^3$ ) та біохімічне (БСК —  $17,4 \text{ мг O}_2/\text{дм}^3$ ) споживання кисню свідчить про домінування аеробних процесів мінералізації органічних сполук.

Біотехнологічний підхід до очищення води передбачав створення саморегульованого мікробно-рослинного біоценозу, у якому взаємодія автотрофних і гетеротрофних мікроорганізмів забезпечувала трансформацію органічних і неорганічних сполук у форми, доступні для рослин. Біофільтраційні процеси включали мікробну нітрифікацію, часткову денітрифікацію, біодеструкцію органічних залишків та поглинання мінеральних речовин рослинами, що підтримувало низький рівень токсичних форм азоту без застосування хімічних реагентів.

Рециркуляція води в дослідній аквапонічній системі здійснювалась у замкненому контурі, що забезпечував безперервний рух потоку між рибницьким резервуаром та гідропонними модулями. Вода з ємності для вирощування сома кларієвого (*Clarias gariepinus*) насосом подавалася до відділення з салатом листовим (*Lactuca sativa*), де відбувалося природне біологічне очищення завдяки розвитку мікробіоценозу ризосфери. Цей мікробно-рослинний комплекс виконував функцію автономного біофільтра, у якому поєднувалися процеси нітрифікації, денітрифікації та мінералізації органічних речовин. У зоні кореневих систем салату створювалися оптимальні умови для розвитку нітрифікуючих бактерій родів *Nitrosomonas* і *Nitrobacter*, які трансформували амонійні сполуки в нітратні форми, доступні для рослинного поглинання.

Основним джерелом мінеральних елементів у системі слугував рибний корм, який містив у середньому  $9\%$  азоту,  $2\%$  фосфору та  $0,66\%$  калію у перерахунку на абсолютно суху речовину. Внаслідок мікробіологічних і біохімічних процесів значна частина цих елементів залучалася до біогеохімічного кругообігу — частково акумулювалася в біомасі рослин, частково у вигляді мінералізованих форм поверталася у водне середовище для повторного використання. У результаті відбувалося ефективне самоочищення води без застосування зовнішніх реагентів, що забезпечувало екологічну стійкість системи та мінімальні втрати водних ресурсів.

Отже, результати дослідження свідчать, що біотехнологічні підходи до очищення та рециркуляції води в аквапонічних системах забезпечують ефективне функціонування замкненого водного циклу, у якому продукти метаболізму риб через діяльність мікроорганізмів перетворюються на форми поживних речовин, доступні для рослин. Рослинний компонент, виконуючи роль природного біофільтра, стабілізує гідрохімічні показники води, знижує концентрацію токсичних сполук та підтримує рівновагу мікробного біоценозу. У сформованому мікробно-рослинному комплексі інтегровано процеси нітрифікації, часткової денітрифікації, мінералізації органічних речовин та поглинання мінеральних елементів рослинами, що забезпечує високий рівень самоочищення води без залучення хімічних реагентів. Завдяки замкненому контуру рециркуляції, підтриманим оптимальним фізико-хімічним параметрам і взаємодії автотрофних і гетеротрофних мікроорганізмів, досягається стабільний біогеохімічний баланс, зменшуються втрати водних ресурсів і підвищується продуктивність як риб, так і рослин, що підтверджує ефективність та екологічну безпечність аквапонічних технологій.

# ПРИРОДНІ ТА КОМПОЗИТНІ СОРБЕНТИ ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ ПРИРОДНИХ ВОД ВІД ІОНІВ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ З МЕТОЮ ЗБЕРЕЖЕННЯ ЇХ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕЧНОСТІ ТА ЛІКУВАЛЬНОЇ ЦІННОСТІ

*Марчук О.О., Фарбун І.А., Григоренко Н.О., Кравченко М.В., Ковальчук І.А., Романова І.В.*

*Інститут сорбції та проблем ендоекології НАН України, Україна, Київ,  
alexandra8@ukr.net*

У сучасних умовах підвищеного техногенного навантаження та потенційних воєнних ризиків актуальною є проблема можливого потрапляння важких металів у водоносні горизонти, які є джерелами питного водопостачання. Такі забруднення можуть виникати внаслідок аварій на нафтогазових, хімічних або транспортних об'єктах чи через руйнування інфраструктури. З оглядом на це, важливим завданням є вивчення процесів вилучення іонів важких металів з природних вод із застосуванням сорбційних методів.

В Інституті сорбції та проблем ендоекології НАН України традиційно розробляють сорбенти різної природи та призначення. Для дослідження обрано природний глинистий мінерал монтморилоніт з високою катіонообмінною ємністю; активоване вугілля, здатне видаляти токсичні форми металів і органічні домішки, та синтетичний іоніт цирконій-силікат, який хоча й дорожчий, вирізняється високою ефективністю щодо іонів важких металів.

Об'єктом дослідження були модельні та природні мінеральні води родовищ Карпатського регіону. Для порівняння використано також літературні дані щодо мінеральних вод Польщі, Греції, Китаю тощо, у яких визначали вміст важких металів (Zn, Cu, Cr, Ni, Pb, Cd, Hg) і радіонуклідів [1–4]. В роботі особливу увагу приділено мінеральним водам родовищ Трускавця типу «Нафтуся», «Софія», «Броніслава», «Марія», які є унікальними природними утвореннями. Вони поєднують лікувальні властивості з високим рівнем природного захисту від поверхневого забруднення. Їх формування відбувається у складній гідрогеологічній системі, де важливу роль відіграють глинисті мінерали, карбонатні породи та органічні компоненти, що зумовлює специфічний мікроелементний склад і біологічну активність цих вод. Мінералізація вод змінюється від невисокої (до 1 г/л) для «Нафтусі» до високої (до 10 г/л) для «Марії». Ці мінеральні води багаті на бікарбонати, хлориди, сульфати, кальцій, магній та органічні сполуки.

На першому етапі дослідження сорбційні властивості матеріалів оцінювали на модельних розчинах у дистильованій воді з іонною силою 0,01 М NaCl, що дозволяло визначити базові характеристики сорбції та кінетику процесу. На другому етапі сорбцію здійснювали на реальних мінеральних водах з додаванням іонів  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ , що дало змогу оцінити ефективність сорбентів у природному середовищі з реальною мінералізацією, органічними компонентами та значенням рН. Залишкові концентрації важких металів після сорбційних експериментів визначали спектрометрично.

**Бентонітові глини формують природні водотривкі бар'єри**, які перешкоджають проникненню поверхневих вод у глибші горизонти, зменшують змішування водних шарів і сприяють адсорбції важких металів та органічних речовин. Іонообмінні властивості монтморилоніту (основного мінералу бентонітових глин) дозволяють ефективно вилучати іони металів, не змінюючи основного мінерального складу, тому монтморилоніт придатний для превентивного контролю та м'якого очищення вод типу «Нафтуся» без втрати лікувальних властивостей. Активоване вугілля традиційно застосовується у водопідготовці [5], особливо при незначних ризиках забруднення. Цирконій-силікат забезпечує найвищу ефективність

очищення від іонів важких металів, але може частково вилучати цінні мікроелементи, тому його доцільно застосовувати для екстреного очищення при підвищених рівнях забруднення.

1. Wojtkowska M., Wojtkowski K., Długosz-Lisiecka M. Assessment of Heavy Metals and Radionuclides Concentration in Selected Mineral Waters Available on the Polish Market. **Applied Sciences**, 2022, 12(22), 11401. <https://doi.org/10.3390/app122211401>.
2. Vigni L.L., Daskalopoulou K., Calabrese S. et al. Characterization of trace elements in thermal and mineral waters of Greece. **Environmental Science and Pollution Research**, 2023, 30, 78376–78393. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27829-x>.
3. Rui Y., Zhang Y., Li S. Determination of Trace Elements Content in Mineral Water and its Processed Mineral Water by ICP MS. **Asian Journal of Chemistry**, 2013, 25(9). <https://doi.org/10.14233/ajchem.2013.14128>.
4. Trach Y. Metoda perspektywna usuwania metali ciężkich z wód podziemnych zachodniej Ukrainy. **Acta Sci. Pol. Architectura**, 2020, 19(1), 85–92. <https://doi.org/10.22630/ASPA.2020.19.1.9>.
5. Селективная сорбция и катализ на активных углях и неорганических ионитах / Под ред. В.В. Стрелко. - Киев: Наукова думка, 2008, 303 с. [https://drive.google.com/file/d/1YbJQbUpLiR7kbohE0ijxg4GF9qN7Pm\\_A/view](https://drive.google.com/file/d/1YbJQbUpLiR7kbohE0ijxg4GF9qN7Pm_A/view).

## ОТРИМАННЯ СОРБЕНТУ НА ОСНОВІ ПРИРОДНОГО КЛИНОПТИЛОЛІТУ, МОДИФІКОВАНОГО ЧАСТИНКАМИ Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ ПРИРОДНИХ І СТІЧНИХ ВОД

*Матвіїв Т.І., Знак З.О.*

*Національний університет «Львівська політехніка», Україна, м. Львів  
taras.i.matviiv@lpnu.ua*

Сучасні проблеми забруднення води, особливо з урахуванням наслідків агресії росії, вимагають розроблення технологічно та економічно ефективних та екологічно безпечних методів її очищення. Найбільшу увагу зараз приділяють саме адсорбційним методами очищення. Серед численних адсорбентів особливу увагу привертають природні цеоліти, зокрема, найпоширеніший з них – клиноптилоліт. Йому притаманна висока хімічна та термічна стабільність, значна ємність катіонного обміну і здатність до селективної адсорбції. Проте природний клиноптилоліт має обмежену активність щодо деяких видів забруднень, зокрема іонів важких металів і фосфатів. Тому останніми роками активно досліджується модифікація клиноптилоліту наночастинками оксидів заліза, зокрема магнетиту (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>). Допований частинками магнетиту, який є магніточутливим, клиноптилоліт можна легко виділяти із водного середовища магнітним чи електромагнітним методами для його регенерації.

У роботі модифікування клиноптилоліту проводили порційним імпрегнуванням дисперсного клиноптилоліту (0,1...0,25 мм) розчинами FeCl<sub>3</sub> або FeSO<sub>4</sub> (0,1...0,5 моль/дм<sup>3</sup>) за співвідношення Т:Р = 1 : 10 з подальшим його обробленням розчинами аміачної води, висушуванням та/або обробленням у полі електромагнітного надвисокочастотного випромінювання.

Вміст заліза як елементу у клиноптилоліті (приповерхневих його областях) визначали методом енергодисперсійного (EDX) аналізу, фазовий склад – методом РФА, морфологію вивчали, аналізуючи дані електронної мікроскопії.

Вміст заліза сягав 65 % мас. (типовий EDX наведено на рис. 1). Методом РФА встановлено, що після осадження і термічного оброблення осад містив  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{FeO}$  і  $\text{FeOOH}$ . Їх співвідношення залежало від умов осадження і термічної обробки зразків клиноптилоліту. Поверхня частинок клиноптилоліту після формування високодисперсних частинок  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  зберігала свої морфологічні особливості (рис. 2).

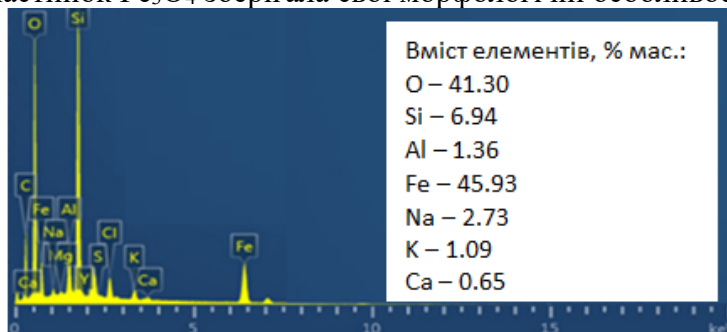


Рис. 1. EDX клиноптилоліту, модифікованого частинками  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ .

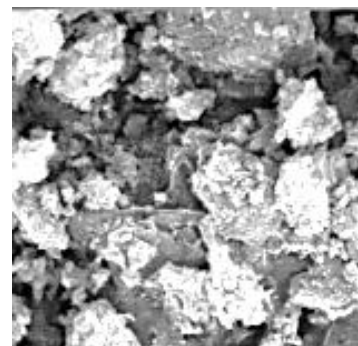


Рис. 2. СЕМ частинок клиноптилоліту, модифікованого частинками  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ .

На підставі елементного аналізу клиноптилоліту після його модифікування розчинами  $\text{FeCl}_3$  або  $\text{FeSO}_4$  встановлено особливості йонного обміну: інтенсивність обміну обмінних катіонів клиноптилоліту на йони заліза зменшується у ряді  $\text{Mg} > \text{Ca} > \text{K} > \text{Na}$ , тобто має місце селективність цього процесу.

Більшості отриманих зразків притаманна магнітна чутливість, що, у перспективі, дає змогу вилучати отримані доповані оксидами заліза сорбенти з вод для регенерації та подальшого використання.

## МОДИФІКУВАННЯ КЛИНОПТИЛОЛІТУ МІДІ ОКСИДОМ ЯК КАТАЛІЗАТОРОМ ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ ПРИРОДНИХ І СТИЧНИХ ВОД

*Мацьків М.Я., Знак З.О.*

*Національний університет «Львівська політехніка», Україна, м. Львів  
zenovii.o.znak@lpnu.ua*

Різноманіття поллютантів у природних водах, які істотно відрізняються своєю шкідливістю для екосистем і людей, потребує відповідних методів очищення. Враховуючи, що в Україні одними з найважливіших джерел водопостачання є поверхневі води, які містять як розчинні, так і дисперсні речовини, доцільним є розроблення сорбентів з додатковими каталітичними та антибактеріальними властивостями. Тому допущення природних сорбентів, зокрема, клиноптилоліту сріблом (у йонному та дисперсному станах), мангану оксидами дає змогу одночасно (за умови аерації) очищати поверхневі води від вказаних забруднювачів. Достатньо вираженими антибактеріальними та окисно-каталітичними властивостями володіють сполуки міді, зокрема, оксид. Тому мета роботи

полягала у дослідженні модифікування природного клиноптилоліту йонами та оксидами міді.

Дослідження проводили з використанням клиноптилоліту різних фракцій, які традиційно використовують у різних процесах очищення вод (у тому числі й стічних); як прекурсор використовували міді сульфат різної концентрації. Інтегральний вміст йонів міді, сорбованих клиноптилолітом, розраховували за зміною концентрації йонів міді у розчині модифікування (визначення проводили потенціометрично з використанням йонселективного електроду), а вміст міді у приповерхневих шарах (3...10 мкм) частинок клиноптилоліту – методом енергодисперсійного аналізу. Після сорбції цеолітом міді сульфату його обробляли розчином NaOH з подальшим термічним розкладом до CuO. Морфологію поверхні клиноптилоліту до і після модифікування аналізували за допомогою СЕМ.

Встановлено, що основна кількість йонів міді сорбується впродовж перших 3...5 хв (рис. 1) практично не залежно від дисперсності цеоліту та концентрації прекурсора – міді сульфату. Вони здебільшого впливають на вміст міді у приповерхневих шарах клиноптилоліту, який змінюється в межах від 1 до 65 мг/г. Частинки CuO, отримані після вказаних вище перетворень, завдяки високій дисперсності практично не змінюють морфологію поверхні клиноптилоліту (рис. 2).

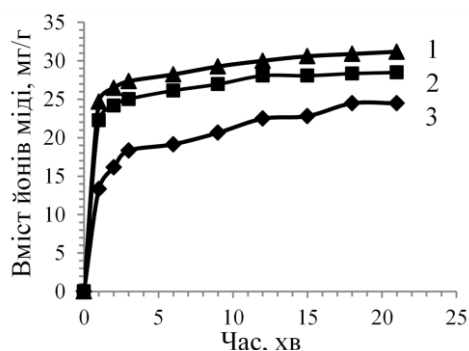


Рис. 1. Залежність  $C(\text{Cu}^{2+})$  від часу;  
Дисперсність цеоліту, мм:  
1 – 0,1...0,25; 2 – 0,25...0,5; 3 –

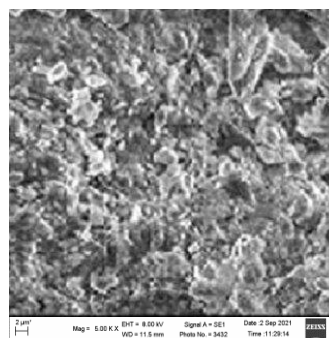


Рис. 2. СЕМ поверхні  
клиноптилоліту,  
модифікованого CuO

Завдяки цьому зберігається його здатність сорбувати на поверхні вискодисперсні та колоїдні частинки, що містяться у воді. Отже, є підстави очікувати, що отримані зразки модифікованого міді оксидом клиноптилоліту забезпечать ефективне одночасне очищення вод від низки домішок, що дасть змогу спростити відповідні технологічні процеси.

## КОМБІНУВАННЯ НАНОФІЛЬТРАЦІЙНОЇ ОБРОБКИ З ПЕРЕДОВИМИ ОКИСЛЮВАЛЬНИМИ ПРОЦЕСАМИ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОЧИЩЕННЯ ВОДИ ВІД ФАРМАЦЕВТИЧНИХ ПРЕПАРАТІВ

*Мельник Л.О., Хмельницька О.В., Семінська О.О., Балакіна М.М.*

*Інститут колоїдної хімії та хімії води ім. А.В. Думанського НАН України,  
Україна, м. Київ, e-mail: lumel2903@gmail.com*

Поєднання мембранної обробки з передовими окислювальними процесами (AOPs) розглядається на сучасному етапі як один із найбільш перспективних шляхів до розробки високоефективних технологічних схем видалення фармацевтично-активних сполук (ФАС) та інших токсикантів органічного походження із природних та стічних вод [1].

Метою даної науково-дослідної роботи є дослідження можливостей та перспектив використання AOPs перед мембранною обробкою для суттєвого покращення коефіцієнтів затримання органічних сполук, зокрема стрептоциду (сульфаніаміду) та парацетамолу, коефіцієнт затримання яких нанофільтраційною мембраною, за нашими даними, складає лише, відповідно, 9,4 та 13,0 %. Причому, в цьому дослідженні ми використовуємо AOPs на основі вакуумного ультрафіолету, які викликають високу зацікавленість у науковців всього світу з метою створення високоефективних і екологічно сприятливих технологій очищення води від пріоритетних органічних токсикантів [2-4].

Для ВУФ-УФ та ВУФ-УФ/TiO<sub>2</sub> обробки модельних розчинів фармацевтичних препаратів використовували лабораторну установку, основним елементом якої є проточні УФ-реактори з висотою робочої зони 200 мм та внутрішнім діаметром кварцового кожуха 19 мм. Фотокатализатор TiO<sub>2</sub> був іммобілізований на внутрішній поверхні кварцового кожуха реактора. В якості УФ-випромінювача у даних реакторах слугувала кварцова аргонортутна лампа низького тиску ДРБ-20 (дві інтенсивні лінії випромінювання – 185 (вакуумна область) та 254 нм ) із діаметром 17 мм. Таким чином, товщина шару води, яка підлягала дії УФ-опромінення у вказаних проточних реакторах, становила 1 мм. Модельний розчин (початковий об'єм 300 см<sup>3</sup>) подавався в реактори насосом в режимі циркуляції.

Дослідження з нанофільтраційної обробки здійснювали з використанням непроточної («тупикової») циліндричної комірки ємністю 220 см<sup>3</sup>. Об'єм розчину, що обробляли, становив 200 см<sup>3</sup>. Процес здійснювати при тиску 1 МПа з використанням нанофільтраційної мембрани ОПМН-П. Ступінь відбору пермеату (СВП) досягав 75%. Концентрація фармацевтичних препаратів у модельних розчинах складала 5-10 мг/дм<sup>3</sup>, концентрація фонового електроліту (NaHCO<sub>3</sub>) – 3,5 ммоль/дм<sup>3</sup> (модель води р. Дніпро). Значення водневого показника модельних розчинів складало 8,7-8,8.

Вміст фармацевтичних препаратів у розчинах визначали спектрофотометрично за максимумом поглинання в УФ області спектра. Спектри поглинання реєстрували за допомогою спектрофотометра Shimadzu 2450. В окремих дослідах вміст фармацевтичних препаратів визначали шляхом визначення загального органічного вуглецю (ЗОВ) на аналізаторі Shimadzu TOC-V<sub>CSN</sub>.

На рис. 1 наведено зміну УФ спектру поглинання модельного розчину стрептоциду в процесі ВУФ-УФ/TiO<sub>2</sub> обробки.

Як видно із рис. 1, інтенсивність поглинання при довжині хвилі 258 нм різко знизилася вже через 5 хв обробки, при цьому у спектрі з'явилося плече при довжині хвилі біля 290 нм. Зміни у спектрі, які нами спостерігались, були відмічені також у роботі [5] при дослідженні деградації стрептоциду (C<sub>0</sub>= 50 мг/дм<sup>3</sup>) у Фентон процесі в присутності залізовмісного катализатора на основі монтморилоніту. Однак, у дослідженні [5] спектр змінювався значно повільніше, ніж в наших експериментах і набув вигляду, аналогічного тому, що спостерігається нами через 15-20 хвилин обробки, лише через 330 хвилин обробки.

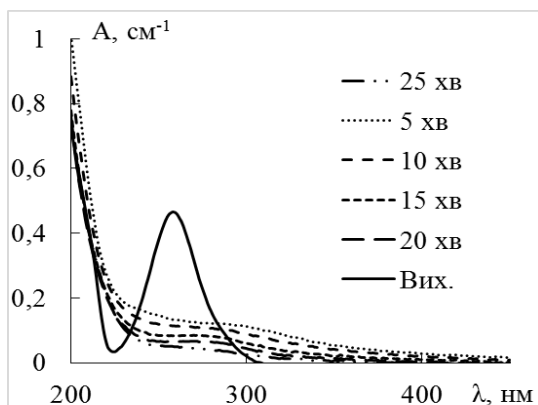


Рис. 1. Зміна УФ-спектру поглинання модельного розчину стрептоциду ( $C_0 = 5 \text{ мг/дм}^3$ ,  $\text{NaHCO}_3 - 3,5 \text{ ммоль/дм}^3$ ) в процесі ВУФ-УФ/ $\text{TiO}_2$  обробки протягом 25 хвилин

В роботі [5] методом вискоелективної рідинної хроматографії ВЕРХ було також ідентифіковано основні проміжні продукти деструкції сульфаніlamіду у Фентон процесі, серед яких виявлено сульфанілову кислоту, бензолсульфонову кислоту, п-бензохінон і аліфатичні карбонові кислоти. При цьому, після 550 хвилин обробки у водному розчині ідентифіковано, в основному, аліфатичні карбонові кислоти.

УФ-спектри поглинання модельного розчину парацетамолу в процесі ВУФ-УФ/ $\text{TiO}_2$  обробки наведено на рис. 2.

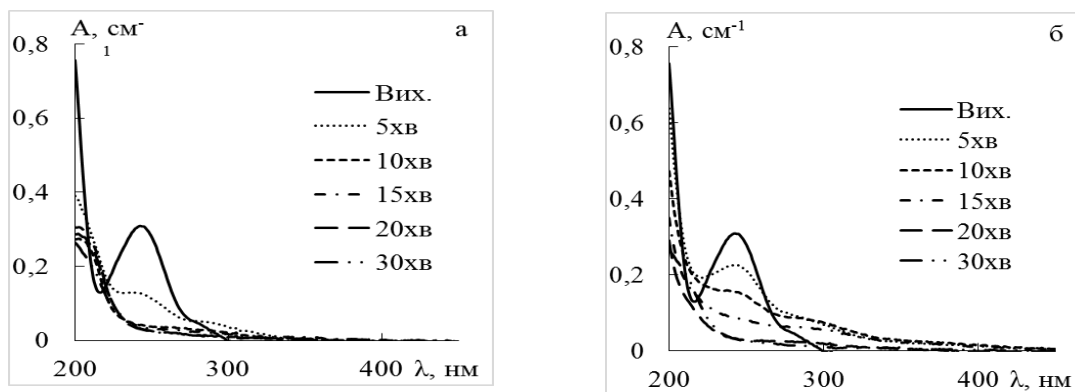


Рисунок 2. Зміна УФ-спектру поглинання модельного розчину парацетамолу ( $C_0 = 5 \text{ мг/дм}^3$ ) в процесі ВУФ-УФ/ $\text{TiO}_2$  обробки протягом 30 хвилин: в дистильованій воді (а), в присутності  $294 \text{ мг/дм}^3 \text{ NaHCO}_3$  (б)

Як видно із рис. 2, інтенсивність поглинання при довжині хвилі 243 нм поступово зменшується зі збільшенням тривалості обробки, що свідчить про ефективну деструкцію парацетамолу. Наявність гідрокарбонату натрію у модельному розчині парацетамолу гальмує ефективність його деструкції шляхом ВУФ-УФ/ $\text{TiO}_2$  обробки, що підтверджує результати наявних наукових досліджень про негативний вплив неорганічних аніонів на АОРs процеси на основі ВУФ опромінення [2]. У відповідності з літературними даними [6], деструкція парацетамолу в АОРs процесах призводить до утворення карбонових кислот як кінцевих продуктів процесу.

Порівняння отриманих нами результатів з наявними літературними даними дозволяє припустити, що в процесі здійсненої ВУФ-УФ/ $\text{TiO}_2$  обробки модельних розчинів стрептоциду та парацетамолу відбувається деструкція ФАС з утворенням карбонових кислот. Зниження рН модельного розчину в процесі обробки (від 8,8 до 8,2) узгоджується із цим припущенням.

Проведені дослідження показали також більш високу ефективність ВУФ-УФ/TiO<sub>2</sub> процесу у порівнянні з ВУФ-УФ процесу при тривалості обробки до 20 хв (в 1,1-1,3 рази). При тривалості обробки 25-30 хв ефективність обох досліджених АОРs процесів практично не відрізняється.

Як видно із рис. 3, в процесі нанофільтраційної обробки модельного розчину стрептоциду, що пройшов попередню ВУФ-УФ/TiO<sub>2</sub> обробку, відбувається ефективне видалення компонентів та накопичення їх у концентраті.

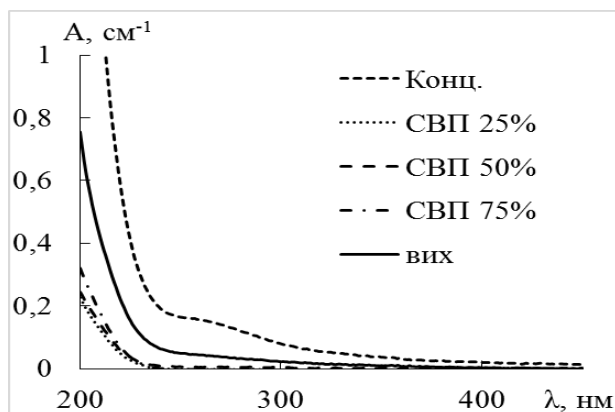


Рис. 3. УФ спектри поглинання вихідного розчину, пермеатів та концентрату, отриманих при нанофільтраційній обробці модельного розчину стрептоциду (5 мг/дм<sup>3</sup>), що пройшов попередню УФ-УФ/TiO<sub>2</sub> обробку протягом 25 хв

При цьому ступінь видалення органічних компонентів за лінією 258 нм досягає 100% (у порівнянні з 9,3% у випадку відсутності вказаної попередньої обробки). Аналогічні результати отримані також в процесі нанофільтраційної обробки модельного розчину парацетамолу, що пройшов попередню ВУФ-УФ/TiO<sub>2</sub> обробку, а також модельних розчинів ФАС, які пройшли попередню ВУФ-УФ обробку.

Таким чином, нами показано, що застосування ВУФ-УФ чи ВУФ-УФ/TiO<sub>2</sub> обробки (фотокаталізатор іммобілізований на внутрішній поверхні кварцового кожуха реактора) перед процесом нанофільтрації водних розчинів, що містять парацетамол чи стрептоцид, дозволяє суттєво збільшити ступінь видалення органічної складової (в умовах здійсненого експерименту за аналізом вмісту ЗОВ – до 80%). При відсутності зазначеної обробки затримка вказаних фармацевтичних сполук нанофільтраційною мембраною складає лише, відповідно, 13,0 та 9,4%. Проведені дослідження обґрунтовують раціональне поєднання безреагентних АОРs процесів з мембранною обробкою для підвищення ефективності очищення природних та стічних вод, а також знешкодження концентратів мембранних установок.

#### Перелік посилань

1. Rosman N., Salleh, W.N.W., Mohamed M. A., Jaafar, J., Ismail A.F., Harun Z. Hybrid membrane filtration-advanced oxidation processes for removal of pharmaceutical residue. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2018. 532. P. 236-260. [doi:10.1016/j.jcis.2018.07.118](https://doi.org/10.1016/j.jcis.2018.07.118).
2. Li H., Yang Y.L., Li X., Fan X.Y., Wang N. Enhanced degradation mechanism of sulfamethazine by vacuum ultraviolet/persulfate. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2021. V.9, N 6. 106489. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106489>.
3. Li H., Yang Y., Li X., Zhou Z., Feng J., Dai Y., Li X., Re J. Degradation of sulfamethazine by vacuum ultraviolet-activated sulfate radical-advanced oxidation: efficacy, mechanism and influences of water constituents. *Separation and Purification Technology*. 2022. Volume 282, Part A, 120058. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.120058>.
4. Zoschke K., Börnick H., Worch, E. Vacuum-UV radiation at 185 nm in water treatment – A review. *Water Research*. 2014. 52, 131–145. [doi:10.1016/j.watres.2013.12.034](https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.12.034).

5. Khankhasaeva S. Ts., Dambueva D. V., Dashinamzhilova E. Ts., Gil A., Vicente M. A., Timofeeva M. N. Fenton degradation of sulfanilamide in the presence of Al, Fe-pillared clay: Catalytic behavior and identification of the intermediates. *Journal of Hazardous Materials*. 2015. 293. P. 21-29. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.03.038>.
6. Ivanova, D.; Tzvetkov, G.; Kaneva, N. Degradation of Paracetamol in Distilled and Drinking Water via Ag/ZnO Photocatalysis under UV and Natural Sunlight. *Water*. 2023. 15, 3549. <https://doi.org/10.3390/w15203549>.

## ІНОВАЦІЙНІ ВОДНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЯК ЗАПОРУКА ВІДНОВЛЕННЯ ВОДНОЇ ГАЛУЗІ КРАЇНИ

*Мокієнко А.В.*

*Національний університет «Острозька академія»*

Внаслідок війни водна інфраструктура України зазнала збитків, оцінених у 11 мільярдів доларів США, і потребує комплексної модернізації на суму понад 40 мільярдів доларів США. Водний сектор України несе складну спадщину інфраструктури та інституційних домовленостей радянської епохи. Ця спадщина проявляється у глибоко фрагментованій структурі управління, де понад 2550 окремих водоканалів працюють за різними моделями власності, нормативно-правовими базами та технічними стандартами.

Зобов'язання України щодо інтеграції з ЄС стикаються зі значними структурними викликами, які виходять далеко за рамки простої модернізації інфраструктури. Існує величезний розрив у стандартах між поточними можливостями інфраструктури і стандартами якості води та навколишнього середовища ЄС, що вимагає не лише інвестицій, а й фундаментальної операційної трансформації.

Президент Асоціації «Укрводоканалекологія» Дмитро Новицький на Львівському екофорумі 2025 у вересні поточного року висловився досить безапеляційно: «Без технологій та оновлення інфраструктури всі реформи залишаться на папері. Сьогодні більшість насосних станцій – це обладнання 30–40-річної давнини. Мережі зношені, втрати води сягають 40%, а очисні споруди не відповідають жодним директивам ЄС. Саме тому ми повинні впроваджувати енергоєфективні рішення, цифрові системи моніторингу та управління, інтелектуальні прилади обліку».

Для забезпечення високої якості послуг необхідно здійснити кілька важливих кроків, зокрема гармонізувати нормативно-правові акти з європейськими, покращити моніторинг якості води та обмін даними, інвестувати в модернізацію інфраструктури водопідготовки та розподілу води, збільшити фінансування та розбудову потенціалу водоканалів. Дані кроки передбачають необхідність врахування світового досвіду із впровадження інноваційних технологій.

Група спеціалістів контрольно-вимірювальних приладів, контролю та автоматизації (ІСА) — це міжнародний форум обміну знаннями, методологіями та досвідом з усіх аспектів ІСА для систем водопостачання та водовідведення. ІСА прагне надати інструменти моніторингу, зв'язку, аналізу даних і контролю, необхідні для роботи з поточними та майбутніми технологічними інноваціями для водопостачання та водовідведення.

ІСА стає все більш повсюдним у водній промисловості і може забезпечити абсолютно новий рівень водопостачання з вищими можливостями, продуктивністю, стійкістю та надійністю. Кінцеві цілі ІСА полягають не тільки в тому, щоб підтримувати

працездатність галузевих активів і відповідати вимогам до продукції, наприклад, щодо якості стоків, але й робити це ефективно та результативно, збалансовуючи інвестиційні та експлуатаційні витрати, надійність, якість та турботу про навколишнє середовище в оптимальній роботі з використанням відповідної технології.

Сьогодні в галузі починається перехід до можливої цифрової трансформації, що робить роль ІСА дедалі важливішою. Зростаючий обсяг даних стає викликом для галузі, включаючи необхідність розвитку аналітики даних та інформації.

До цього додаються проблеми визначення доступної технології для вирішення проблем, з якими стикається водна промисловість, тобто підбору технології до застосування.

Незважаючи на рух до цифрової трансформації, деякі основи в галузі залишаються проблемою, наприклад базові методи встановлення та обслуговування. Для цього в галузі потрібні дослідження та розробка належної практики, а також більш ефективного використання систем ІСА для реалізації переваг.

Потрібні додаткові дослідження та розробки щодо практичних аспектів систем ІСА та того, як ці системи можуть ефективно працювати. Наприклад, спостерігається збільшення кількості сенсорних систем для візуалізації мережі збору, але наразі недостатньо відомо, як працюють ці системи.

Аналіз даних літератури щодо досліджень діоксиду хлору як дезінфектанту дозволяє сформулювати майже однакову думку провідних експертів у цій сфері, що, незважаючи на використання надсучасних методів досліджень і експоненціальний ріст публікацій, діоксид хлору є найменш вивченим реагентом.

За останні 20 років автор прийняв активну участь у написанні та виданні трьох книг з діоксиду хлору (Мокієнко А.В., Петренко Н.Ф., 2005; Мокієнко А.В., Петренко Н.Ф., Гоженко А.І., 2012; Мокієнко А. В., 2021). У поточному 2025 році автор задепонував в репозитарії Національного університету «Острозька академія» нову монографію, в якій виконано детальний аналіз фундаментальних хімічних реакцій діоксиду хлору, які є основою його біоцидної ефективності (Діоксид хлору. Том 1. Хімія. [https://eprints.oa.edu.ua/id/eprint/9664/1/Dioksyd\\_hloru\\_T.1.pdf](https://eprints.oa.edu.ua/id/eprint/9664/1/Dioksyd_hloru_T.1.pdf)).

Фрагмент монографії, присвячений утворенню і участі вільного активного хлору як вторинного окиснювача під час дезінфекції діоксидом хлору, є надважливою хіміко-біологічною парадигмою, яка свідчить про наступне: діоксид хлору головним чином відповідає за пошкодження мембрани, завдяки чому утворений вільний активний хлор як вторинний окиснювач викликає пошкодження цитоплазми.

Сформульована ідея знайшло переконливе підтвердження у наступній книзі «Діоксид хлору. Том 2. Мікробіологія».

Висловлено думку, що діоксид хлору інактивує бактеріальні клітини не шляхом лізису, а шляхом дифузії через зовнішні та цитоплазматичні мембрани, збільшуючи їхню проникність та викликаючи вивільнення життєво важливих компонентів клітин, що, по суті, призводить до їхньої інактивації.

Встановлено високий біоцидний ефект діоксиду хлору по відношенню до актуальних збудників нозокоміальних інфекцій (*P. aeruginosa*, *S. aureus* та гриби роду *Candida*) при їх циркуляції у воді із систем водопостачання лікарняних закладів (Мокієнко А.В., 2009).

Кінетика інактивації вірусів має дві фази: початкову фазу швидкої інактивації, за якою слідує фаза хвоста. Швидкість інактивації вірусів зростає зі збільшенням рН або температури, але демонструє різні тенденції зі збільшенням концентрації розчиненої органічної речовини (DOM). Пошкодження вірусних білків та 5'-некодуєчої області в

геномі сприяють інактивації вірусу після дезінфекції діоксидом хлору. Загалом, діоксид хлору спричиняє деструкцію вірусного білка капсиду та дефрагментацію РНК або ДНК.

Встановлено високу віруліцидну ефективність діоксиду хлору по відношенню до значущих вірусних контамінантів питної води (поліовірусу, аденовірусу, вірусу Коксакі, вірусу ЕСНО) та вірусу пташиного грипу (Мокієнко А.В., 2009).

Узагальнення даних літератури щодо біоцидної ефективності діоксиду хлору показало наступне. Рівні інактивації найпростіших (ооцист *Cryptosporidium parvum*, цист *Nagleria gruberi*) діоксидом хлору та озоном майже ідентичні. Показано, що головний механізм інактивації діоксидом хлору бактеріальних спор полягає у пошкодженні внутрішньої мембрани спори. Виявлено, що альгацидна дія діоксиду хлору полягає у впливі і на структури захисного покриття клітини, і на внутрішньоклітинні компоненти. Встановлено, що діоксид хлору руйнує клітинну мембрану спор грибів, що призводить до їх інактивації. Узагальнено результати досліджень впливу діоксиду хлору і хлориту (як побічного продукту) на біоплівки. Обґрунтовано необхідність забезпечення залишкової концентрації діоксиду хлору у питній воді з водорозподільних мереж.

#### **Висновок.**

Наведені приклади (цифрова трансформація та діоксид хлору) ілюструють глибоке переконання автора, висловлене у курсі лекцій «Актуальні водні проблеми. Інноваційні водні технології» ([https://eprints.oa.edu.ua/id/eprint/9666/1/Vodni\\_Tehnologii\\_lekcii.pdf](https://eprints.oa.edu.ua/id/eprint/9666/1/Vodni_Tehnologii_lekcii.pdf)) у необхідності уже зараз акцентувати увагу на перспективі відновлення водопровідно-каналізаційної галузі після закінчення війни. Європейський вектор розвитку країни передбачає докорінні зміни всієї інфраструктури, у тому числі, а точніше, у першу чергу, водної. Із безумовним врахуванням, по-перше, існуючого світового досвіду, який дуже швидко оновлюється; по-друге, накопичення додаткових природних та техногенних ризиків.

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ КАЛЬЦІЮ ГІДРОКСИДУ З АЛЮМІНІЮ СУЛЬФАТОМ ДЛЯ ОТРИМАННЯ АЛЮМІНІЄВИХ КОАГУЛЯНТІВ У КАВІТАЦІЙНИХ ПОЛЯХ**

**Мороз О.М., Знак З.О., Мних Р.В.**

*Національний університет «Львівська політехніка», Україна, м. Львів  
oleksandr.m.moroz@lpnu.ua*

У технологіях очищення поверхневих і стічних вод, що містять частинки різного ступеня дисперсності традиційно використовують залізні та алюмінієві коагулянти. Серед них більшою коагуляційною здатністю характеризуються гідроксосолі. Попередніми дослідженнями показано, що їх отримання можливо у разі контрольованого додавання до розчинів солей алюмінію чи заліза суспензії кальцію гідроксиду або навпаки. При цьому утворені гідроксосолі відіграють роль коагулянтів, а непрореаговані частинки кальцію гідроксиду – центрів коагуляції та реагентів, здатних взаємодіяти з деякими поллютантами, які присутні у стічних водах, наприклад, солями жирних кислот. Однак, враховуючи дуже низьку розчинність кальцію гідроксиду (близько 1,5 г/дм<sup>3</sup>), ступінь використання цього реагенту низький за низької швидкості відповідного гетерогенного процесу.

На підставі нашого попереднього досвіду запропоновано взаємодію між солями алюмінію та заліза із суспензією кальцію гідроксиду проводити під дією ультразвукового випромінювання, що спричиняє явище кавітації.

Дослідження проводили шляхом дозування суспензії  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  до розчину солей алюмінію за постійного перемішування та збудження ультразвукових (УЗ) випромінювань, яке спричиняло виникнення області кавітації. Виникнення явища кавітації підтверджується підвищенням температури середовища в адіабатичних умовах та розсіюванням монохроматичного лазерного випромінювання під концентратором УЗ-випромінювання. Кожну наступну порцію суспензії кальцію гідроксиду додавали після досягнення сталого значення рН середовища. При цьому фіксували як об'єм доданої суспензії, так і час впродовж якого досягалось стале значення рН розчину.

Зразу після додавання кожної порції (об'єм залежав від початкової концентрації солі алюмінію) за постійного механічного перемішування рН середовища закономірно дещо зростає аж до досягнення точок еквівалентності. При цьому об'єм доданої суспензії через низьку розчинність  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  та незначну реакційна здатність поверхневих ОН-груп більший, ніж у разі здійснення процесу під дією УЗ-випромінювання (у кавітаційних полях) (рисунок). Це зумовлено низькою причиною: збільшенням швидкості дифузії реагентів,

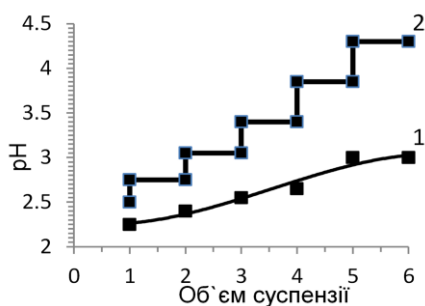


Рис. Залежність рН від об'єму  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ : 1- за перемішування; 2 – під дією УЗ

$\text{Ca}(\text{OH})_2$  забезпечує рівномірніше підведення йонів  $\text{OH}^-$  до йонів  $\text{Al}^{3+}$ , внаслідок чого формуються стабільні гідроксосолі. Своєю чергою локальне підвищення температури пришвидшує гідроліз  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  і сприяє гідролітичному утворенню  $\text{Al}-\text{OH}-\text{SO}_4$  містків. Як наслідок – ефективність утворення алюмінієвих коагулянтів зростає.

диспергуванням частинок  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  під дією кавітації, пришвидшенням хімічних реакцій внаслідок локального збільшення температури завдяки колапсу кавітаційних бульбашок, блокує поверхню частинок  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  і гальмує процеси розчинення і хімічної взаємодії із солями. Отже, повнота використання  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  у кавітаційних полях збільшується. При цьому седиментаційна стійкість непрореагованого  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  зростає.

Інтенсивне локальне перемішування при кавітації забезпечує швидку зміну рН у мікрооб'ємах, що сприяє переходу  $\text{Al}^{3+} \rightarrow \text{Al}(\text{OH})^{2+} \rightarrow \text{Al}(\text{OH})_2^+$  і далі до полігідроксокомплексів. Диспергування частинок

## ІНТЕГРАЦІЯ КОАГУЛЯЦІЇ ТА АЕРОБНОЇ СТАБІЛІЗАЦІЇ ОСАДІВ СТІЧНИХ ВОД ДЛЯ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ЇХ ЗНЕВОДНЕННЯ

*Мосійчук А.Б. \*, Мосійчук Я.Б.*

*Інститут водних проблем і меліорації НААН, м. Київ, Україна,*

*\*[andrew.mosiichuk@gmail.com](mailto:andrew.mosiichuk@gmail.com)*

**Актуальність дослідження.** На більшості діючих очисних споруд України технологічні схеми очищення стічних вод і обробки осадів залишаються морально та фізично застарілими. Процеси ущільнення, стабілізації та зневоднення реалізуються за класичними схемами, що не враховують сучасних науково-технічних досягнень і вимог до

енергоєфективності. Як наслідок, зневоднений осад часто характеризується високим вмістом вологи (96–99 %), що ускладнює його транспортування, зберігання та подальшу утилізацію. Відсутність ефективного попереднього етапу обробки осаду призводить до зниження продуктивності споруд, а недостатня стабілізація зумовлює вторинне виділення запахів, розвиток гнильних процесів і збільшення обсягів відходів, що потребують подальшої обробки.

Для вирішення цих проблем у міжнародній практиці активно впроваджуються технології аеробної та анаеробної стабілізації. Аеробна стабілізація полягає в окисненні органічної частини мулу за участю аеробних мікроорганізмів, унаслідок чого зменшується його об'єм і запах, а також поліпшуються санітарно-гігієнічні властивості. Анаеробна стабілізація ґрунтується на біохімічному розкладанні органічних речовин мікроорганізмами, що функціонують без доступу кисню. Під час процесу послідовно відбуваються ферментація, ацетогенез і метаногенез, у результаті чого органічна речовина трансформується в метан, діоксид вуглецю та стабілізований осад із меншим вмістом біорозкладних сполук. Хоча така технологія дозволяє одержувати біогаз, вона вимагає значних капітальних витрат і складного технічного обслуговування.

В Україні переважає використання мулових майданчиків, які забезпечують природне зневоднення осаду, але вимагають великих площ, тривалого часу обробки та не гарантують стабільного санітарного стану.

Механічні методи (центрифуги, фільтр-преси) ефективні, але енергоємні та дорогі в експлуатації.

Світовий досвід свідчить, що перспективним напрямом є комбінування біологічних і фізико-хімічних процесів, зокрема коагуляції та гравітаційного ущільнення з подальшою стабілізацією у мінералізаторах. Такі рішення поєднують технологічну простоту, енергоощадність і можливість адаптації до існуючих споруд. За цих умов набуває актуальності створення маловитратної, ресурсоефективної технологічної схеми, яка дозволяє покращити властивості осаду, зменшити його вологість і стабілізувати органічну частину без значних капітальних витрат.

**Результати дослідження та їх обговорення.** Проблематика обробки осадів стічних вод залишається однією з найскладніших у сучасних системах водовідведення України. На більшості споруд відсутні рішення, що дають змогу ефективно зменшувати об'єм і стабілізувати склад осаду до стану, придатного для подальшої утилізації. Накопичення надлишкового мулу спричиняє перевантаження систем, погіршення санітарного стану територій та підвищення експлуатаційних витрат.

Особливо гостро це проявляється за умов обмеженого фінансування. Значна частина очисних споруд була спроектована за технологічними принципами 1970–1990-х років, коли енергетичні витрати не мали вирішального значення, а питання поводження з осадами не розглядалося як окремий елемент екологічної безпеки. Сьогодні, за змінених кліматичних умов та підвищених вимог до екологічних показників, такі підходи є застарілими. Тому важливо розробляти рішення, що ґрунтуються на максимально можливому використанні існуючих споруд та процесів з мінімальним залученням додаткових ресурсів.

В умовах обмежених можливостей для повної реконструкції очисних споруд перспективним напрямом є удосконалення технологічних схем шляхом інтеграції процесів, які вже відбуваються в системі очищення. Одним із таких напрямів є поєднання процесів коагуляції та стабілізації осадів у межах існуючих мінералізаторів. Запропонований підхід базується на використанні існуючих аеробних мінералізаторів як ключового елементу комбінованої технологічної схеми, де процеси коагуляції частинок мулу, їх седиментації та біологічної стабілізації відбуваються послідовно й взаємопов'язано. Даний підхід дозволяє

оптимізувати час перебування осаду в системі, покращити процеси природного ущільнення та зменшити потребу в енергетичних витратах на подальше механічне зневоднення.

У межах схеми передбачається введення алюмовмісного реагенту у потік осаду перед надходженням до аеробного мінералізатора. Це сприяє агрегації дрібнодисперсних частинок у стійкі агрегати, які швидше осідають, утворюючи щільний шар. У мінералізаторі відбувається подальше ущільнення та часткова біологічна стабілізація осаду під дією аеробних процесів. Поєднання фізико-хімічної коагуляції з природними процесами мінералізації забезпечить формування стійкої структури осаду, зменшення його об'єму та підвищення ступеня зневоднення перед подальшою механічною або природною сушкою, що скорочує тривалість подальшого природного або механічного зневоднення. Таке технологічне рішення не потребує встановлення додаткових ємностей - достатньо дозувальної системи реагенту та контролю параметрів процесу. Це дає змогу впровадити схему на діючих спорудах із мінімальною реконструкцією.

Наукове обґрунтування цього підходу базується на закономірностях взаємодії фізико-хімічних та біохімічних процесів у системах очищення. Поєднання коагуляції і стабілізаційних процесів у єдиному технологічному циклі може забезпечити формування мулових агрегатів зі збільшеним розміром і міцнішою структурою, що позитивно впливає на швидкість седиментації та зневоднення. Крім того, підтримання аеробного середовища у мінералізаторі дає змогу уникнути утворення запахів і зменшує ймовірність розвитку анаеробних процесів, які ускладнюють подальшу переробку осаду.

У ролі коагулянту може застосовуватися хлорид алюмінію або полімерні композиції, вибір яких визначається характеристиками осаду, рН середовища та економічними чинниками. Контактна зона повинна забезпечувати рівномірне змішування реагенту з потоком для формування стабільних агрегатів.

Аеробний мінералізатор виконує подвійну функцію: як гравітаційний ущільнювач і як біологічний реактор, у якому відбувається часткова стабілізація органічних речовин під дією аеробних мікроорганізмів. Гравітаційне ущільнення при надходженні попередньо коагульованого осаду працює ефективніше за рахунок зменшення питомого об'єму осаду й покращення його структурно-механічних властивостей.

Важливою перевагою технології є її адаптивність: у літній період можна посилити аерацію для інтенсифікації мінералізації, а в зимовий - збільшити дозу коагулянту, компенсуючи зниження температури та біохімічної активності мулу.

Додатковим позитивним ефектом є зменшення запахових викидів і стабілізація санітарно-гігієнічних характеристик осаду. Завдяки аеробним умовам та інтенсифікації біоокиснення знижується частка летких органічних сполук, а вміст стабільного мінерального залишку зростає. Це дозволяє розглянути можливість подальшого використання осаду.

Разом з тим застосування алюмовмісних реагентів має низку важливих обмежень, які необхідно врахувати при проектуванні та експлуатації. По-перше, введення солей алюмінію може призводити до підвищеного вмісту розчинного і колоїдного алюмінію у вихідному осаді та фільтраті. Це має значення при подальшому використанні осаду (питома токсичність для рослин у кислих ґрунтах, фіксація фосфору) і вимагає оцінки допустимих залишків алюмінію відповідно до регіональних нормативів. По-друге, залишкові солі алюмінію можуть змінювати рН і впливати на мікробні процеси: висока доза може пригнічувати біологічну активність у мінералізаторі або в анаеробних післяпроцесах, тому потрібна ретельна оптимізація дозування. Слід також враховувати питання корозії устаткування та безпеки зберігання реагентів.

Практична реалізація передбачає етапи лабораторного та пілотного тестування з визначенням ефективності різних коагулянтів і режимів аерації. Після лабораторної

оптимізації слідує тест із подачею осаду в діючий мінералізатор або в пілотну модель гравітаційного ущільнювача, де оцінюють зміну якісних і кількісних показників, у тому числі швидкість ущільнення і технологічні аспекти подальшого механічного зневоднення.

Інженерні рішення для впровадження включають точку введення реагенту на вході у мінералізатор, використання механізму змішування для забезпечення стабільного контакту реагент-осад та контроль часу контакту (від хвилин до кількох годин залежно від вибраної схеми), оптимізацію подачі повітря та встановлення системи контролю параметрів процесу без масштабних будівельних робіт. Це робить схему перспективною для впровадження в малих і середніх населених пунктах, де техніко-економічні можливості є обмеженими, але потреба в покращенні стану очисних споруд - надзвичайно гостра.

Очікуваним результатом реалізації такої схеми є підвищення ефективності зневоднення на 10–20% порівняно з традиційними схемами без залучення додаткового реагентного чи механічного обладнання. Додатково передбачається зменшення обсягів вторинного мулу, оптимізація навантаження на споруди механічного зневоднення, а також зниження питомих енерговитрат системи.

**Висновки.** Запропонована інтегрована технологічна схема, що поєднує коагуляцію та аеробну стабілізацію в мінералізаторах, є перспективним напрямом удосконалення систем очищення стічних вод. Вона дозволяє підвищити ефективність зневоднення, знизити енерговитрати та забезпечити екологічно безпечну утилізацію осадів.

Отримані результати створюють передумови до подальшого моделювання процесів зневоднення та визначення кінетичних закономірностей при різних дозах реагентів і режимах аерації з метою підтвердження технологічної ефективності в умовах реальних очисних споруд.

## ВОДОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ: СУЧАСНИЙ ЕТАП ТА ОЧЕВИДНІ ПЕРСПЕКТИВИ

*<sup>1</sup>Нижник Т. Ю., <sup>2</sup>Стрікаленко Т. В.*

*<sup>1</sup>НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського», Україна, м. Київ,  
e-mail: taren8@gmail.com*

*<sup>2</sup>Одеський національний технологічний університет, Україна, м. Одеса,  
e-mail: alpha.water.55@gmail.com*

Серед проблем водозабезпечення жителів України, що потребують розгляду на сучасному етапі розвитку нашої країни, зазвичай розглядають традиційні - неоптимальна водозабезпеченість території країни, застаріле обладнання на станціях очищення води, значна кількість забруднених і пошкоджених водопровідних станцій та мереж водопостачання, досягнення у впровадженні, на цьому фоні, новітніх технологій оброблення природних вод. Не сумніваючись у їхній важливості, вважаємо, що не менш актуальними мають бути також питання, які виникають вже сьогодні та постануть перед виробниками питної води і населенням завтра. До таких питань відносимо (1) зміни клімату, що потребують впровадження технологій водопідготовки в умовах високих температур навколишнього середовища, (2) удосконалення водопідготовки в екстремальних умовах для забезпечення водою питної якості військових і населення, у тому числі в зонах бойових дій, (3) регламентацію повторного використання очищених стічних вод на підприємствах, а також (4) відновлення лабораторної бази підприємств, які забезпечують населення водою

питної якості, та обґрунтування переліку реально контрольованих показників безпечності питної води.

Метою роботи був аналіз результатів пошукових лабораторних і натурних досліджень, що виконувались за участі авторів та дозволяють обґрунтувати пропозиції до рішення частини вище викладених задач.

Одним із шляхів вирішення задачі необхідного і достатнього знезараження води в умовах спекотного клімату може бути використання реагентів неокислювальної дії, які стабільні у воді за високих температур і не леткі. Отримані в умовах спекотного клімату (Республіка Гана) результати натурних досліджень засвідчили ефективність використання біоцидного реагенту комплексної дії «Акватон-10» для очищення води з природних джерел водопостачання та отримання води питної якості. Вода, що була очищена по запропонованим нами схемам, відповідала за фізико-хімічними та мікробіологічними показниками якості вимогам ВООЗ, була безпечною для вживання людиною (за результатами токсикологічних досліджень, виконаних там же) та зберігала свої показники якості у водопровідній мережі, в точках відбору води у споживачів. Враховуючи, що середньодобова температура у липні 2025 р у містах Одесі, Херсоні, Миколаєві становила  $+26\text{ }^\circ\text{C}$ /, отримані дані мають бути використані при обґрунтуванні технологій оброблення води в умовах кліматичних змін, які вже відчуваються в нашій країні.

Для забезпечення водою питної якості населення в екстремальних умовах, у тому числі військових в зонах бойових дій, за участі авторів розроблені та відпрацьовані на практиці алгоритми застосування біоцидного полімерного реагенту «Акватон-10» для мобільного госпіталю МНС у Індії (після землетрусу 2001 р), для ліквідації наслідків паводків у Львівській, Івано-Франківській, Закарпатській, Тернопільській та Чернівецькій областях (2008 р), для портативного водоочисного (переносного) пристрою у військових частинах в зонах бойових дій та для індивідуального використання в дозованих пакетиках – стіках, розрахованих на певну кількість води – 5 л (з 2014 р до цього часу).

За механізмом дії реагент «Акватон-10», окрім біоцидної активності, має флокулюючі властивості. Хімічна структура його полімерних макромолекул - наявність позитивно заряджених гуанідинових груп, що чергуються з гексаметиленовими, - обумовлює також властивості комплексоутворювача та значної поверхневої активності, а тому здатність реагенту до видалення з води йонів важких металів, гумінових та фульво-сполук, органічних речовин, пестицидів, гербіцидів тощо. Такі особливості полімерного реагенту з неокислювальним механізмом дії свідчать про актуальність його використання при надзвичайних ситуаціях, забрудненні джерел водопостачання великою кількістю хімічних та мікробіологічних поллютантів. Одночасно, вище названі особливості реагенту, розробленого на основі полімерної біоцидної сполуки – полігексаметиленгуанідину гідрохлориду (ПГМГ-гх), можуть бути використані, як свідчать матеріали наших пошукових досліджень, для оброблення стічних вод підприємств з можливістю їх повторного використання у технологічному процесі.

Для проведення експрес-аналізу концентрації діючої речовини реагенту «Акватон-10» в обробленій воді (на підприємстві, в польових умовах) розроблений та випускається тест-набір (згідно ТУ, розроблених НТЦ «Укрводбезпека», м. Київ), використання якого не потребує додаткового лабораторного обладнання.

Висновки. Сформульовано задачі оптимізації водозабезпечення населення країни з урахуванням перспективних напрямків, обумовлених умовами сучасності, та запропоновано варіант комплексного їх рішення.

## СУЧАСНІ ПІДХОДИ ТА НАРЯМИ РОЗВИТКУ ВИРОБНИЦТВА ЕТАНОЛУ З РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ

Саблій Л.А.<sup>1</sup>, Ободович О.М.<sup>2</sup>, Сидоренко В.В.<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна, м. Київ, e-mail: [larisasabliy@ukr.net](mailto:larisasabliy@ukr.net)

<sup>2</sup> Інститут технічної теплофізики НАН України, Україна, м. Київ, e-mail: [tdsittf@ukr.net](mailto:tdsittf@ukr.net)

Виробництво біоетанолу з лігноцелюлозовмісної сировини в порівнянні з традиційною крохмалевмісною сировиною має як низку переваг, так і низку недоліків. Основним недоліком цього виробництва є висока собівартість біоетанолу, яка обумовлена, в першу чергу, особливостями технології конверсії целюлози в цукри, що зброджуються [1].

Одним з етапів комплексної обробки рослинної сировини є процес попередньої підготовки лігноцелюлозовмісної сировини до гідролізу шляхом відділення лігніну та геміцелюлоз від лігноцелюлозного комплексу сульфідною, сульфатною або органосольвентною варкою з подальшим отриманням з нього цінних хімічних продуктів або палива [2].

**Метою досліджень** є оцінка можливості використання нової технології та обладнання для інтенсифікації процесу попередньої підготовки рослинної сировини до гідролізу в технології отримання паливного етанолу.

**Результати** Запропоновано апаратурно-технологічну схему стадії попередньої підготовки до гідролізу, в якій в якості реактора використовується роторно-пульсаційний апарат (РПА). Обладнання складається з двох основних модулів: модуля попередньої підготовки та модуля розділення і нейтралізації.

**Висновки** Серед переваг запропонованої дослідно-промислової установки завдяки використанню РПА немає необхідності в приймальній ємності (реакторі) створювати високий тиск і температуру, що дозволяє спростити і полегшити її конструкцію (економія витрат на матеріали) і використовувати її як приймальну ємність так і як реактор для гідролізу целюлозовмісної сировини, а також виключити додаткову ємність; завдяки використанню роторно-пульсаційного апарата немає необхідності нагрівання всього об'єму суміші до високої температури (>100 °C) у зв'язку з чим відбувається велика економія витрат енергії; використання роторно-пульсаційного апарата на відміну від більшості техпроцесів, що використовуються на гідролізних підприємствах, дає можливість більш рівномірного перемішування лігноцелюлозовмісної сировини з розчином і виключити мішалки з редукторами для перемішування, що здешевлює вартість витрат при виробництві біоетанолу.

### Література

1. Broda M., Yelle D.J., Serwańska K. Bioethanol Production from Lignocellulosic Biomass—Challenges and Solutions. *Molecules*. 2022. 27. 8717. <https://doi.org/10.3390/molecules27248717>
2. Rasaq S. Abolore, Swarna Jaiswal, Amit K. Jaiswal Green and sustainable pretreatment methods for cellulose extraction from lignocellulosic biomass and its applications: A review. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*. 2024. Vol. 7. 100396. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2023.100396>

## ПРОБЛЕМИ ОЧИЩЕННЯ СТИЧНИХ ВОД І ШЛЯХИ ЇХ ВИРІШЕННЯ

Саблій Л.А.

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна, Київ, larisasabliy@ukr.net*

Колектив науковців кафедри біоенергетики, біоінформатики та екобіотехнології за останні роки виконав наукові дослідження з очищення стічних вод, відповідно до наукових проєктів у співпраці з Інститутом прикладних наук Хоф (Німеччина), договорів з ТОВ «ФІБЕРІКА», продовжує спільні розробки з Інститутом технічної теплофізики НАН України, з шкіряним заводом ТзОВ «Світ шкіри» (м. Болехів, Івано-Франківська область), з проєктною організацією ТОВ «ОСТВА» (м. Рівне).

В Україні існують значні проблеми очищення стічних вод міст, сіл, промислових підприємств, об'єктів сезонної роботи тощо. Багато очисних станцій застарілі, неефективні або взагалі відсутні, що залишає приблизно 20 мільйонів людей без доступу до централізованих послуг з очищення стічних вод. Згідно із статистикою, лише 50 відсотків населення України має доступ до централізованих послуг зі збору та очищення стічних вод, тоді як у сільській місцевості цей показник значно нижчий. Більшість промислових підприємств не мають локальних очисних споруд або у них є лише споруди механічного очищення й усереднення стічних вод та скидають сильно забруднені виробничі стічні води на міські очисні станції, ускладнюючи їх роботу. Курорти, бази відпочинку, санаторії та інші об'єкти сезонної роботи характеризуються значними коливаннями витрат та концентрацій забруднюючих речовин в стічних водах протягом року, що ускладнює використання традиційних технологій біологічного очищення в аеротенках у зв'язку з труднощами управління їх роботою. Погано очищені або неочищені стічні води становлять серйозну загрозу для здоров'я населення та довкілля, призводять до забруднення поверхневих та ґрунтових вод, особливо в густонаселених та промислово розвинених регіонах.

Військові дії ще більше загострили описані проблеми, зокрема, руйнувань та пошкоджень зазнали інфраструктури систем водовідведення та очисні станції стічних вод в багатьох регіонах. Понад 230 очисних споруд для стічних вод були пошкоджені або зруйновані, що значно знижує здатність України ефективно очищати стічні води. Більшість діючих систем збору та транспортування стічних вод в Україні побудовано понад 50 років тому, і вони занадто потужні для сучасних демографічних та економічних реалій. Ця невідповідність потужності призвела до зниження ефективності, частих збоїв у мережі та неадекватної роботи очисних станцій. У невеликих містах руйнування очисних споруд залишило багато громад повністю залежними від тимчасових або імпровізованих рішень, що створило нагальну потребу в реконструкції систем водовідведення та очищення стічних вод. Міська влада стикається з такими проблемами, як обмежені фінансові ресурси, брак технічної експертизи та географічні обмеження, що роблять масштабні інфраструктурні проєкти неможливими.

Проблемою також є суворий зимовий клімат в Україні, що перешкоджає ефективності традиційних біологічних методів очищення (зокрема, з активним мулом), що важко функціонують в холодних умовах. Це призводить до неповного очищення та збільшення ризиків для довкілля та здоров'я населення.

Враховуючи ці проблеми, в Україні потрібні інноваційні, економічно ефективні та стійкі до клімату рішення для очищення стічних вод — системи, які можуть ефективно працювати за високих концентрацій забруднень, мінусових температур, ефективно очищати виробничі стічні води промислових підприємств, вимагають мінімальних затрат та можуть бути швидко впроваджені на об'єктах із змінним навантаженням стічних вод.

Дослідження, що проводяться нами, спрямовані на одержання перспективних, ефективних та економічних рішень щодо очищення стічних вод міст, сіл, промислових підприємств, об'єктів сезонної роботи тощо для подолання вищеперерахованих проблем. Враховуючи зобов'язання України щодо інтеграції з ЄС та відновлення довкілля, доцільність отриманих рішень для очищення стічних вод перевіряється на відповідність екологічним стандартам України та ЄС.

Напрямки наших досліджень:

- удосконалення технології біологічного очищення міських і промислових стічних вод від сполук азоту та фосфору з використанням активного мулу та процесів нітрифікації, денітрифікації;

- розробка технологій локального очищення промислових стічних вод;

- розробка технологій біологічного очищення стічних вод з використанням носіїв з іммобілізованими мікроорганізмами [1];

- використання вищих водних рослин для очищення стічних вод від азоту, фосфору, йонів металів та інших забруднюючих речовин [2].

Одним із напрямків є розробка та впровадження технологій локального очищення стічних вод промислових підприємств ряду галузей:

- легкої (шкіряних заводів, хутряних фабрик, шерстяних фабрик тощо);

- деревообробної (картонно-паперових фабрик [3]);

- харчової (м'ясопереробних заводів, молокозаводів, олійних, солодових заводів тощо);

- фармацевтичної (виробництво антибіотиків, різних фармпрепаратів тощо) та ін.

Вище вказані промислові стічні води відрізняються високими концентраціями органічних речовин за БСК і ХСК, завислих речовин різної природи та ступеня дисперсності, містять токсичні та інгібуючі домішки (іони важких металів – шкірзаводи, барвники – шерстяні фабрики, антибіотики – фармзаводи та ін.), синтетичні поверхнево-активні речовини, жири та ін. забруднення, чимала кількість яких важко розкладається біологічно і потребує видалення перед біологічною стадією на спорудах локального очищення.

Нами розроблено технології локального очищення з отриманням очищеної води, яка за концентраціями забруднень відповідає нормам скиду в міську систему водовідведення і може в подальшому проходити спільне очищення з міськими стічними водами на очисних спорудах міста.

Розроблені технології локального очищення стічних вод впроваджено в проекти очисних станцій та розпочато їх будівництво (низка промислових підприємств міста Харкова: фармзавод, олійний завод, м'ясопереробний завод, машинобудівний завод, шерстяна фабрика).

Так, було розроблено технологію локального очищення стічних вод підприємства по виробництву антибіотиків. Технологія включає усереднення стічних вод, коагулювання сульфатом заліза з підлужуванням, відстоювання, окиснення органічних забруднюючих речовин, в тому числі антибіотика, пероксидом водню та фільтрування. Профільтровану воду можна відводити в систему водовідведення міста для подальшого спільного очищення. Ступінь видалення антибіотика – цефуроксиму, досягає 94-96%. Для доочищення стічної води від залишків антибіотика можна використовувати вищі водні рослини, зокрема, ряскові [4].

Для локального очищення стічних вод м'ясопереробного заводу було розроблено технологію фізико-хімічного очищення з відведенням очищеної води в систему водовідведення міста Харкова [5] та комплексну технологію фізико-хімічного та двоступеневого біологічного очищення стічних вод, впроваджену на м'ясопереробному

підприємстві в Рівненській області. В останній стічні води проходять повне очищення зі скидом очищеної води в річку Горинь. Технологія включає реагентну напірну флотацію на попередній стадії, двоступеневе аеробне біологічне очищення в аеротенках та знезараження. Використання технології дозволило очистити стічну воду від високих концентрацій органічних речовин, зависі, сполук азоту та фосфору до допустимих значень для скиду в річку. Ступінь очищення за органічними речовинами досягає 99%.

Другий напрямок досліджень пов'язаний з глибоким видаленням із стічних вод сполук азоту та фосфору. Прикладом розробки є надзвичайно ефективна технологія біологічного очищення стічних вод шкіряного заводу з глибоким видаленням сполук азоту [6], що було впроваджено на шкіряному заводі в місті Болехів Івано-Франківської області. Технологія включає (після попереднього механічного та фізико-хімічного очищення) біологічну стадію із зонами – анаеробною та аеробною, з рециркуляцією нітратного потоку з кінця аеробної зони в анаеробну для здійснення в останній процесу денітрифікації. Це дозволило значно знизити концентрацію амонійного азоту - з 200 мг/дм<sup>3</sup> на вході в анаеробну зону до 1,5 мг/дм<sup>3</sup> на виході з аеротенка при нормі скиду в річку - 2 мг/дм<sup>3</sup>.

Наступний напрямок досліджень пов'язаний з використанням для біологічного процесу іммобілізованих на синтетичних носіях мікроорганізмів. Мета досліджень – підвищити ефективність очищення стічних вод в аеротенках, анаеробних та інших біореакторах за рахунок збільшення біомаси мікроорганізмів в одиниці об'єму споруди, а отже, збільшити швидкість біохімічних процесів деструкції органічних речовин, вихід біогазу в анаеробних умовах, зменшити капітальні та експлуатаційні витрати на очищення. Досліджували різні типи носіїв: пластмасові носії – блочні, дисперсні, волокнисті капронові носії, біоплівку на носіях, представників мікроорганізмів [1]. Як показали результати, найкращим носієм є волокнистий з площею поверхні 4000 м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>. Проте недоліком його є складність індустріального виготовлення елементів носія, очистки поверхні тощо. Ці недоліки усуваються при використанні пластмасових носіїв.

Останнім часом все більше уваги приділяється в Україні і світі об'єктам сезонної роботи, до яких належать курорти, санаторії, бази відпочинку та ін., водовідведення і очищення стічних вод яких відрізняється від міст та підприємств. В цьому напрямку були проведені дослідження для Шацького національного природного парку Волинської області і розроблені технології очищення стічних вод. Стічні води від таких об'єктів містять значні концентрації сполук азоту (амонійний - до 40 мг/дм<sup>3</sup>) та фосфору (фосфати - до 17 мг/дм<sup>3</sup>), характеризуються сезонною нерівномірністю з невеликим припливом стічних вод в осінньо-весняний період та значним припливом – в літній.

Для очищення стічних вод запропоновано дві (паралельні) лінії очисних споруд, одна для населеного пункту з постійним надходженням стічних вод, а друга – для курорту, санаторіїв тощо. Біологічне очищення відбувається в аноксидній зоні – в денітрифікаторі, та аеробній зоні – нітрифікаторі, обидві зони устатковано носіями з іммобілізованими мікроорганізмами. Таке рішення дозволяє здійснити зупинку споруди біологічного очищення другої лінії на період осінь-зима-літо (за відсутності відпочиваючих). Носії з іммобілізованими мікроорганізмами у висушеному стані можна зберігати 9-10 місяців з подальшим відновленням активності мікроорганізмів в період запуску очисних споруд в роботу. Технологію впроваджено на очисних станціях в смт Шацьк та Світязь, очисні споруди збудовано та проведено їх налагодження, випробовування й запуск в експлуатацію з виведенням у робочий режим. Висока ступінь очищення стічних вод від забруднюючих речовин забезпечує їх видалення до нормативних вимог скиду в озеро Плотицьке.

Отже, розроблені технології показали після їх впровадження високу ефективність очищення стічних вод різного складу і концентрацій забруднюючих речовин як для локального очищення, так і в системах повного очищення стічних вод до вимог природних

водойм. Технологія з використанням іммобілізованих мікроорганізмів дає можливість значно збільшити концентрацію біомаси в одиниці об'єму очисної споруди, збільшити деструктивну потужність споруди, зменшити капітальні та експлуатаційні витрати на процес, особливо в умовах з недостатньою швидкістю росту біомаси мікроорганізмів (наприклад, в нітрифікаторі для нарощування автотрофних мікроорганізмів-нітрифікаторів) та показує перспективність її використання для очищення стічних вод з нерівномірним надходженням для об'єктів сезонної роботи.

#### Література

1. Sablii L., Zhukova V., Kozar M., Hrynevych A., Jaromin-Gleń K. Comparison of biofilm characteristics of different types of carriers for wastewater treatment / **Environmental Problems**. Lviv: Lviv Polytechnic National University, Vol. 10, No. 1, 2025. – P. 20-25. <https://doi.org/10.23939/ep2025.01.020>
2. Sablii L., Zhukova V., and Drewnowski J. (2024) The Strategies of Nutrient Removal Compounds from Wastewater by Using Higher Aquatic Plants in the Green Deal Implementation, Desalination and Water Treatment, 100954, ISSN 1944-3986 <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100954>
3. Sablii L., Obodovych O., Sydorenko V. Efficiency of physical-chemical treatment of wastewater of the paper and cardboard factory / Journal of the Serbian Chemical Society, Belgrade, 2025. - V. 90, Issue 2. - P. 247-255. DOI: <https://doi.org/10.2298/JSC231206014S> ISSN - 2683-3867
4. Sablii L.A., Kika L.S. Efficiency of wastewater treatment from chloramphenicol using *Lemna minor*/Biotechnologia acta. Т. 17, № 5, 2024. - P. 45-52. <https://doi.org/10.15407/biotech17.05.045>
5. Sabliy L., Zhukova V. Improvement of the technology of local wastewater treatment of the meat plants / Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування: колективна монографія / за ред. проф. Мальованого М.С. - Київ, Яроченко Я.В., 2022, 566 с. – С. 400 -410. ISBN 978-617-7826-23-0 (Online).
6. Sabliy L., Zhukova V., Kika L. Effective biological treatment of tannery wastewater from nitrogen compounds / ICAMS Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference on Advanced Materials and Systems, (26<sup>th</sup>-28<sup>th</sup> October, 2022, Bucharest, Romania, Leather and Footwear Research Institute) – Bucharest 2022. - P. 213-218. ISSN: 2068-0783.

## ТЕХНОЛОГІЯ ЗНЕЗАЛІЗНЕННЯ ПІДЗЕМНИХ ВОД ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ РОТОРНО-ПУЛЬСАЦІЙНОГО АПАРАТА

Саблій Л.А.<sup>1</sup>, Ободович О.М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна, м. Київ, e-mail: [larisasabliy@ukr.net](mailto:larisasabliy@ukr.net)

<sup>2</sup> Інститут технічної теплофізики НАН України, Україна, м. Київ, e-mail: [tdsittf@ukr.net](mailto:tdsittf@ukr.net)

На більшості харчових підприємств для технологічного водопостачання використовують підземні води. Якість підземних вод в природних умовах по ряду показників не відповідає нормативним вимогам. Основною домішкою, яка впливає на якість підземних вод, являється залізо, збагачення яким проходить внаслідок вилужування залізовмісних порід [1].

Йони заліза характеризуються полівалентністю і можуть знаходитися в різних формах  $Fe^{2+}$  і  $Fe^{3+}$ . В підземних водах йони заліза переважно знаходяться у вигляді  $Fe^{2+}$ , концентрація якого може сягати 15 г/л із-за великого вмісту вільного діоксиду вуглецю і відсутності окислювачів [2]. Сполуки заліза трьохвалентного мають меншу розчинність, ніж сполуки заліза  $Fe^{2+}$ , тому в технології водопідготовки залізозмісних підземних вод процес окислення є визначальним. Для підвищення ефективності процесу окислення використовують перемішування. В технологіях водопідготовки для більш ефективного перемішування використовують різного типу контактні пристрої чи ежектори.

Нами були досліджені механізми дії дискретно - імпульсного введення енергії (ДІВЕ) на ефективність масопереносу в процесі насичення води киснем повітря. Для цього використовували установку, основним робочим органом якої є роторно - пульсаційний апарат. Повітря надходить в апарат самовсмоктуванням за рахунок ефекту Вентурі.

Досліджено, що обробка води методом ДІВЕ частотою 2 - 5 кГц забезпечує енергію активації процесу аерації 56,1 кДж/моль, що забезпечує зменшення вмісту йонів  $Fe^{2+}$  із 2,5 мг/л до 0,02 мг/л, що значно нижче технологічних вимог.

Таким чином, керуючи механізмами ДІВЕ, можна збільшувати швидкість масопереносу і, таким чином, інтенсифікувати процес зенезалізнення води.

Розроблена технологія випробувана в умовах Червонослобідського спиртзаводу. Результати випробувань підтвердили лабораторні дослідження і показали ефективність метода ДІВЕ для інтенсифікації процесу.

#### Література

1. Md Anik Hossain, Md Inzamal Haque, Most Atia Parvin, Md Nazrul Islam Evaluation of iron contamination in groundwater with its associated health risk and potentially suitable depth analysis in Kushtia Sadar Upazila of Bangladesh, *Groundwater for Sustainable Development*. 2023. 21. 100946. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2023.100946>
2. Vasudevan S., Lakshmi J., Sozhan G. Studies on the Removal of Iron from Drinking Water by Electrocoagulation - A Clean Process. 2009. *CLEAN - Soil, Air, Water*. 37(1). 45-51. <https://doi.org/10.1002/clen.200800175>

### **ШЛЯХИ ВИКОРИСТАННЯ ШКАРАЛУПИ ВОЛОСЬКОГО ГОРІХА ДЛЯ СТВОРЕННЯ ЕФЕКТИВНИХ БІОАДСОРБЕНТІВ У ВОДООЧИЩЕННІ**

*Самченко К. Ю., ст., Саблій Л. А., проф., д.т.н.*

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна  
[samchenko.kateryna@lil.kpi.ua](mailto:samchenko.kateryna@lil.kpi.ua)*

Волоський горіх (*Juglans regia* L.) — це рослина з родини Juglandaceae, з якої у світі щорічно виробляють плодів приблизно 3,3 млн тонн. У Європі основними виробниками є Туреччина, Україна, Румунія та Франція [1]. Україна залишається одним із найбільших експортерів волоських горіхів у світі, наразі близько 66-70% продукції йде на експорт. У майбутньому ця частка може зрости до 85% завдяки розвитку нових ринків і стабілізації логістики [2].

Мета даної роботи – дослідити можливості використання шкаралупи волоського горіха в якості ефективного біоадсорбенту для очищення стічних вод від забруднювачів,

насамперед важких металів, органічних сполук та барвників, дослідити хімічний склад та властивості біомаси з визначенням впливу фізичної і хімічної обробки на адсорбційні властивості матеріалу.

З метою мінімізації виснаження природних ресурсів, останнім часом зростає інтерес до використання або переробки сільськогосподарських відходів [3]. Проте високі витрати на їх збір, транспортування та зберігання обмежують їх застосування [4]. Фермери зазвичай збирають лише ядра горіхів, а шкаралупу та інші залишки спалюють, що спричиняє серйозні екологічні проблеми. Водночас використання таких відходів може забезпечити додатковий прибуток та принести екологічні і соціально-економічні вигоди [3]. Більше того, шкаралупа їстівних горіхів (близько 67% від загальної маси плоду [5]), є перспективним джерелом біомаси, що має достатньо високу міцність, не гниє, практично не втрачає своїх властивостей з часом, швидко відновлюється в природі і є екологічно безпечним продуктом для людей і тварин [6], а також накопичується безпосередньо на горіхопереробних підприємствах [4].

Шкаралупа волоських горіхів, в основному, складається з лігніну (35,0%), целюлози (30,4%) і геміцелюлози (24,9%). Високий вміст лігніну робить таку шкаралупу перспективною для виробництва біополіолів, смол та адгезивів, а також для використання в якості біопалива [3].

Проблема очищення стічних вод залишається одним із найактуальніших напрямів досліджень [8]. Одним із найефективніших способів очищення є адсорбція — простий, недорогий і універсальний метод, який забезпечує високу селективність і ефективність. Традиційно дослідження зосереджували на активованому вугіллі, однак його недоліками є висока вартість і складність регенерації. Тому зростає інтерес до альтернативних, низьковартісних, високоефективних та екологічно безпечних біосорбентів [1].

Як у сирому, так і в модифікованому вигляді горіхові шкаралупи проявили високу адсорбційну здатність щодо талію, йонів важких металів, органічних сполук і барвників [8]. Фізична та хімічна активація не лише покращує сорбційні властивості горіхових шкаралуп, але й розширює їх застосування в інших галузях індустрії. Покращення проявляється у збільшенні кількості функціональних груп, питомої поверхні та об'єму пор [7].

Функціональні групи лігноцелюлозної біомаси, що можуть брати участь у зв'язуванні забруднюючих речовин під час сорбції, — це гідроксильні ( $-OH$ ), карбонільні ( $-C=O$ ) та карбоксильні ( $-COOH$ ) групи. Однак природна шкаралупа має обмежену швидкість і ефективність адсорбції, тому її модифікують хімічно (лужною або кислотною обробкою) чи шляхом введення полярних груп  $-NH_2$ ,  $-COOH$  та  $-OH$ . Проте, ці методи мають численні недоліки — високі експлуатаційні витрати та утворення великої кількості рідких відходів, що потребують подальшої регенерації або утилізації. Також, щоб збільшити кількість активних центрів і покращити структуру поверхні, застосовують обробку поверхнево-активними речовинами (ПАР) [1].

Зазвичай модифікація шкаралуп волоських горіхів проходить у кілька етапів. На першому етапі сировинну шкаралупу подрібнюють до необхідного розміру, промивають дистильованою водою, а потім висушують при температурі  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$  протягом ночі або 24 годин. Наступним кроком є активація, яка може бути хімічною або фізичною, і спрямована на збільшення пористості та площі поверхні адсорбенту. Потім виконується процес карбонізації під час піролізу, який також називають термічною обробкою, в інертній атмосфері (за відсутності кисню). У деяких випадках піроліз проводять перед активацією. Нарешті, серія модифікацій завершується наданням поверхні адсорбенту активних функціональних груп, що покращує його здатність зв'язувати і утримувати забруднюючі речовини [7].

Отже, шкаралупа волоського горіха є перспективним і доступним джерелом лігноцелюлозної біомаси, що має високий потенціал для використання в якості ефективного біоадсорбенту для очищення стічних вод від важких металів, органічних речовин та барвників. Завдяки високому вмісту лігніну, целюлози та геміцелюлози, а також наявності активних функціональних груп (гідроксильних, карбонільних, карбоксильних), шкаралупа здатна ефективно поглинати забруднюючі речовини із води. Модифікація матеріалу фізичними та хімічними методами дозволяє значно підвищити адсорбційну здатність, збільшуючи питому поверхню, об'єм пор та кількість активних груп. Використання шкаралупи волоського горіха в якості біоадсорбенту є економічно вигідним та екологічно безпечним, а також сприяє раціональному використанню сільськогосподарських відходів, що відкриває нові перспективи для промислового застосування такої біомаси у водоочищенні.

#### ДЖЕРЕЛА ЛІТЕРАТУРИ

1. Shkliarenko, Y.; Halysh, V.; Nesterenko, A. Adsorptive Performance of Walnut Shells Modified with Urea and Surfactant for Cationic Dye Removal. *Water* **2023**, *15*, 1536. <https://doi.org/10.3390/w15081536>
2. Аналіз ринку волоських горіхів в Україні. 2024 рік. URL: <https://pro-consulting.ua/ua/issledovanie-rynka/analiz-rynka-greckih-orehov-v-ukraine-2024-god>.
3. Domingos, Idalina, Ferreira, José, Cruz-Lopes, Luísa P. and Esteves, Bruno. "Liquefaction and chemical composition of walnut shells" *Open Agriculture*, vol. 7, no. 1, 2022, pp. 249-256. <https://doi.org/10.1515/opag-2022-0072>
4. Kujawiak, S.; Makowska, M.; Waliszewska, B.; Janczak, D.; Brózdowski, J.; Czekala, W.; Zyffert, A. The Influence of Drying Sewage Sludge with the Addition of Walnut Shells on Changes in the Parameters and Chemical Composition of the Mixture. *Energies* **2024**, *17*, 4701. <https://doi.org/10.3390/en17184701>
5. Pirayesh, Hamidreza. "The Potential for Using Walnut (*Juglans Regia* L.) Shell as a Raw Material for Wood-Based Particleboard Manufacturing." *Composites Part B: Engineering*, 2012.
6. Beskopylny AN, Stel'makh SA, Shcherban' EM, Mailyan LR, Meskhi B, Shilov AA, Chernil'nik A, El'shaeva D. Effect of Walnut-Shell Additive on the Structure and Characteristics of Concrete. *Materials (Basel)*. 2023 Feb 20;16(4):1752. doi: 10.3390/ma16041752. PMID: 36837382; PMCID: PMC9968172.
7. Hania Albatrni, Hazim Qiblawey, Mohammed J. Al-Marri, Walnut shell based adsorbents: A review study on preparation, mechanism, and application, *Journal of Water Process Engineering*, Volume 45, 2022, 102527, ISSN 2214-7144, <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102527>.
8. Uddin, M.K., Nasar, A. Walnut shell powder as a low-cost adsorbent for methylene blue dye: isotherm, kinetics, thermodynamic, desorption and response surface methodology examinations. *Sci Rep* **10**, 7983 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64745-3>

## ВПЛИВ pH СЕРЕДОВИЩА НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ІНТЕГРАЦІЙНОГО ПРОЦЕСУ КОАГУЛЯЦІЯ-УЛЬТРАФІЛЬТРАЦІЯ ПРИ ОЧИЩЕННІ ВОДИ Р. ДНІПРО

*Семінська О.О., Балакіна М.М.*

*Інститут колоїдної хімії та хімії води ім. А.В. Думанського НАН України  
Україна, м. Київ, e-mail: olya.sunshine@gmail.com*

Постійно зростаюча антропогенна діяльність невпинно призводить до поглиблення однієї з екологічних проблем сьогодення – забруднення водних ресурсів. Водночас вживання чистої води, яка приймає участь у переважній більшості процесів, що відбуваються в живих організмах, має важливе значення для забезпечення життєдіяльності людини [1].

Головною водною артерією України є р. Дніпро, з якої одержують воду близько 70 % споживачів країни. При цьому процеси водопідготовки, в тому числі і на Дніпровській водопровідній станції, включають в себе стадії хлорування, коагуляції, освітлення на фільтруючому завантаженні та постхлорування. Однак, дніпровська вода в місцях водозабору відзначається підвищеним вмістом природних органічних речовин, які при її хлоруванні перетворюються на хлороганічні сполуки, що мають канцерогенні, токсичні і мутагенні властивості та є небезпечними для людського організму. Тому важливим і актуальним завданням сьогодення є глибоке видалення природних органічних сполук до стадії заключного хлорування.

В останні десятиліття у сфері водоочищення позитивно зарекомендували себе, завдяки чому набули широкого розповсюдження, баромембранні методи, але їх використання на практиці обмежується забрудненням мембран, що негативно впливає на їх робочі характеристики [2]. Для забезпечення ефективності роботи мембранних елементів наразі використовують поєднання баромембранних методів з іншими методами очищення води [3, 4], одним з прикладів якого є поєднання процесів ультрафільтрації та коагуляції з використанням мікродоз коагулянту.

Дослідження проводили на лабораторній установці непроточного типу з магнітною мішалкою при робочому тиску 0,4 МПа. В роботі використовували полісульфонові ультрафільтраційні мембрани з відсіканням за молекулярною масою 20000 Да. В якості коагулянту використовували сульфат алюмінію  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 16H_2O$  (концентрація 2 мг Al/дм<sup>3</sup>). Перед початком роботи зразки мембран опресовували фільтруванням дистильованої води до досягнення постійних значень питомої продуктивності. Ефективність очищення визначали за кольоровістю, вмістом гумусових речовин, який визначали за показником  $UV_{364}$  та концентрацією алюмінію у вихідній воді та пермеаті. Експерименти проводились в межах pH 5 – 10. Проби води було відібрано в серпні 2025 р.

В ході роботи було досліджено вплив коефіцієнта відбору пермеата (k) на робочі характеристики мембрани, що дозволяє уточнити межі використання інтеграційного процесу.

Результати дослідження впливу коефіцієнту відбору пермеату на кольоровість показали, що зміна pH середовища має значний вплив на ефективність інтеграційного процесу коагуляція-ультрафільтрація. Так, при значеннях pH = 8 – 10 кольоровість пермеатів перевищила значення ГДК за цим показником (20 град за ДСТУ 7525:2014) і відповідала 20 – 38, 21 – 43 та 28,5 – 52,5 град. для pH 8, 9 та 10,0 відповідно. Зниження значення pH до 7,0 привело до покращення якості пермеатів, кольоровість яких при k = 10 – 30 % відповідала 17,5 – 19,5 град, але подальше підвищення k супроводжувалось перевищенням норм ГДК у 1,05 – 1,5 рази. При pH = 6,5 та 6,0 позитивна динаміка збереглась і якість пермеатів задовольняла необхідним вимогам при k ≤ 70 % та k ≤ 90

відповідно, але подальше зниження рН до 5,0 призвело до погіршення якості пермеатів вже при  $k = 10\%$ .

Вміст гумінових речовин визначали за показником  $UV_{364}$ , дослідження якого свідчить про зниження потенційної можливості утворення вторинних продуктів хлорування при підготовці питної води. Отримані результати показали, що найкраща затримуюча здатність за цим показником спостерігалась при  $pH = 6$  і становила від  $83\%$  при  $k = 10\%$  до  $66,2\%$  при  $k = 90\%$ . Погіршення значень показника  $UV_{364}$  спостерігалось як при підвищенні, так і при пониженні рН середовища, при цьому затримуюча здатність становила  $1,5 - 78\%$ .

Дослідження процесу очищення води р. Дніпро із застосуванням інтеграційного процесу коагуляція-ультрафільтрація показало, що вміст алюмінію в пермеатах задовольняє вимогам ДСТУ 7525:2014 при  $pH = 6 - 7$ . Зміни значень рН призводять до погіршення якості пермеатів за вмістом алюмінію. Так, пермеати необхідної якості можна отримати при  $pH = 8$  та  $k \leq 80\%$ , при  $pH = 9$  та  $k \leq 60\%$ , а подальше підвищення рН унеможливує отримання пермеатів, які задовольняють вимоги до води питної якості.

Отже, з вищенаведених даних видно, що рН середовища має суттєвий вплив на ефективність інтеграційного процесу очищення води коагуляція-ультрафільтрація із застосуванням мікродоз коагулянту, а оптимальним значенням рН для проведення подальших досліджень рекомендовано обрати  $pH = 6$ .

Список використаної літератури:

1. Гончарук В.В. Наука о воде. К.: Наукова думка, 2010. 512 с.
2. Singh R. Membrane technology and engineering for water purification. Application, Systems Design and Operation, 2nd edition. USA.: Elsevier, 2015. 450 p.
3. Application of coagulation–ultrafiltration hybrid process for drinking water treatment: Optimization of operating conditions using experimental design / A.W. Zularisam a b c, A.F. Ismail aet al // Separation and Purification Technology. 2009. V 65, 2, P. 193-210. DOI:10.1016/j.seppur.2008.10.018.
4. Application of hybrid coagulation–ultrafiltration for decentralized drinking water treatment: impact on flux, water quality and costs // S. G. Arhin, N. Banadda et al // Water Supply. 2019. V. 19. 7. P. 2163 – 2171. DOI: 10.2166/ws.2019.097.

## ПОРІВНЯННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ДЕСТРУКЦІЇ СТРЕПТОЦИДУ ВДОСКОНАЛЕНИМИ ПРОЦЕСАМИ ОКИСНЕННЯ ЗА УЧАСТЮ ПЕРОКСИДУ ВОДНЮ І ПЕРСУЛЬФАТУ НАТРІЮ

*Столярова І.В., Вакуленко В.Ф.*

*Інститут колоїдної хімії та хімії води ім. А.В. Думанського НАН України, м. Київ  
istolyarova2202@gmail.com*

**Вступ.** В останні роки в усьому світі дослідники фіксують присутність фармацевтичних препаратів в стічних водах фармацевтичних виробництв і лікарень, побутових стічних водах, поверхневих та підземних водах і навіть у питній воді в концентрації від  $нг/дм^3$  до  $мкг/дм^3$  [1]. До найбільш поширених мікродомішок такого типу належать антибіотики. Зокрема, велику увагу привернули сульфаніламідні антибіотики через їх широке використання в лікуванні людей, тваринництві і аквакультурах та поширене потрапляння у довкілля – щороку в біосферу їх потрапляє в середньому

>20 000 тонн [2]. Велика група лікарських препаратів (більше 150 сполук), об'єднаних загальною назвою сульфаніламідів або сульфонамідів (СА), є похідними 4-амінобензолсульфаміду, відомого як стрептоцид [2, 3], який характеризує спектр і механізм протимікробної дії, спільний для усіх антибіотиків цієї групи. СА, їхні метаболіти та продукти деструкції добре розчинні у воді, хімічно стабільні та біорезистентні, тому традиційні процеси очищення стічних вод недостатньо ефективні.

Вдосконалені процеси окиснення (AOPs) мають великий потенціал для деструкції антибіотиків в різних водних об'єктах [4]. У тому числі для деструкції сульфаніламідів перспективними AOPs вважають фотохімічне та фотокаталітичне окиснення пероксидом водню чи персульфатом [5, 6], причому УФ-С-опромінення ( $\lambda = 200\text{--}280$  нм) забезпечувало їх найшвидше первинне розкладання. Важливим напрямком досліджень на даний час є визначення умов досягнення максимального ступеня повної деструкції до простих неорганічних продуктів (мінералізації) таких екотоксикантів при раціональних дозах реагентів (окисників і каталізатора) і тривалості обробки.

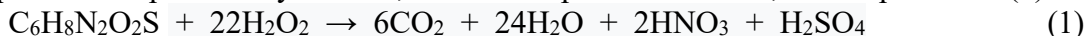
**Мета роботи** – порівняння кінетики та ступеня деструкції стрептоциду при фотохімічному та гомогенному фотокаталітичному окисненні у дистильованій воді пероксидом водню та персульфатом натрію при мінімальній концентрації іонів  $\text{Fe}^{3+}$  та УФ-С-опроміненні ( $\lambda = 254$  нм).

**Методика експерименту.** Об'єктом дослідження був комерційний препарат стрептоциду (99 %, Китай). Характеристика робочого розчину стрептоциду в дистильованій воді приведена в табл. 1.

Таблиця 1. Характеристика робочого розчину стрептоциду

Формула	М.м., г/моль	$C_0$ ,		ЗОВ <sub>0</sub> , мг/дм <sup>3</sup>	$A_{258}$ , см <sup>-1</sup>	рН <sub>0</sub>
		мМ	мг/дм <sup>3</sup>			
$\text{C}_6\text{H}_8\text{N}_2\text{O}_2\text{S}$	172,2	0,2	34,4	$11,3 \pm 0,2$	$2,11 \pm 0,05$	$6,3 \pm 0,1$

Фотохімічне і фотокаталітичне окиснення розчинів стрептоциду (СА) двома окисниками ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ ) проводили при температурі навколишнього середовища ( $22 \pm 1$  °С) на лабораторній установці ( $V = 400$  см<sup>3</sup>, товщина шару ( $l$ )  $\sim 1,5$  см) при опроміненні за допомогою зануреної лампи ДРБ-15, що випромінює в УФ-С діапазоні ( $\lambda = 254$  нм), при перемішуванні магнітною мішалкою протягом 2 год. Вивчення кінетики і порівняння ефективності процесів фотохімічної ( $\text{H}_2\text{O}_2/\text{УФ}$ ,  $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}/\text{УФ}$ ) і гомогенної фотокаталітичної ( $\text{Fe}^{3+}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{УФ}$ ,  $\text{Fe}^{3+}/\text{S}_2\text{O}_8^{2-}/\text{УФ}$ ) деструкції стрептоциду проведено без регулювання рН розчинів при низькій концентрації  $\text{Fe}^{3+}$  ( $1,12$  мг/дм<sup>3</sup> ( $0,02$  мМ)) та молярних концентраціях окисників ( $4,2\text{--}4,3$  мМ), близьких до стехіометричної концентрації  $\text{H}_2\text{O}_2$ , необхідної для повної мінералізації стрептоциду до  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  та неорганічних іонів, згідно рівняння (1).



В процесі досліджень контролювали зміну наступних параметрів ( $P$ ): оптичної густини максимуму поглинання розчину стрептоциду в УФ-області ( $A_{258}$ ), яка характеризує розкладання його ароматичної структури; концентрацій загального органічного вуглецю (ЗОВ) (ступінь мінералізації), пероксиду водню і персульфату натрію. Спектри поглинання розчину СА реєстрували за допомогою спектрофотометра Shimadzu UV-2450. Концентрацію ЗОВ визначали аналізатором Shimadzu TOC-VCSN. Концентрації  $\text{H}_2\text{O}_2$  і  $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$  в процесі окиснення розчинів СА контролювали спектрофотометричним методом за реакціями відповідно з сульфатом титанілу ( $\lambda = 410$  нм) і КІ ( $\lambda = 400$  нм).

#### Результати і їх обговорення.

Встановлено, що саме УФ-С-опромінення ( $\lambda = 254$  нм) розчину стрептоциду ( $C_0 = 0,2$  мМ, рН<sub>0</sub> 6,3) протягом 2 год спричинило суттєву його трансформацію – зниження

інтенсивності максимуму поглинання розчину ( $A_{258}$ ) на 70 % та деякий ступінь мінералізації (~ 15 %), однак супроводжувалось значним потемнінням розчину внаслідок полімеризації частини утворених первинних інтермедіатів.

Аналіз кінетики розкладання стрептоциду (рис. 1, *a* і *б*) показав, що всі досліджені фотохімічні ( $\text{H}_2\text{O}_2/\text{УФ}$ ,  $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}/\text{УФ}$ ) та фотокаталітичні ( $\text{Fe}^{3+}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{УФ}$ ,  $\text{Fe}^{3+}/\text{S}_2\text{O}_8^{2-}/\text{УФ}$ ) процеси окиснення при концентрації окисників, близькій до стехіометричної, мінімальній концентрації  $\text{Fe}^{3+}$  (0,02 мМ) і УФ-С-опроміненні знижували його концентрацію більш, ніж на порядок ( $\Delta A_{258} \geq 90$  %) вже за 0,5 год (рис. 1, криві 1 і 4). При практично повному використанні окисника (96–100 %) за 2 год усі чотири досліджені процеси забезпечували повну первинну деструкцію препарату (98–100 %) та високий ступінь мінералізації СА (83–90 %) (рис. 1, *a*, *б*, та рис. 2, *б*).

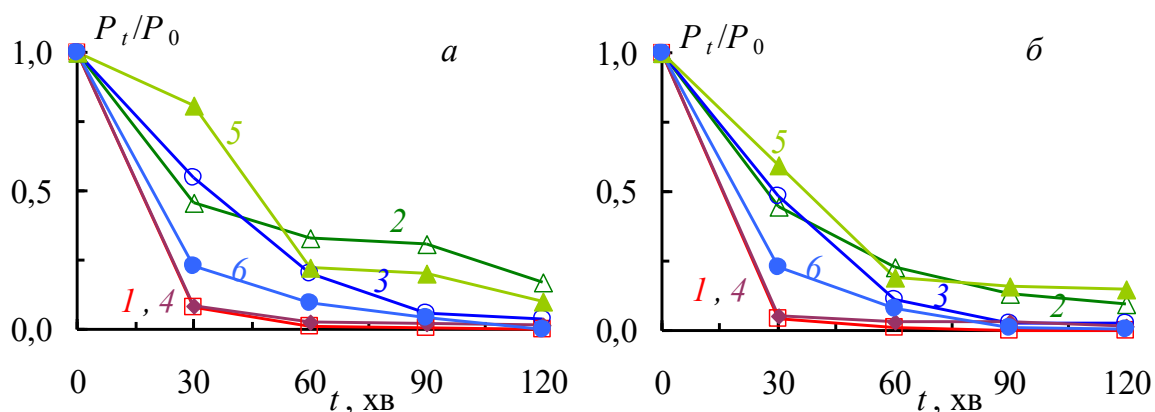


Рисунок 1. Порівняння кінетики деструкції стрептоциду за зміною  $A_{258}$  (1, 4), концентрації ЗОВ (2, 5) та розкладання окисника (3, 6) в процесі фотохімічного (*a*) та гомогенного фотокаталітичного (*б*) окиснення його розчину  $\text{H}_2\text{O}_2$  (1–3) та  $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$  (4–6).

Разом з тим різниця в кінетиці мінералізації СА та розкладання окисників була дуже суттєвою. Порівняння ефективності досліджених АОРів при тривалості окиснення 0,5 год, достатній для забезпечення лише високого ступеня первинної деструкції СА ( $\geq 90$  %), вказує на суттєві переваги процесів окиснення за участю  $\text{H}_2\text{O}_2$  стосовно ступеня мінералізації препарату (рис. 2, *a*). Персульфат натрію в обох досліджених процесах ( $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}/\text{УФ}$ ,  $\text{Fe}^{3+}/\text{S}_2\text{O}_8^{2-}/\text{УФ}$ ) при УФ-С-опроміненні ( $\lambda = 254$  нм) протягом перших 0,5 год розкладався значно швидше, ніж пероксид водню в аналогічних процесах ( $\text{H}_2\text{O}_2/\text{УФ}$ ,  $\text{Fe}^{3+}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{УФ}$ ) (рис. 1, *a*, *б*, криві 3 і 6). При цьому процес мінералізації реакційних сумішей при фотохімічному і фотокаталітичному окисненні розчинів СА персульфатом в цей період відбувався відповідно у 2,8 і 1,3 рази повільніше порівняно з процесами за участю  $\text{H}_2\text{O}_2$  (рис. 2, *a*).

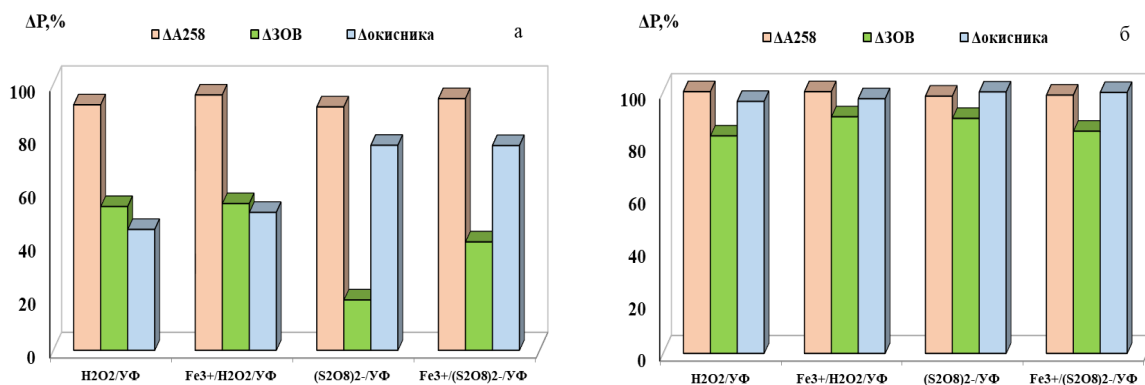


Рисунок 2. Порівняння ступенів фотохімічної ( $\text{H}_2\text{O}_2/\text{УФ}$ ,  $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}/\text{УФ}$ ) та фотокаталітичної ( $\text{Fe}^{3+}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{УФ}$ ,  $\text{Fe}^{3+}/\text{S}_2\text{O}_8^{2-}/\text{УФ}$ ) деструкції стрептоциду у воді за зміною його концентрації за  $A_{258}$  і ЗОВ та розкладання окисників при за  $t = 0,5$  (а) і 2 год (б).

Водночас, при тривалішому окисненні тенденції в процесі мінералізації змінювались на протилежні, внаслідок чого вже через 1 год персульфат забезпечував децю вищі ступені фотохімічної і фотокаталітичної мінералізації реакційних сумішей (відповідно на 10 і 3 %) при близькому ступені первинної деструкції СА (97–99 %). Максимальні ступені фотохімічної та фотокаталітичної мінералізації стрептоциду пероксидом водню в дистильованій воді становили відповідно 83 і 90 % за 2 год. Аналогічні ступені мінералізації СА в даному середовищі забезпечували також процеси  $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}/\text{УФ}$  і  $\text{Fe}^{3+}/\text{S}_2\text{O}_8^{2-}/\text{УФ}$  (відповідно 90 і 85 % за 2 год) (рис. 2, б).

#### Висновки.

Встановлено, що усі 4 досліджені фотохімічні та фотокаталітичні процеси окиснення при концентраціях окисників, близьких до стехіометричної (~22 моль/моль), мінімальній концентрації  $\text{Fe}^{3+}$  (0,02 мМ) і УФ-С-опроміненні забезпечували повну первинну деструкцію (98–100 %) стрептоциду ( $\text{C}_0 = 0,2$  мМ) в дистильованій воді та високий ступінь його мінералізації (83–90 %) за 2 год при ступені використання окисників 96–100 %. Отже, при досліджених параметрах фотохімічне і гомогенне фотокаталітичне окиснення стрептоциду персульфатом натрію дійсно є альтернативою аналогічним процесам за участю пероксиду водню за умови застосування стехіометричних концентрацій окисників і максимального їх використання.

#### Перелік посилань

1. Wilkinson J.L., Alistair B.A., Kolpin D.W., Kenneth M.Y., Racliffe W.S., Galbán-Malagón C. Pharmaceutical pollution of the world's rivers. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 2022. V. 119. N 8. e2113947119.
2. Ovung A., Bhattacharyya J. Sulfonamide drugs: structure, antibacterial property, toxicity, and biophysical interactions. *Biophys Rev.* 2021 V. 13. N 2. P. 259–272.
3. Baran W., Adamek E., Ziemiańska J., Sobczak A. Effects of the presence of sulfonamides in the environment and their influence on human health. *J. Hazard. Mater.* 2011. V. 196. P. 1–15.
4. Cuerda-Correa E., Alexandre-Franco M., Fernández-González C. Advanced Oxidation Processes for the Removal of Antibiotics from Water. An Overview. *Water.* 2020. V. 12. 102.
5. Khankhasaeva S.T., Badmaeva S.V. Removal of p-aminobenzenesulfanilamide from water solutions by catalytic photo-oxidation over Fe-pillared clay. *Water Res.* 2020. V. 185. 116212.
6. Liu Z., Hu W., Zhang H., Wang H., Sun P. Enhanced Degradation of Sulfonamide Antibiotics by UV Irradiation Combined with Persulfate. *Processes.* 2021. V. 9. 226.

## СПА-ГОТЕЛІ: АПРОБАЦІЯ ІННОВАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБЛЕННЯ ВОДИ

<sup>1</sup>Стрікаленко Т. В., <sup>2</sup>Нижник Т. Ю., <sup>2</sup>Маглевана Т. В.

<sup>1</sup>Одеський національний технологічний університет, Україна, м. Одеса,  
e-mail: alpha.water.55@gmail.com

<sup>2</sup>НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського», Україна, м. Київ,  
e-mail: taren8@gmail.com

Сучасні тенденції будівництва та розвитку заміських СПА- та Велнес-готелів у віддаленій «від цивілізації» місцевості, а також поширення туризму, зокрема, сільського/зеленого туризму, потребують використання відповідних технічних рішень і впровадження новітніх технологій оброблення води, у тому числі її знезараження [1-3]. Цілодобова подача до всіх приміщень готелю води, що відповідає діючим в державі вимогам до показників її якості, є однією з вимог ДСТУ 4269:2003 [4]. Актуальність роботи обумовлена тим, що вибір прийнятних технологій оброблення води є одним з найбільш чутливих питань, з яким стикаються власники готелів, що прагнуть експлуатувати автономні джерела водопостачання або повторно використовувати свою воду. Адже такі технології мають відповідати «потребам» різноманітного обладнання для приготування їжі та напоїв, для захисту побутових, комерційних та промислових пристроїв, а також СПА-центрів з їх гідротермальними процедурами тощо [3, 5-7].

Метою аналітичної роботи був аналіз інформаційних джерел щодо ризиків при експлуатації системи автономного водопостачання та матеріалів власних досліджень щодо мінімізації ризиків у готелях при комплексному використанні водних розчинів одного з похідних гуанідинових полімерів - гідрохлориду полігексаметиленгуанідину (ПГМГ-гх). Критеріями розгляду були достатня ефективність технології, надійність роботи, безпечність для людини та об'єктів довкілля, компактність та енергоефективність.

Аналіз виробництва і використання ПГМГ у країнах світу свідчить про численні наукові обґрунтування та впровадження низки реагентів на основі ПГМГ для водозабезпечення населення, підприємств харчової промисловості та косметології, у хімічній, будівельній та медичній галузях, для дезінфекції і деконтамінації об'єктів ветеринарно-санітарного нагляду, для профілактичної або вимушеної дезінфекції підприємств агропереробки, тваринницьких ферм, пташників тощо [8]. Науковими дослідженнями, виконаними за участі авторів цієї роботи у 1997-2025 рр, обґрунтовано використання біоцидного реагенту комплексної дії «Акватон-10» (ДР - ПГМГ-гх з низьким вмістом залишкових мономерів, розробник – НТЦ «Укрводбезпека», м. Київ), що має широкий спектр бактерицидної, віруліцидної, фунгіцидної дії, не леткий, термічно стабільний, безпечний для людей і тварин, має всі необхідні дозволи МОЗ України і супровідні методичні документи щодо очищення та знезараження води, в тому числі – питної, технологічного обладнання, оброблення стічних вод, їх осадів тощо [9, 10].

Основні напрямки і результати наших досліджень, що дозволили рекомендувати застосування реагенту «Акватон-10» у автономному водозабезпеченні готелів, полягають у наступному. (1) Напрацьовані та впроваджені схеми використання розчинів реагенту при різній компоновці обладнання на станціях водопідготовки в умовах помірного та спекотного клімату, а також відповідні методичні документи та методи контролю вмісту залишкової кількості реагенту у воді [11, 12]. (2) Результати апробації оброблення розчинами реагенту «Акватон-10» каптажу джерела водопостачання (мінеральної води) та технологічного обладнання [13] були успішно впроваджені при організації автономного водопостачання у СПА-бутік-готелі «ХХ» (Закарпаття). (3) Оброблення смкостей (у тому

числі – транспортних, за необхідності) водними розчинами реагенту «Акватон-10» виконується вже понад 20 років при експлуатації систем/пристроїв для додаткового очищення води централізованого питного водопостачання, що функціонують у дитячих, медичних і торгівельних закладах, у готелях [8, 14]. Методичний супровід та необхідні контрольні заходи щодо перевірки показників якості додатково очищеної води викладені у відповідних документах, розроблених за нашої участі та затверджених МОЗ України [10]. Дія цих методичних документів розповсюджується на зберігання запасів води у відповідних ємкостях при автономному водозабезпеченні готелів. (4) Серед вагомих причин розвитку корозії та біобростань у мережі трубопроводів, що постачають воду до будинків, у внутрішньо-будинковій мережі трубопроводів, є використання для знезараження води біоцидів-окиснювачів (хлору і хлор-вмісних реагентів тощо) та формування хлор-резистентності у низки патогенних мікроорганізмів, яка нерідко поєднується з їх стійкістю до антибіотиків [15]. Дослідженнями, виконаними за нашою участі, показано, що заміна у процесі оброблення води реагентів-окиснювачів на реагенти на основі ПГМГ-гх сприяє очищенню старих трубопроводів від накопичень компонентів біоценозу та солей Феруму, тоді як присутність у їх складі позитивно заряджених біоцидних гуанідинових груп обумовлює здатність полімеру утворювати на металевих поверхнях міцні, що не змиваються потоком води, біоцидні плівки, які захищають поверхню металу від корозії та біобростання [16]. Напрацьовано методичний супровід поточного та щорічного проведення заходів по дезінфекції водопровідної мережі [8]. (5) Реагенти на основі ПГМГ-гх здатні проявляти гідродинамічну активність у водних розчинах (ефект Томса) та знижувати гідродинамічний опір у водопровідній мережі, що підтверджено експериментальними дослідженнями [16,17]. Тобто, застосування для оброблення води полімерного реагенту комплексної дії «Акватон-10» у системі водозабезпечення готелів, у тому числі – при автономному водопостачанні, є енергоефективним заходом, що важливо при обмеженнях електропостачання. (6) За необхідності застосування реагенту «Акватон-10» разом з алюміній-вмісними коагулянтами зменшується у 2-3 рази потреба у цих коагулянтах, що знижує практично у таку ж кількість разів вміст токсичного алюмінію в осаді після процесу оброблення води. Крім того, ці осади знезаражені і не піддаються загниванню, що зменшує навантаження на навколишнє середовище [8]. (7) Перспективним щодо використання води із залишковою кількістю полімерного реагенту «Акватон-10» є миття металевих та інших поверхонь у харчоблоці та приміщенні ресторану в готелі, яке забезпечує одночасно ефективну їх дезінфекцію (санітизацію) [8, 18]. З цією ж метою вже використовують у харчовій, зокрема, кондитерській промисловості препарати «Біоцид плюс» і «Полідез» (діючі речовини – ПГМГ та ЧАС), що може сприяти впровадженню концепції «Zero Waste ресторану», тому що стічні води готелю (ресторану) будуть частково знезаражені, менше піддаватимуться загниванню та негативному впливу на довкілля. Апробація такого використання полімерного реагенту комплексної дії «Акватон-10» (а також «Біоцид плюс», «Полідез») проводиться у СПА-бутік-готелі «ХХ».

Висновки. Результатами комплексних наукових досліджень обґрунтовані можливість та ефективність удосконалення експлуатації системи автономного водозабезпечення готелів шляхом використання одного з похідних гуанідинових полімерів – реагенту «Акватон-10» (ПГМГ-гх). Таке застосування полімерного реагенту комплексної дії «Акватон-10» створює умови отримання нормативно безпечної питної води, що відповідає вимогам державного законодавства, є екологічно безпечним та певною мірою енергоефективним.

### Перелік посилань

1. Water technology: trends 2023. Transforming utilities through innovation URL: <https://www.idrica.com/wp-content/uploads/2023/02/Idrica-Water-Technology-Trends-2023-EN.pdf>
2. Water, Waterborne Pathogens and Public Health: Environmental Drivers: Report on an American Academy of Microbiology Colloquium held on Dec. 5 and 6, 2024. Washington (D.C.): American Society for Microbiology; 2025. 32 p.
3. Global Wellness Summit “Watershed Wellness” Trend. URL: <https://www.globalwellnesssummit.com/press/press-releases/global-wellness-summit-releases-10-wellness-trends-for-2025/>
4. Послуги туристичні. Класифікація готелів. Державний стандарт України ДСТУ 4269:2003.- К.: Держстандарт України, 2003. (Нормативний документ Держстандарту України)
5. Condé Nast Traveler “How contrast therapy became 2025’s biggest wellness trend”. URL: <https://www.cntraveller.com/article/how-contrast-therapy-became-2025s-biggest-wellness-trend>
6. Vogue. “The Wellness Club is Gen Z’s Country Club”. URL: <https://www.vogue.com/article/the-wellness-club-is-gen-zs-country-club>
7. Spa Business “Accor reimagines future of wellness, spa and fitness design in all-new white paper”. URL: <https://www.spabusiness.com/wellness-news/Exclusive-Accor-reimagines-future-of-wellness-spa-and-fitness-design-in-allnew-white-paper/355085>
8. Реагенти комплексної дії на основі гуанідинових полімерів. Під ред Г. І. Баранової./ Випуски 1-6. К.: Укрводбезпека, 2003-2023 pp.
9. ТУ У 24.1-25274537-005-2003 зі змінами № 1 та № 2 «Реагент комплексної дії «Акватон-10» (Висновок Державної санітарно-епідеміологічної експертизи МОЗ України від 02/07/2013 р № 05.03.02-04/58289).
10. Методичні рекомендації щодо застосування засобу “Акватон-10” для знезараження об’єктів водопідготовки та води при централізованому, автономному та децентралізованому водопостачанні. Затверджені Наказом МОЗ України 26.02.2010. №16-2010. К.: МОЗ України, 2010. 31с.
11. Нижник Т. Використання знезаражуючих реагентів на основі полігексаметиленгуанідину гідрохлориду для підготовки води на підприємствах в Україні та за кордоном / Т. Нижник, Ю. Нижник, Т. Стрікаленко, В. Марієвський - Водопостачання та водовідведення. Виробничо-практичний журнал. 2018. № 6. С.11-15.
12. Нижник Т., Стрікаленко Т. До проблеми водопостачання в умовах спекотного клімату. Водопостачання і водовідведення: проектування, будівництво, експлуатація, моніторинг: Збірник мат. VI міжнар. науково-техн конф, 15-17 жовтня 2025р, м. Львів.
13. ТІ У 11.0-02012125-001:2025 «Технологічна інструкція з обробки та фасування мінеральних вод»
14. Стрікаленко Т.В. Вода для готельно-ресторанних закладів: аналіз деяких шляхів оптимізації водопостачання. - Водопостачання та водовідведення. Виробничо-практичний журнал. 2015. № 3. С.31-36.
15. Воинцева И. Антикоррозионные свойства обеззараживающих реагентов на основе полигексаметиленгуанидина гидрохлорида / И. Воинцева. , Т. Нижник, Т. Стрикаленко, А. Баранова - Вода: химия и экология. 2018. № 10-12. С. 99-108.
16. Нижник Т. О гидродинамической активности обеззараживающего реагента на основе полигексаметиленгуанидина гидрохлорида / Т. Нижник, А. Баранова, Т. Маглевана . World Science. 2019. № 4 (44), vol. 1, April 2019. P. 11 – 15.

17. Nyzhnyk T., Mahlova T., Strikalenko T. e. a. Experimental study of the hydrodynamically reagent for energy saving. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 2025, 26(6), P. 29–36
18. Maglyovana T. e. a. Analysis of the possibility of environmental risk management by using innovative water treatment technology. *Sciences of Europe (Praha, Czech Republic)*. 2021. No 85. Vol. 1. P. 29-39

## **БІОЕКОНОМІЧНІ ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ВІДХОДІВ ШКІРЯНОЇ ГАЛУЗІ**

*Туркот Катерина Володимирівна<sup>1</sup>  
Мокроусова Олена Романівна<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>*Державний торговельно-економічний університет, Україна, Київ, k.turkot@knu.edu.ua*

<sup>2</sup>*Київський національний університет технологій та дизайну, Україна, Київ, olenamokrousova@gmail.com*

Сучасні напрями біоекономічних перспектив розвитку європейського Союзу в 2021 році були запропоновані у звіті «Форсайт-сценарій для біоекономіки ЄС у 2050 році: майбутній перехід біоекономіки до сталого розвитку та кліматично нейтральної економіки» [1]. Основними завданнями стратегій біоекономічного розвитку ЄС стали: сталий розвиток, кліматична нейтральність, інклюзивність в економічних і соціальних реаліях країн-членів ЄС [1, 2].

В Україні біоекономічна стратегія розвитку окреслюється та реалізується повільними темпами, характеризуючись, переважно, фрагментарним характером. Перспективними галузями в економіці України для реалізації біоекономічних стратегій є сільське господарство, легка промисловість та біоенергетика. В зв'язку з цим, цілеспрямована політика розвитку біоекономіки в Україні, підтримка промислового сектору може стати рушійною силою у сталому розвитку національної економіки [2].

Шкіряна промисловість України є стабільною складовою галузі легкої промисловості, підґрунтям для чого є наявність сировинних вітчизняних ресурсів, розвиток тваринництва, фермерського господарства тощо [2, 3].

Шкіряне виробництво передбачає послідовне виконання різноманітних рідинних та механічних обробок сировини і напівфабрикату. При цьому в технологічних процесах використовують суттєву кількість різноманітних ресурсів: повітря, воду, хімічні матеріали, біологічно-активні сполуки тощо [2]. З однієї тони шкур отримують приблизно 150-200 кг готової шкіри, а також близько 750-850 кг твердих відходів. Щороку світова шкіряна галузь генерує значну долю рідких та твердих відходів [2, 3]. Серед твердих відходів утворюється близько 200 кг відходів дубленої шкіри та 250 кг недублених відходів, які створюють велику економічну та екологічну проблему для довкілля. Встановлено [2], що склад твердих відходів шкіряного виробництва, які утворюються під час процесів виробництва шкіри, включає солі, відходи волосся, обрізь голину та шкіряну, стружку, пил тощо. Також, під час очистки стічних вод шкіряного виробництва утворюються осади (шлами, мул) та інші тверді відходи [3]. Самим простим способом поводження з твердими відходами шкіряної промисловості є їх розміщення на сміттєзвалищах. Продукти гниття білоквісних та жироквісних відходів шкіряного виробництва порушують баланс «грунт та/або водні ресурси» навколишнього середовища [2]. У зв'язку з цим світова шкіряна галузь змушена шукати способи повторного використання відходів, що утворюються в процесі виробництва шкіри на різних стадіях технологічних процесів, або започатковувати способи

їх утилізації [3]. Відомі способи використання тверди відходів у виробництві таких матеріалів, як клей, желатин, білковий корм для домашніх тварин тощо. Сучасні продукти переробки колагенвмісних відходів, а саме, екстрагований колаген, пептиди, амінокислоти, отримані із відходів шкіряного виробництва активно використовуються в косметології, біофармацевтиці, ранозагоювальних матеріалах тощо [4]. Наприклад, перспективним є спосіб отримання екстрагованого колагену з колагенвмісних відходів після підготовчих процесів переробки шкіряної сировини [4]. Постадійна та триразова обробка подрібнених відходів оцтовою кислотою у присутності етилендіамінтетраоцтової кислоти та наступне осадження білка хлоридом натрію продемонструвала ефективний спосіб екстрагування колагену. Найбільшу кількість колагену було отримано з колагенвмісних відходів після першого та другого екстрагування. Отриманий колаген класифіковано як тип I та чистий. Отриманий екстрагований колаген як біополімер може повторно бути використаний в технології виробництва шкіри або як самостійна матриця у створенні біоматеріалів та лікувальних препаратів [4].

Після рідинних процесів переробки сировини з кожної тони акумулюється близько 50-150 м<sup>3</sup> стічних вод та 500 кг мулу [5]. Враховуючи, що на кожен тону сирих шкур шкіряно галузь використовується приблизно 30–40 м<sup>3</sup> води, з яких 35 % йде під час промивання, а 55 % використовується під час рідинних процесів чи механічних операцій, можна спрогнозувати рівень забруднення водних ресурсів навколишнього середовища [2, 5]. Загалом відомо про щорічне утворення близько 600 млн м<sup>3</sup> стічних вод шкіряних виробництв за світовим обсягом. Стічні води шкіряних заводів є одними з найбільш забруднюючих серед промислових відходів шкіряної промисловості.

Різноманітні хімічні сполуки (кислоти, луги, солі хрому, дубильні речовини, розчинники, сульфідні, барвники тощо), які використовуються в переробці шкіряної сировини для отримання шкір повністю не фіксуються в дермі, що провокує підвищення рівня біологічного та хімічного споживання кисню, загальної кількості розчинених твердих та завислих речовин. Встановлено, що хімічні сполуки, які практично не піддаються утилізації зі стічних вод, утворюються під час хромового дублення [3].

Сучасні методи перетворення рідких відходів шкіряного виробництва на енергію є перспективними, економічно вигідними та технологічно можливими. Підґрунтям для цього є присутність в них органічних речовин з оптимальним масовим співвідношенням C : N та їх рідкий агрегатний стан [5].

Виробництво біоенергетичних продуктів у вигляді біогазу з біомаси набуло значного поширення в багатьох країнах. Прогресивні країни ЄС для вирішення питань ресурсозбереження та кліматичної нейтральності впроваджують технології виробництва відновлювальних джерел енергії. Для шкіряної галузі відкривається практична перспектива біоекономічної стратегії використання відходів через реалізацію принципу «переробка відходів→виробництво енергії». Отже, відходи шкіряного виробництва є потенційним сировинним ресурсом для виробництва біоенергії та здатні сприяти вирішенню екологічних та соціальних питань.

Стічні води шкіряних підприємств є потенційним джерелом виробництва біогазу, але основними проблемами їх ефективної метанізації є високий вміст азоту та наявність речовин, що не піддаються біологічному розкладанню (сполуки Cr, Al танідів та інше)[6]. Для посилення продуктивності зброджування запроваджені технології додавання ферментів. Відомо [7] напрями спільного використання шламу, мулу або концентрованих стічних вод шкіряних підприємств як субстрату для зброджування й отримання біогазу. Під час процесу спільного зброджування рекомендують додавати також ліпазу для покращення стадії гідролізу та сповільнення анаеробного зброджування, що сприяє збільшенню кількості отриманого біогазу на ~ 15%, а період зброджування скорочується на ~ 30% [8].

Встановлено [9], що попередня обробка осаду шкіряних підприємств ферментами для анаеробного зброджування збільшує вихід біогазу.

Перспективним спрямуванням є дослідження впливу озонування [10] для підвищення хімічної потреби в розчинному кисні, враховуючи, що гідроліз осаду потребує більш тривалого часу відстоювання. Озонування для розчинення клітин і гідролізу осаду стічних вод шкіряних підприємств руйнує клітинну стінку та активізує виробництво біогазу.

Активно досліджуються напрями комплексних технологій зброджування. Встановлено зростання ефективності отримання біогазу при спільному зброджуванні відходів шкіряного підприємства та коров'ячого гною при масовому співвідношенні 70:30% (коров'ячий гній до осаду шкіряного заводу) [10]. Спільне зброджування осаду стічних вод та інших відходів шкіряного або харчового виробництва є альтернативним сировинним джерелом отримання біогазу. Зазначені відходи можна використовувати безпосередньо на шкіряних заводах як джерело тепла або для виробництва електроенергії [8-11]. Доведено доцільність комбінування вихідної сировини та оптимізовано параметри виробництва біогазу, згідно яких осади стічних вод шкіряного підприємства використовують спільно з іншими видами біомаси: мікродоростями та волосяним покривом великої рогатої худоби. Спільне зброджування шкіряних відходів та стружки з мікродоростями підвищує ефективність виробництва біогазу. У цьому випадку швидкість виробництва біогазу збільшується із збільшенням співвідношення C: N [12].

Загалом, продемонстровано, що біоекономічні стратегії розвитку України, гармонізовані із планами ЄС, можуть бути ефективно вирішені розвитком та впровадженням технологій переробки відходів шкіряної галузі. Тверді та рідкі відходи шкіряного виробництва містять активні складові, в тому числі білокмісні та жиромісні, що відкриває можливості для біоенергетичних розробок та створенні препаратів для фармацевтичної, біотехнологій та промислової складової економіки України.

#### Список використаних джерел

1. European Commission. Foresight Scenarios for the EU Bioeconomy in 2050.
2. Жалдак М.П., Полюга В.О., Мокроусова О.Р. Запровадження принципів сталої біоекономіки у переробці сировини біогенного походження. Зелена трансформація та стала біоекономіка: моногр. Київ: КНУТД, 2024. С. 383-415.
3. Kanagaraj J., Panda Rames C., Kumar Vinodh M. Trends and advancements in sustainable leather processing: Future directions and challenges—A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2020. 8, 5. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104379>
4. Maistrenko L., Iungin O., Pikus P., Pokholenko I., Gorbatiuk O., Moshynets O., Okhmat O., Kolesnyk T., Potters G., Mokrousova O. Collagen Obtained from Leather Production Waste Provides Suitable Gels for Biomedical Applications. *Polymers*. 2022. 14(21). 4749. <https://doi.org/10.3390/polym14214749>
5. Мокроусова О. Р., Охмат О. А., Маріїн Д. В., А. Кулик А., Сакалова Г. В. Утилізація осадів стічних вод шкіряної промисловості. енергетичні перспективи, *Вісник ВІІІ*, вип. 1, Лют. 2025. с. 51–57. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2025-178-1-51-57>
6. Korol R., Sakalova H. Methanogenesis of waste in technical systems as an energy conservation factor. *Personal. Environ. Is.*, 2022, no.2, P. 22-25. URL: [https://doi.org/10.31652/2786-6033-2022-1\(2\)-22-25](https://doi.org/10.31652/2786-6033-2022-1(2)-22-25).
7. Li Y., Park S.Y., Zhu J. Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 2010, Vol.15, no.1, P. 821-826. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.201007042>.

8. Golub N.B., Shinkarchuk M.B., Shynkarchuk A.V., Xinhua Zh. Y., Kozlovets O. A. Vulnerabilities in the Production of Biogas from the Fat-Containing Tannery Waste. *Innov Biosyst Bioeng.* 2019. Vol.3, no.4, P. 253-260. URL:<https://doi.org/10.20535/ibb201934185425>.
9. Agustini C.B., Da Fontoura J.T., Mella B., Gutierrez M. Evaluating co-substrates to supplement biogas production from tannery solid waste treatment– cattle hair, microalgae biomass, and silicone. *Biofuels. Bioprod. Biorefin.*, 2018, Vol.12, no.6, P.1095-1102. URL:<https://doi.org/10.1002/bbb.1929>.
10. Md. Abdul Moktadir, Jingzheng Ren, Jianzhao Zhou A systematic review on tannery sludge to energy route: Current practices, impacts, strategies, and future directions. *Science of the Total Environment.* 2023. no. 901, P.901166244. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166244>.
11. Muralidharan V., Palanivel S., Balaraman M., Turning problem into possibility: a comprehensive review on leather solid waste intra-valorization attempts for leather processing. *J. Clean. Prod.* 2022. no.367, P.133021. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133021>.
12. Kameswari S.B.K., Kalyanaraman C., Porselvam S., Thanasekaran K. Enhancement of biogas generation by addition of lipase in the co-digestion of tannery solid wastes. *Clean Soil Air Water.* 2011. no.20, P.100040. <https://doi.org/10.1002/clen20100040>

**ФОТОХІМІЧНА ТА ФОТОКАТАЛІТИЧНА ДЕСТРУКЦІЯ ПАРАЦЕТАМОЛУ  
У ВОДІ РІЗНИМИ ОКИСНИКАМИ ПІД ДІЄЮ УФ-ВИДИМОГО СВІТЛА**  
*Швадчина Ю.О., Вакуленко В.Ф.*

*Інститут колоїдної хімії та хімії води ім. А.В. Думанського НАН України, м. Київ*  
[yu.shvadchina@ukr.net](mailto:yu.shvadchina@ukr.net)

**Вступ.** Одночасно з розвитком фармацевтичної індустрії, зростанням об'ємів виробництва та розширенням асортименту фармацевтичних препаратів все частіше фіксується присутність залишків ліків та їх метаболітів в навколишньому середовищі, зокрема, у воді. Так широкий діапазон концентрацій (від десятків нг/дм<sup>3</sup> до десятків мкг/дм<sup>3</sup>) одного з найпоширеніших анальгетиків і жарознижуючих засобів - парацетамолу, був виявлений у водах різного призначення. Максимальна концентрація парацетамолу (ПЦ) в поверхневих водах досягає ~ 100 мкг/дм<sup>3</sup>, що в десять разів перевищує прогнозований параметр концентрації без ефекту (predicted noneffect concentration parameter (PNEC)), який становить 9,2 мкг/дм<sup>3</sup> [1]. Враховуючи токсичність ПЦ та його деяких більш токсичних, ніж він сам, метаболітів для людини та інших форм життя [2, 3], вкрай важливо знизити присутність цього препарату в різних водних екосистемах. Вдосконалені процеси окиснення (AOPs), зокрема, класичний процес фото-Фентона, здатний забезпечити глибоку деструкцію (мініралізацію) багатьох екотоксикантів. Сучасною стратегією щодо розширення можливостей недорогого, простого в експлуатації та ефективного процесу фото-Фентона є використання замість пероксиду водню інших окисників, зокрема, персульфату натрію, який, активуючись під дією джерел випромінювання, генерує потужні сульфат-радикали з перспективними для цього процесу властивостями: меншою залежністю від рН реакції та більш високими окисним потенціалом і коефіцієнтом екстинкції в УФ-А області, порівняно з пероксидом водню, що робить його застосування привабливою альтернативою.

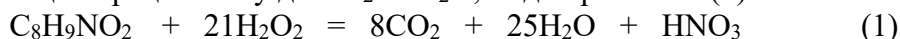
**Мета роботи** – порівняння кінетики та ступеня деструкції фотохімічного та гомогенного фотокаталітичного окиснення парацетамолу у дистильованій воді пероксидом водню та персульфатом натрію при опроміненні УФ-видимим світлом.

**Методика експерименту.** Об'єктом дослідження був комерційний препарат парацетамолу (ацетамінофен, 4-ацетиламінофенол,  $C_8H_9NO_2$ , М.м. = 151 г/моль, рКа = 9,5) (99 %, Китай). Характеристика робочого розчину парацетамолу (ПЦ) в дистильованій воді приведена в табл. 1.

Таблиця 1. Характеристика робочого розчину парацетамолу

C <sub>0</sub> ,		ЗОВ <sub>0</sub> , мг/дм <sup>3</sup>	A <sub>243</sub> , см <sup>-1</sup>	рН
мМ	мг/дм <sup>3</sup>			
0,2	30,2	21,3 ± 0,5	1,97±0,04	6,1±0,2

Фотохімічне та фотокаталітичне окиснення розчинів ПЦ ( $V = 70 \text{ см}^3$ , товщина шару (l) – 1 см) двома окисниками ( $H_2O_2$ ,  $Na_2S_2O_8$ ) проводили при температурі навколишнього середовища ( $19 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ ) на лабораторній установці при опроміненні згори ртутно-кварцовою лампою високого тиску СВД-120, що випромінює світло в ультрафіолетовій і видимій областях ( $\lambda = 200\text{--}700 \text{ нм}$ ), закріпленою на відстані 24 см від поверхні розчину, та перемішуванні магнітною мішалкою протягом 2 год. Вивчення кінетики і порівняння ефективності процесів фотохімічної ( $H_2O_2/УФ$ ,  $S_2O_8^{2-}/УФ$ ) і гомогенної фотокаталітичної ( $Fe^{3+}/H_2O_2/УФ$ ,  $Fe^{3+}/S_2O_8^{2-}/УФ$ ) деструкції парацетамолу проведено без регулювання рН розчинів при низькій  $[Fe^{3+}] = 0,02 \text{ мМ}$  та близьких молярних концентраціях окисників ( $\sim 4,0 \text{ мМ}$ ), орієнтуючись на стехіометричну концентрацію  $H_2O_2$ , необхідну для повної мінералізації парацетамолу до  $CO_2$  та  $H_2O$ , згідно рівняння (1).



В процесі досліджень контролювали зміну наступних параметрів (Р): оптичної густини максимуму поглинання розчину ПЦ в УФ-області ( $A_{243}$ ), яка характеризує розклад його ароматичної структури; концентрацій загального органічного вуглецю (ЗОВ) (ступінь мінералізації), пероксиду водню і персульфату натрію. Спектри поглинання розчину ПЦ реєстрували за допомогою спектрофотометра Shimadzu UV-2450. Концентрацію ЗОВ визначали аналізатором Shimadzu TOC-VCSN. Концентрації  $H_2O_2$  і  $S_2O_8^{2-}$  до та після фотохімічного/фотокаталітичного окиснення розчинів ПЦ визначали спектрофотометричним методом за реакцією з сульфатом титанілу ( $\lambda = 410 \text{ нм}$ ) і за дещо модифікованою методикою [4] ( $\lambda = 400 \text{ нм}$ ), відповідно.

**Результати і їх обговорення.** Встановлено, що саме опромінення УФ-видимим світлом ( $\lambda = 200\text{--}700 \text{ нм}$ ) розчину парацетамолу ( $C_0 = 0,2 \text{ мМ}$ , рН<sub>0</sub> 5,9) протягом 2 год не зменшувало ні інтенсивність максимуму поглинання розчину ( $A_{243}$ ), ні вміст ЗОВ.

$H_2O_2/УФ$ -обробка розчину ПЦ при концентрації  $H_2O_2$ , близькій до стехіометричної ( $\sim 20 \text{ моль/моль}$ ), забезпечувала лише високий ступінь первинної деструкції препарату ( $\sim 97 \%$  за  $A_{243}$  за 2 год), проте ступінь мінералізації був невисоким  $\sim 51 \%$ , як і ступінь розкладу окисника (50 %) (рис. 1, а, криві 1–3). Ефективність первинної деструкції ПЦ, мінералізації та розкладу окисника (95, 50 та 48%, відповідно, за 2 год) в системі  $S_2O_8^{2-}/УФ$  при аналогічній концентрації  $Na_2S_2O_8$  була дуже подібною, з незначними відмінностями у кінетиці мінералізації та розкладу окисників (рис. 1, а, криві 4–6).

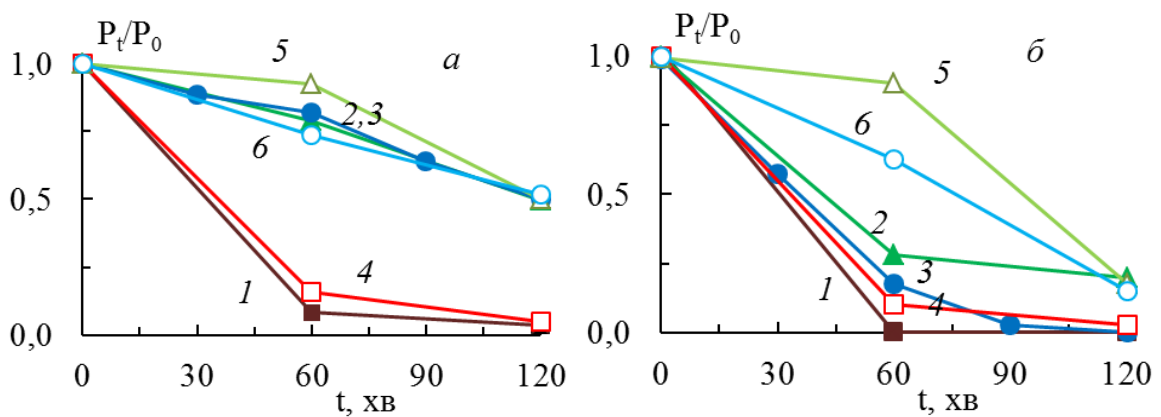


Рисунок 1. Порівняння кінетики деструкції ПЦ за зміною  $A_{243}$  (1, 4), концентрації ЗОВ (2, 5) та розкладу окисника (3, 6) в процесі фотохімічного (а) та гомогенного фотокаталітичного (б) окиснення його розчину  $H_2O_2$  (1–3) та  $S_2O_8^{2-}$  (4–6).

Зважаючи на значні залишкові концентрації обох окисників (~50% через 2 год), досягнення максимального ступеня фотохімічної мінералізації ПЦ за даних умов опромінення потребуватиме значно більшого часу окиснення.

При фотокаталітичному окисненні ПЦ різниця в кінетиці мінералізації та розкладу окисників була дуже суттєвою (рис. 1, б, криві 2 і 5 та 3 і 6). Протягом першої години  $Fe^{3+}/H_2O_2/УФ$ -окиснення ПЦ окисник розклався на 80%, що зменшило концентрацію ЗОВ на 70% за цей період. Значно повільніший розклад  $S_2O_8^{2-}$  (лише 40% за вказаний проміжок часу) в системі  $Fe^{3+}/S_2O_8^{2-}/УФ$  викликав значне гальмування процесу мінералізації реакційної суміші ( $\Delta ZOV \sim 10\%$  через 1 год). Проте, протягом другої години тенденції змінились на протилежні, внаслідок чого ступені мінералізації ПЦ за 2 год були, по суті, однаковими в обох процесах (81–83 %). В той же час кінетика та ступінь первинної деструкції ПЦ (за  $A_{243}$ ) в обох системах ( $Fe^{3+}/H_2O_2/УФ$  та  $Fe^{3+}/S_2O_8^{2-}/УФ$ ) практично не залежала від природи окисника (рис. 1, б, криві 1 і 4).

Порівняння ефективності фотохімічного ( $H_2O_2/УФ$ ,  $S_2O_8^{2-}/УФ$ ) і гомогенного фотокаталітичного ( $Fe^{3+}/H_2O_2/УФ$ ,  $Fe^{3+}/S_2O_8^{2-}/УФ$ ) окиснення ПЦ у дистильованій воді показало, що високий ступінь його первинної деструкції (85–100%) досягався при всіх досліджених процесах незалежно від природи окисника та присутності іонів заліза, і суттєво вищу ефективність фотокаталітичних процесів порівняно з фотохімічними щодо ступеня його мінералізації (рис. 2).

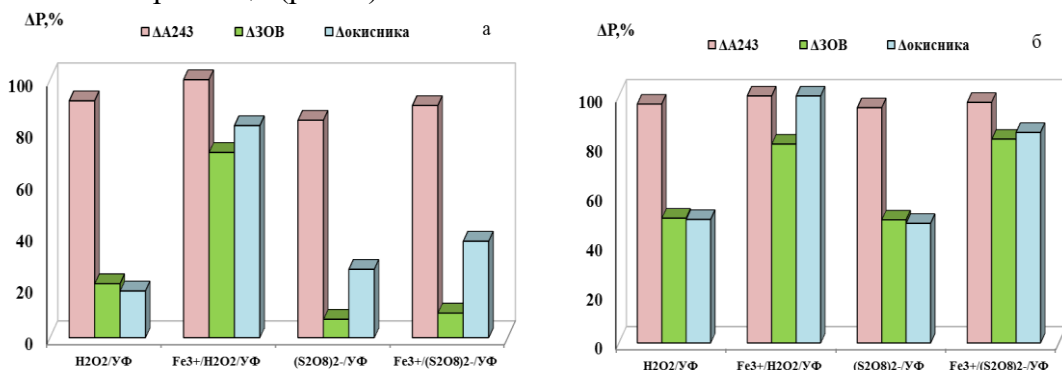


Рисунок 2. Порівняння ступенів фотохімічної ( $H_2O_2/УФ$ ,  $S_2O_8^{2-}/УФ$ ) та фотокаталітичної ( $Fe^{3+}/H_2O_2/УФ$ ,  $Fe^{3+}/S_2O_8^{2-}/УФ$ ) деструкції парацетамолу у воді за зміною різних параметрів (P) – його концентрації за  $A_{243}$  і ЗОВ та розкладу окисників при  $[H_2O_2]_0 = [S_2O_8^{2-}]_0 \sim 4$  мМ за  $t = 1$  (а) і 2 год (б).

Максимальний ступінь фотокаталітичної мінералізації парацетамолу в обох системах ( $\text{Fe}^{3+}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{УФ}$  та  $\text{Fe}^{3+}/\text{S}_2\text{O}_8^{2-}/\text{УФ}$ ) становив 81–83 % за 2 год при питомих дозах окисників  $\sim 20$  моль/моль і ступені їх використання відповідно 100 та 85 % (рис. 2, б). Водночас, порівняння ефективності досліджених АОРs при меншій тривалості окиснення 1 год, достатній для забезпечення лише високого ступеня первинної деструкції ПЦ, вказує на суттєві переваги традиційного процесу фото-Фентона ( $\text{Fe}^{3+}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{УФ}$ ) (рис. 2, а).

Таким чином, при досліджених параметрах фотохімічне і гомогенне фотокаталітичне окиснення парацетамолу персульфатом натрію можна вважати альтернативою аналогічним процесам за участю пероксиду водню.

**Висновки.** Показано суттєві переваги фотокаталітичних процесів ( $\text{Fe}^{3+}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{УФ}$ ,  $\text{Fe}^{3+}/\text{S}_2\text{O}_8^{2-}/\text{УФ}$ ) порівняно з фотохімічними ( $\text{H}_2\text{O}_2/\text{УФ}$ ,  $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}/\text{УФ}$ ) для глибокої деструкції (мінералізації) фармацевтичного препарату парацетамолу у дистильованій воді.

Встановлено близьку ефективність фотокаталітичних систем ( $\text{Fe}^{3+}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{УФ}$ ,  $\text{Fe}^{3+}/\text{S}_2\text{O}_8^{2-}/\text{УФ}$ ), які забезпечують максимальний ступінь мінералізації парацетамолу у дистильованій воді (81–83 % за ЗОВ) при однакових молярних концентраціях окисників, низькій  $[\text{Fe}^{3+}] = 0,02$  мМ і тривалості окиснення 2 год під дією УФ-видимого світла ( $\lambda = 200\text{--}700$  нм).

#### Перелік посилань

1. Avramescu S.M., Fierascu I., Fierascu R.C., Brazdis R.I., Nica A.V., Butean C., Olaru E.A., Ulinici S., Verziu M.N., Dumitru A. Removal of Paracetamol from Aqueous Solutions by Photocatalytic Ozonation over  $\text{TiO}_2\text{-Me}_x\text{O}_y$  Thin Films. *Nanomaterials*. 2022. V. 12. 613. <https://doi.org/10.3390/nano12040613>.

2. Al-Kaf A.G., Naji K.M., Abdullah Q.Y.M., Edrees W.H.A. Occurrence of Paracetamol in Aquatic Environments and Transformation by Microorganisms: A Review. *Chron. Pharm. Sci.* 2017. V. 1. P. 341–355.

3. Phong Vo H.N., Le G.K., Hong Nguyen T.M., Bui X.-T., Nguyen K.H., Rene E.R., Vo T.D.H., Thanh Cao N.-D., Mohan R. Acetaminophen micropollutant: Historical and current occurrences, toxicity, removal strategies and transformation pathways in different environments. *Chemosphere*. 2019. V. 236. 124391. doi:10.1016/j.chemosphere.2019.124391

4. Liang C., Huang C.-F., Mohanty N., Kurakalva R.M. A rapid spectrophotometric determination of persulfate anion in ISCO. *Chemosphere*. 2008. V. 73. P. 1540–1543. doi:10.1016/j.chemosphere.2008.08.043

## НИЗЬКОВАРТІСНІ РІЧКОВІ ПАСТКИ ТА КОШИКИ-ВЛОВЛЮВАЧІ З ПЕРЕРОБЛЕНИХ МАТЕРІАЛІВ: ДИЗАЙН, МОНТАЖ, ЕФЕКТ

*Шварц Р.Р., аспірант,*

*Науковий керівник Глух О.С., доцент, к.х.н., доц.,*

*Ужгородський національний університет, м. Ужгород, Україна*

*ruslan.shvarts@uzhnu.edu.ua*

### Вступ

Потрапляння твердих відходів до водойм в Україні здебільшого пов'язане з ливневою інфраструктурою та виносом сміття з прибережних територій. Низьковартісні механічні рішення — річкові пастки, кошики для ливневих колекторів, бар'єри — дають швидкий і вимірюваний ефект без використання реагентів та складної хімії. Мета статті — узагальнити практики «low-cost/low-tech», показати придатні для громад конструкції з

перероблених матеріалів, описати монтаж, обслуговування й очікуваний екологічний та операційний ефект.

### **Огляд рішень і принцип роботи**

Випускні пастки-сіті (outfall nets) та річкові бар'єри. Сітки на випусках колекторів і плаваючі пастки в спокійних акваторіях перехоплюють сміття безпосередньо на виході зі зливової мережі чи в затоках/каналах. Кейс м. Квінана (Австралія) показав, що навіть кілька сіток на випусках можуть вилучати тонни сміття при низьких капітальних витратах і простому сервісі. [1]

Кошки-влловлювачі (gully/catch-basin baskets) та gross pollutant traps (GPT) це фізичні бар'єри в зоні решіток або в зливоприймачах, що відсіюють «грубі забруднювачі» (здебільшого >5 мм), запобігаючи їх потраплянню у водні об'єкти та подальші очисні споруди. Регуляторні настанови трактують GPT як екранувальні технології першого ешелону в «treatment train», тобто як попереднє механічне вилучення перед іншими етапами очищення. [2][3]

Пастки в акваторіях з елементами циркулярності перехоплюють сміття «на воді», доречні у гаванях, маринах та каналах; вилучений пластик може ставати сировиною для локальних виробів, посилюючи замкнені цикли. [4]

Палітра інтерцепторів варіює від простих сіток у ливневій до великих «водяних коліс» у гирлах струмків; останні демонструють, що інженерні пастки здатні щороку вилучати сотні тонн сміття у великих міських акваторіях. [5]

### **Матеріали та конструкції:**

Каркас і кошик: нержавіючий або оцинкований каркас; кошик із перероблених полімерних сіток/геотекстилю (R-PET, R-PP), що відповідають розмірності осередку 2–5 мм для «full capture» твердих частинок  $\geq 5$  мм (за міжнародними підходами). [3]

Сітками на випусках можуть виступати зносостійкі полімерні або металеві кільця й «панчоха» зі вторсировини; кріплення на фланцях випуску, страхувальний трос. [1]

Плаваючі бар'єри: буї з переробленого пластику, тросова система, «спідниця» із сітки; якірні точки з урахуванням течій і судноплавства. [4]

### **Монтаж і обслуговування**

Передусім досліджено характер зливогого стоку та встановлено «гарячі точки» — дощоприймальні решітки й випуски поблизу парків, ринків і масових зон відпочинку. Тому пріоритет надається саме цим локаціям, де перехоплення дає найбільший ефект. Відтак перевіряється пропускна спроможність, аби уникнути підтоплення під час пікових опадів; на відміну від суто розрахункових підходів, практичні «перевірочні» епізоди після монтажу дозволяють оперативно підкрутити налаштування й графік очищення [2].

Монтаж виконується за принципом «найменшого опору системі»: у ливневій мережі кошки розмішують під решіткою або в горловині зливоприймача, щоб сміття затримувалося якомога ближче до поверхні без шкоди гідравліці. На випусках застосовується фланцеве кріплення з «панчохою»-сіткою та страхувальним тросом; отже, вилучення відбувається безпосередньо на виході зі зливогого колектора [1]. Для відкритих акваторій відтак встановлюють плаваючі бар'єри з буями, тросовою системою та «спідницею»-сіткою, орієнтуючи їх за течіями й судноплавством, — на відміну від точкових рішень у колекторах, такі бар'єри «працюють із потоком» та перехоплюють сміття вже на водній поверхні [4].

Режим обслуговування диктує погода: після сильних дощів цикли стають частішими, у посушливі періоди — рідшими. Досвід м. Квінана показав, що екіпаж із двох осіб проходить типовий маршрут очищення за приблизно чотири години; тому планування логістики доцільно прив'язувати до прогнозів опадів та сезонних піків [1]. Отже, поєднання коректного стартового налаштування (локація, спосіб кріплення, пропускна спроможність)

із гнучким графіком сервісу забезпечує максимальний відбір відходів без ризику підтоплення і з мінімальними простоями інфраструктури [1][2][4].

### **Ефект і показники результативності**

Вилучення маси/об'єму: дві сітки на випусках у Квінани вилучили 1,69 т за перший рік (11 циклів), а сукупно в місті кілька пасток дали >3,6 т за шість років. [1]

Кошики з «full capture» забезпечують відсікання твердих частинок  $\geq 5$  мм; з тоншими вкладишами — додатковий відбір дрібніших фракцій, не знижуючи гідравлічну здатність за умови своєчасного обслуговування. [3]

Циркулярність: регулярне спорожнення пасток з наступним сортуванням і поверненням пластиків у переробку (локальні виробники/матеріали), що підсилює громадську підтримку. [4]

Для великих басейнів доцільні стаціонарні інтерцептори у гирлах малих річок/каналів, які демонструють сотні тонн вилучення на рік і наочні дані для політики зі скорочення відходів. [5]

### **Орієнтовна економіка для громади**

CAPEX (Capital Expenditures - капітальні витрати): кошик-вловлювач у ливневій — низька/середня вартість; сітка на випуску — низька; плавучий бар'єр — середня. Більшість елементів можуть виготовлятися/ремонтуватися з вторинних полімерів (R-PET/PP) місцевими виробниками.

OPEX (Operating Expenditures/Expenses - операційні/експлуатаційні витрати): основні витрати — на виїзди та сортування вмісту пасток (інтегрується з роботою станції заготівлі та освітніми акціями).

Співефекти: зменшення засмічення берегових зон і ливневої мережі, менше аварійних прочисток, можливість обліку «уникнених» витрат.

### **Методика моніторингу**

Показниками виступають маса/обсяг на цикл, частка придатного до переробки, «гарячі години» після опадів, кількість інцидентів переповнення.

Цифровізація: вагові датчики/відеоспостереження для «розумних кошиків», погодна інтеграція й планування виїздів; публічний дашборд для мотивації громади.

Порівняння фракцій у пастках і на станції заготівлі допоможе точково розставляти контейнери та змінювати маршрути мобільних пунктів.

### **Висновки**

Низьковартісні пастки та кошики-вловлювачі — швидкий, безреагентний спосіб зменшити потрапляння сміття у водойми. Вони добре поєднуються з інфраструктурою роздільного збору, підсилюють місцеві ланцюжки переробки та формують «візуальний доказ» ефективності. Кейс-дані з різних країн, а також вимоги до «повного захвату»  $\geq 5$  мм підтверджують їхню результативність і придатність до масштабування під українські реалії.

### **Список використаних джерел**

1. City of Kwinana. **Drainage Nets** (дані про масу вилученого сміття, частоту обслуговування). <https://www.kwinana.wa.gov.au/city-life/protecting-our-environment/drainage-nets>

2. EPA Victoria. **Erosion, sediment and dust: Treatment train** <https://www.epa.vic.gov.au/sites/default/files/epa/publications/1893.pdf>

3. Enviropod. **LittaTrap™ Performance Liners Letter** <https://f.hubspotusercontent10.net/hubfs/7140565/Downloads/Enviropod%20LittaTrap%20Performance%20Liners%20Letter.pdf>

4. CLEAR RIVERS. **Litter traps (Rotterdam)** (щотижневе спорожнення, повторне використання вилученого пластику). <https://www.clearrivers.eu/littertrapsrotterdam>

5. Mr. Trash Wheel. **Trash interception** (масштаб вилучення сміття великими інтерцепторами в міських акваторіях). <https://www.mrtrashwheel.com/trash-interception>

## **ВПЛИВ ОЗОНУВАННЯ ВОДИ НА ВМІСТ ВУГЛЕКИСЛОГО ГАЗУ ТА РОЗЧИНЕНОГО КИСНЮ**

*Щербатюк Т.Г., Хоменко В.Г., Зубакін С.М., Мокроусова О.Р.*

*Київський національний університет технологій та дизайну, Україна, Київ,*

*ТОВ «ОПЕНДА-ПРИВАТПРОМ» Україна, Київ,*

*[shcherbatiuk.th@knutd.edu.ua](mailto:shcherbatiuk.th@knutd.edu.ua)*

Озон широко застосовується в медицині, агропромисловому секторі та різних галузях промисловості, під час вирішення проблеми захисту навколишнього середовища та розроблення екологічно чистих технологій. Завдяки високій реакційній здатності та швидкому розкладанню він займає особливе місце серед традиційних окиснювачів. Проведення озонування за незначної витрати реагенту, нормального тиску і температури, відсутності побічних продуктів, здатних забруднювати речовину, що окиснюється, сприяє спрощенню технологічних процесів, з одного боку, а з іншого – підвищенню їх ефективності [1, 2].

Однак, незважаючи на широке та багато в чому успішне застосування озонування води, частина питань досі залишається не вирішеною. Сформувався фундаментальне розуміння дозозалежних ефектів озонування на живі об'єкти, проте мало робіт із вивчення впливу озону на склад води.

У зв'язку з цим здійснено оцінювання вмісту вуглекислого газу та розчиненого кисню у воді після нетривалого озонування в лабораторних умовах.

### **Матеріали та методи.**

Озонування води здійснювали за допомогою генератора озону, наданого підприємством OZON-PROM від ТОВ «ОПЕНДА-ПРИВАТПРОМ», українським виробником генераторів озону для побутових і промислових сфер застосування (<https://ozon-prom.ua>).

В межах досліджень озонування водопровідної води проводили за температури повітря в лабораторії 17 °С. Температура самої води становила 18 °С. Процес барботування трьох літрів водопровідної води озоном здійснювали протягом 7 хвилин.

Оцінку вмісту вуглекислого газу та розчиненого кисню у воді здійснювали безпосередньо після завершення озонування та через 24 години.

Вміст вуглекислого газу у воді визначали стандартним титриметричним методом із використанням фенолфталеїнового індикатора та розчину карбонату натрію. Концентрацію вільного CO<sub>2</sub> розраховували як добуток об'єму витраченого розчину натрію карбонату на коефіцієнт 10, виражаючи результат у мг/дм<sup>3</sup> води [3].

Кількість розчиненого у воді кисню визначали за допомогою портативного приладу – оксиметра AZ-86021 (DO). Прилад призначений для вимірювання температури й концентрації розчиненого кисню в рідині в межах 0 ~ 30 мг/л (ppm) з точністю 0,1 мг/л.

### **Результати.**

Озонування водопровідної води сприяло суттєвим змінам показників якості води. Так показник вмісту вуглекислого газу у воді знизився у 2,5 рази, а кількість розчиненого у воді кисню підвищилася у 3, 9 рази.

Слід зазначити, що через 24 години після озонування рівень вуглекислого газу у воді залишався нижче контрольних значень водопровідної води без озонування.

Очевидною є потреба подальших досліджень, спрямованих на визначення оптимальних режимів озонування, що дозволить встановити тривалість змін у воді, зумовлених дією озону.

Загалом, отримані результати свідчать, що розроблення відповідних інструкцій зможе суттєво спростити рішення багатьох задач щодо виявлення біологічних ефектів озонованої води та забезпечити науково обґрунтований розвиток методів поліпшення якості питної води.

#### **Література**

1. Щербатюк Т.Г., Андреева О.А. Застосування озонних технологій у рослинництві. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2023. №5. С. 258-262. DOI 10.31891/2307-5732-2023-325-5-258-262

2. Скиба М.Є., Щербатюк Т.Г. Застосування озону у шкіряній промисловості. *Індустрія моди*. 2024. №3. С.41-50. DOI 10.30857/2706-5898.2024.3.2.

3. Загальна хімічна технологія: методичні вказівки до лабораторних робіт для студентів денної та заочної форм навчання/ упор.: В.П. Плаван, І. О. Ляшок. К.: КНУТД, 2017. 39 с.

## **УТВОРЕННЯ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ ПРИ ОЧИСТЦІ СТІЧНИХ ВОД НА МІСЬКИХ ОЧИСНОЇ СПОРУДАХ КАНАЛІЗАЦІЇ ТА СКИДІ В ПРИРОДНІ ВОДОЙМИ**

***Юрченко В.О., Авдієнко І.А., Мельнікова О.Г.***

*Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова,  
Україна, Харків, [Valentyna.Yurchenko@kname.edu.ua](mailto:Valentyna.Yurchenko@kname.edu.ua)*

Вплив на клімат став однією з найважливіших тем сьогодення. Основною проблемою глобального потепління вважають викиди парникових газів, які відіграють вирішальну роль у регулюванні температури та клімату Землі. Це переважно CO<sub>2</sub>, метан (CH<sub>4</sub>), закис азоту (N<sub>2</sub>O), озон (O<sub>3</sub>) та інші гази. Хоча парникові гази виникають і природним шляхом, діяльність людини – спалювання викопного палива, вирубка лісів, сільське господарство та промислові процеси, значно збільшила їхню концентрацію в атмосфері з часів промислової революції. Розуміння джерел та концентрацій ПГ у промисловій діяльності є важливим для розробки ефективних стратегій зменшення впливу на клімат. Після дослідження промислових викидів ПГ слід вжити подальших заходів, включаючи скорочення викидів ПГ, щоб нарешті досягти контролю над глобальним потеплінням [1].

Хоча очищення стічних вод перед скиданням в природні водойми, безсумнівно, є екологічно необхідним, воно також має потенційний вплив на клімат через прямі та опосередковані викиди парникових газів). Експлуатація очисних споруд може створювати парникові гази з кількох джерел. Протягом життєвого циклу очисні споруди виробляють парникові гази на різних етапах, включаючи збір та транспортування стічних вод, первинне та вторинне очищення, обробку осаду та скидання стічних вод [2, 3].

Загалом на сектори водопостачання та водовідведення припадає близько 2,8 % викидів парникових газів, а на викиди N<sub>2</sub>O тільки з очисних споруд – 0,3-1,4%, глобальних

викидів парникових газів. Таким чином, проведення комплексного аналізу вуглецевого сліду для очисних заходів стає необхідним [4, 5].

В рамках сучасних підходів до інвентаризації ПГ та вибору технологій з найменшим екологічним впливом визначення локацій найбільших викидів CO<sub>2</sub> на спорудах біологічної очистки стічних вод, що використовують різні підкатегорії аеробних й анаеробних технологій, має високу актуальність та велике природоохоронне значення.

Метою даного дослідження є кількісна експериментальна й розрахункова оцінка емісії парникових газів, що утворюється внаслідок процесів біологічної очистки стічних вод, на очисних спорудах, які працюють за різними схемами.

Результати досліджень газоповітряного середовища над поверхнею стічної води в механічних та біологічних очисних спорудах свідчать про практично однакові невеликі викиди CO<sub>2</sub> на ділянці денітрифікації, що зумовлено, напевно, низькою турбулентністю водного середовища. Пікові викиди CO<sub>2</sub> були зафіксовані в аеротенку, що пояснюється більш активним окисненням органічних речовин мікроорганізмами до CO<sub>2</sub> у присутності розчиненого кисню та інтенсивністю перемішування й віддувки. Як встановили експериментальні дослідження, концентрація CO<sub>2</sub> в газоповітряній суміші над аеротенком підвищувалась майже в 13 разів (на 0,6 об.%). Над очисними спорудами, які не аерувались, концентрація CO<sub>2</sub> була на рівні його концентрації в атмосферному повітрі.

Серед ПГ закис нітрогену викликає особливо екологічне занепокоєння оскільки є основним руйнівником озону в стратосфері і має потенціал глобального потепління (GWP) в 298 разів більший, ніж вуглекислий газ (CO<sub>2</sub>) за 100-річний період. [4]. Однак наразі викиди N<sub>2</sub>O в більшості кадастрів ПГ занижені через надто спрощені процеси розрахунку викидів з очисних споруд у керівних принципах IPCC

Біологічне очищення міських стічних вод виключно в аеробних умовах не дозволяє максимально ефективно вилучати всі сполуки нітрогену (N<sub>орг</sub>, N-NH<sub>4</sub>, N-NO<sub>2</sub> і N-NO<sub>3</sub>) зі стічних вод. в стічних водах, які скидаються в природні водойми після очистки, спостерігається значний вміст нітратів, що свідчить про високу активність процесів нітрифікації, зумовлених використанням інтенсивної аерації мулової рідини. А процеси денітрифікації теоретично малоактивні через наявність високих концентрацій кисню в водному середовищі.

Таблиця 1 Усереднені дані балансу БСК<sub>п</sub> та сполук нітрогену на дослідженому об'єкті

Показник	Значення на вході в аеротенк	Значення на виході з аеротенка	Видалено
БСК <sub>п</sub> , мгО <sub>2</sub> /л	179,10±27,04	19,93±3,37	159,17
N <sub>к</sub> , мг/л	55,31±6,80	17,68±1,59	37,63
N-NO <sub>3</sub> , мг/л	-	5,52±2,87	-

Спочатку розраховували витрати азоту на асиміляцію активного мула. Для цього спочатку вираховували, скільки видалено органічних сполук за показником БСК<sub>п</sub>., а потім вираховували концентрацію асимільованого азоту за співвідношенням БСК: N =100:5:

$$\Delta \text{БСК} = 179,10 - 19,93 = 159,17 \text{ (мгО}_2\text{/л);}$$

$$159,17 \times 0,05 = 7,96 \text{ (мг/л)}$$

Потім визначили видалення азоту К'ельдаля, а далі вираховували, яка кількість азоту К'ельдаля пішла на нітрифікацію після того, як певна його частина була асимільована:

$$55,31 - 17,68 = 37,63 \text{ (мг/л) ;}$$

$$37,63 - 7,96 = 29,67 \text{ (мг/л).}$$

Розрахували, яка кількість азоту нітратів може утворитись в результаті нітрифікації 24,15 мг/л азоту К'ельдаля (за умови мінералізації азоту органічного) за відомим співвідношенням, що з 1 моля N-NH<sub>4</sub>: утворюється 0,7 моля N-NO<sub>3</sub>

$$29,67 \times 0,7 = 20,77 \text{ (мг/л)}.$$

А на практиці (табл.1) в стічній воді після аеротенка ми виявляємо тільки 5,52 мг/л N-NO<sub>3</sub>. Отже різниця – це азот нітратів, який денітрифікувався в аеротенку (в умовах аерації): 16,91-5,52 = 15,25 (мг/л).

За даними мікробіологічних досліджень в середньому 12% цього азоту може перетворитися на закис азоту

$$11,39 \times 0,12 = 1,83 \text{ (мг/л)}.$$

Таким чином, за умови повної віддувки утвореного закису азоту коефіцієнт викидів N<sub>2</sub>O (%) на досліджених спорудах дорівнює:

$$(N - N_{2O} / N_{\text{зар}}) 100 = + (1,83 / 55,31) 100 = 3,24 \text{ (\%)}.$$

Ці дані збігаються з результатами вимірювань, виконаних на діючих біологічних очисних спорудах, виконаних в різних країнах світу: від часток відсотку до 25%.

Розрахунок викидів N<sub>2</sub>O і CO<sub>2</sub>, що утворюються на очисних спорудах під час скиду очищених стічних вод у природні водойми, виконували за рівняннями, рекомендованими IPCC:

$$N_{2O_{bio,i}} = EF_{bio,N_{2O,j}} * TN_{in,i} * 265 \quad (1)$$

$$CO_{2_{bio,i}} = EF_{bio,CO_{2,j}} * COD_{removed,i} \quad (2)$$

де N<sub>2O<sub>bio,i</sub></sub> та CO<sub>2<sub>bio,i</sub></sub> — це викиди N<sub>2</sub>O та CO<sub>2</sub> (г CO<sub>2</sub> екв/рік) від біологічного очищення на ОС; EF<sub>bio, N<sub>2</sub>O,j</sub> (г N<sub>2</sub>O/кг TN) та EF<sub>bio, CO<sub>2</sub>,j</sub> (г CO<sub>2</sub>/кг вилученого ХСК) — відповідні коефіцієнти викидів для традиційного процесу – 25 і 560, процесу АО – 25 і 365,8. TN<sub>in,i</sub> — річна маса загального азоту у вхідному потоці (кг/рік), COD<sub>removed,i</sub> — річна кількість вилученого ХСК (кг/рік) 265 — коефіцієнт перерахунку N<sub>2</sub>O в CO<sub>2</sub>-еквівалент.

Викиди парникових газів з природних водойм розраховують за формулами:

$$N_{2O_{eff,i}} = EF_{eff,N_{2O,j}} * TN_{out,i} * 265 \quad (3)$$

$$CO_{2_{eff,i}} = EF_{eff,CO_{2,j}} * COD_{out,i} \quad (4)$$

Де N<sub>2O<sub>eff,i</sub></sub> та CO<sub>2<sub>eff,i</sub></sub> — це викиди N<sub>2</sub>O та CO<sub>2</sub> (г CO<sub>2</sub> екв/рік) від шляху скиду; EF<sub>eff, N<sub>2</sub>O,j</sub> (г N<sub>2</sub>O/кг TN на виході) та EF<sub>eff, CO<sub>2</sub>,j</sub> (г CO<sub>2</sub>/кг COD на виході) — це коефіцієнти викидів для шляху скиду (відповідно – 7,9 і 570); COD<sub>out,i</sub> (кгCOD вихід/рік) та TN<sub>out,i</sub> (кг TN вихід/рік) — це маси ХСК та N<sub>зар</sub> на виході за рік.

Таблиця 2 Порівняння питомих викидів парникових газів з МОСВ№2 м. Харків та на досліджуваному об'єкті в Німеччині.

Схема, за якою працюють очисні споруди	Питомий викид парникових газів, тCO <sub>2</sub> екв/м <sup>3</sup> СВ			
	Під час очистки стічних вод		Після скиду СВ у водний об'єкт	
	N <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>
Традиційна	0,00033	0,0002	0,00007	0,00003
АО	0,0002	0,0001	0,000019	0,00001

Як видно, за потенціалом глобального потепління в викидах парникових газів, як з очисних споруд, так і з природних водойм після скиду очищених стічних вод переважає закис азоту. Питомі викиди парникових газів під час очистки стічних вод на Харківських ОС перевищують відповідні показники досліджуваного об'єкта в Німеччині приблизно у 2–2,5 рази. Після скиду очищених стоків у водний об'єкт різниця у викидах залишається

суттєвою: питомі викиди N<sub>2</sub>O у Харкові перевищують німецькі приблизно у 3,7 раза, а CO<sub>2</sub> – у 3 раза, що підтверджує нижчу ефективність технологічних процесів та більший негативний екологічний вплив.

### Література

1. Bani Shahabadi, M., Yerushalmi, L., & Haghghat, F. (2009). Impact of process design on greenhouse gas (GHG) generation by wastewater treatment plants. *Water Research*, 43(10), 2679–2687.
2. Nguyen T. K. L., Ngo H. H., Guo W., Chang S. W., Nguyen D. D., & Nghiem L. D. (2019). Insight into greenhouse gases emissions from the two popular treatment technologies in municipal wastewater treatment processes. *Science of the Total Environment*, 1302.
3. IPCC. (2019). 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland.
4. Wang X. (2020). *Energy Consumption, Chemical Use and Carbon Footprints of Wastewater Treatment Alternatives: Assessment Methodology and Sustainability Solutions*. Springer Singapore. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-981-13-5983-5>.
5. Schneider A. G., Townsend-Small A., & Rosso D. (2015). Impact of direct greenhouse gas emissions on the carbon footprint of water reclamation processes employing nitrification–denitrification. *Science of The Total Environment*, 505.

Наукове видання

**ЧИСТА ВОДА.  
ФУНДАМЕНТАЛЬНІ, ПРИКЛАДНІ ТА  
ПРОМИСЛОВІ АСПЕКТИ**

Матеріали ІХ Міжнародної  
науково-практичної конференції,  
присвяченої 25-річчю факультету  
біотехнології і біотехніки

20-21 листопада 2025 р.,  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

*Тези доповідей учасників конференції  
подаються в авторській редакції*