

М. Г. ЗИНЧЕНКО, Н. О. БУКАТЕНКО, Я. Т. МІСИК

РЕЦИКЛІНГ ПОБУТОВИХ ТА ПРОМИСЛОВИХ СТІЧНИХ ВОД З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ ВЕРМІФІЛЬТРАЦІЇ

Однією з найбільш масштабних проблем сучасності є дефіцит прісної води, що наростає. За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я до середини 21 століття половина жителів планети відчуватиме гостру нестачу прісної води. Одночасно зі зростаючим споживанням чистої води зростає і обсяг стічних вод комунальних, сільськогосподарських і промислових підприємств. При цьому обсяги води, що щорічно використовуються, більш, ніж на порядок перевищують обсяги стічних вод, що очищаються. Неочищені стічні води характеризуються високим вмістом органічних домішок та хвороботворних мікроорганізмів, здатних викликати захворювання, небезпечні для життя людини. У зв'язку з викладеним надзвичайно важливим завданням є забезпечення ефективного очищення стічних вод від забруднень з подальшим рециклінгом очищених стоків – повторним їх використанням для інших цілей: в оборотній системі промислових підприємств, системах сільськогосподарського та ландшафтного зрошення. З цього погляду великий інтерес викликає процес верміфільтрації – очищення стічних вод з використанням дощових черв'яків. Технологія заснована на здатності черв'яків працювати, як «біофільтри». Черв'яки поглинають органічні та неорганічні поллютанти зі стічних вод, перетравлюють їх і виділяють у вигляді своїх екскрементів (копролітів) у навколишнє середовище. При такій переробці відбувається очищення, дезінфекція, детоксикація стічних вод; очищені стоки придатні для повторного використання. Також відбувається трансформація органічних та неорганічних компонентів стічних вод у вермикомпост, що має властивості органо-мінерального добрива, та біомасу дощових черв'яків, яка може служити сировиною для кормової та фармацевтичної промисловості.

Ключові слова: стічні води; біотехнологія; очищення; верміфільтрація; дощові черв'яки; вермикомпост

M. G. ZINCHENKO, N. O. BUKATENKO, Y. T. MISYK

RECYCLING OF DOMESTIC AND INDUSTRIAL WASTEWATER USING VERMIFILTRATION TECHNOLOGY

One of the biggest problems of our time is the growing shortage of fresh water. According to the World Health Organization, by the middle of the 21st century, half of the planet's inhabitants will experience an acute shortage of fresh water. Simultaneously with the growing consumption of clean water, the annual volume of wastewater from municipal, agricultural and industrial enterprises also increases. At the same time, the volume of water used annually is more than an order of magnitude higher than the volume of treated wastewater. Untreated wastewater is characterized by a high content of organic impurities and pathogenic microorganisms capable of causing diseases that are dangerous for human life. In connection with the outlined extremely urgent task is to ensure effective purification of wastewater from pollution with subsequent recycling of purified effluents - their reuse for other purposes: in the circulating system of industrial enterprises, agricultural and landscape irrigation systems. From this point of view, the process of vermifiltration - wastewater treatment using earthworms - is of great interest. The technology is based on the ability of worms to work as "biofilters". Worms absorb organic and inorganic pollutants from wastewater, digest them and release them in the form of their excrement (coprolites) into the environment. With such processing, wastewater is cleaned, disinfected, and detoxified; treated effluents are suitable for reuse. There is also a transformation of organic and inorganic components into organo-mineral fertilizer - vermicompost and biomass of earthworms, which can serve as raw materials for the fodder and pharmaceutical industry.

Key words: wastewater; biotechnology; purification; vermifiltration; earthworms; vermicompost

Вступ. Щорічна витрата води на земній кулі за всіма видами водопостачання становить 3300-3500 км³, причому близько 70% використаної води йде в систему каналізації у вигляді стоків. Неочищені стічні води представляють глобальну проблему для водних ресурсів та здоров'я людей. Саме тому розробка та застосування сучасних технологій переробки стічних вод є невід'ємною частиною сталого розвитку суспільства. Важливим етапом у переробці стічних вод є їхнє подальше використання. Очищені стоки можна застосовувати для промислових потреб, а при правильному знезараженні та обробці використовувати як питну воду.

Для очистки стічних вод широко використовують фізичні, хімічні та біологічні методи, які є енергетично витратними, дорогими в установці та обслуговуванні; до того ж їх використання зазвичай пов'язано з утворенням осаду та надлишкового активного мулу, що вимагає застосування спеціального обладнання для їх

переробки та зберігання і приводить до вторинного забруднення навколишнього середовища.

Отже, використання існуючих методів очистки стоків не дозволяє зробити замкнутий технологічний цикл переробки забруднених стічних вод. У зв'язку з цим особливо актуальними стають спеціальні технології, здатні забезпечити якість очищеної води, придатної для повторного використання та водночас бути економічно привабливими.

Найбільше цим вимогам відповідає верміфільтрація - новий біологічний метод очищення стічних вод, також відомий під терміном "люмбрифільтрація". Верміфільтрація є продовженням вермікомпостування твердих відходів; це інженерна система, в якій вдало поєднуються два процеси: біофільтрація та вермікомпостування, тобто спільне використання аеробних мікроорганізмів у складі біофільтру та дощових черв'яків у складі верміфільтру. По суті верміфільтр є різновидом біофільтру, але з додаванням дощових черв'яків для підвищення

ефективності очищення. У системі верміфільтра мікроби здійснюють біологічну деградацію відходів, а дощові черв'яки розкладають та гомогенізують матеріал насадки біофільтра, тим самим збільшуючи площу поверхні для дії мікробів. Насадкою біофільтра можуть бути різні матеріали-носії для біоплівки: деревна стружка, тирса, великий пісок, керамзит, гравій, а також пористі матеріали (шлак, пемза) щільністю 500-1500 кг/м³ і пористістю 40-50%. Для здійснення процесу очистки стічні води подаються на поверхню верміфільтра, просочуються під дією сили тяжіння через шар верміфільтра, потім через шари біофільтра і, нарешті, очищена вода збирається на дні пристрою та видаляється з установки. Розчинені колоїдні та завислі тверді частинки затримуються у верхній частині шару верміфільтра. переробляються дощовими черв'яками у вермікомпост, а поллютанти, що залишилися в стічних водах після проходження верхнього шару, піддаються біодеградації ґрунтовими мікробами, які іммобілізовані у біофільтрі. Життєдіяльність дощових черв'яків сприяє поглинанню зі стічних вод мулистий та глинистої фракцій, виділяючи їх у складі гранульованих копролітів, що збільшує «гідралічну провідність» усієї системи [1].

Черв'яки здатні видаляти до 90 % БСК, 80 % ХСК, і 90-95 % завислих речовин стічних вод, проковтуючи їх та поглинаючи органічні сполуки через стінки свого тіла Ферменти, що виробляються черв'яками, розкладають хімічні речовини домішок стічних вод, які не розкладаються мікробами. Також за рахунок дії ферментів кишечника дощових черв'яків відбувається знищення патогенів (тотальних коліформ, стрептококів, сальмонел, E. coli). до рівня, що відповідає рекомендаціям Всесвітньої організації охорони здоров'я щодо безпечного повторного використання води у виробництві [2].

Отже, технологія верміфільтрації здатна забезпечити високу якість очищеної стічної води. Технологія екологічна, оскільки виключає утворення осадів та виділення шкідливих газів. Вона також економічно приваблива, оскільки в процесі верміфільтрації утворюються цінні продукти, які можуть бути реалізовані.

Мета статті – надати інформацію щодо технології верміфільтрації – інноваційної технології очистки стічних вод, яка знайшла широку популярність у багатьох країнах світу, але практично невідома в Україні; представити переваги її впровадження в нашій країні.

Стан та перспективи розвитку технології верміфільтрації у світі

Вперше експеримент із використанням черв'яків у складі краплинних біофільтрів провів Hartenstein із співробітниками у 1984 році [3]. Було показано, що компостний черв'як *Eisenia fetida* та африканський нічний виповзок *Eudrilus eugeniae*

суттєво покращують ефективність роботи біофільтру при очищенні стічних вод.

Термін "верміфільтрація" (*vermis* – черв'як (лат.)) був вперше запропонований професором Jose Toha (Чілі) у 1992 році [4]. На той час ця технологія була випробувана для очищення міських стічних вод і відходів свинарства та показала хороші результати. Пізніше вона була прийнята для очищення різних промислових та побутових стічних вод і набула популярності переважно в країнах з теплим кліматом.

В останні роки відзначено появу значної кількості нових досліджень, спрямованих на вивчення можливості використання вермікультури для очищення стічних вод різного походження та складу, а також визначення впливу біологічних (види та кількість черв'яків, склад фільтруючого середовища) та гідравлічних параметрів (гідравлічне навантаження, час гідравлічного утримування) процесу на ефективність очистки.

Одним з найважливіших параметрів для підтримки оптимальних рівнів температури, аеробних умов та вологості у системі верміфільтра є гідравлічне навантаження потоку стічних вод на поверхню фільтру. Підтримка оптимальних технологічних параметрів у верміфільтрі забезпечує сприятливі умови існування дощових черв'яків. Китайські вчені [5] встановили, що навантаження від 2,4 до 6,0 м³ стічних вод на м² на день практично не впливало на щільність і біомасу черв'яків. Однак при подальшому збільшенні гідравлічного навантаження чисельність дощових черв'яків поступово зменшувалася і за показника 6,7 м³/м² на добу знижувалася на одну третину; при цьому у них порушувалися дихальні функції. Автори вважають, що для забезпечення сприятливих умов проживання дощових черв'яків у зоні верміфільтра гідравлічне навантаження має бути менше 6,7 м³/м²/добу.

Гідравлічне навантаження також впливає на час контакту стічних вод з біоплівкою: більш висока швидкість гідравлічного навантаження призводить до зменшення часу утримання стічних вод у шарі верміфільтра і, отже, зниженню ефективності їхнього очищення [6].

Більшість досліджень процесу верміфільтрації проведено з використанням дощових черв'яків виду *Eisenia fetida*. Спроба використати інші види черв'яків у процесі очищення міських стічних вод показала, що черв'яки виду *Perionyx sansibaricus* та *Perionyx excavatus* виявляють високу активність, забезпечуючи зниження вмісту розчинених речовин на 88,6%, зважених речовин – на 99,8 %, нітратного азоту - на 92,7 % фосфору – на 98,3 %, ХСК – на 90 % [7] тоді як черв'яки виду *Eudrilus eugeniae* гинуть ще до кінця процесу [8].

Одним із ключових факторів процесу верміфільтрації є температура, оскільки її коливання призводить до зміни активності дощових черв'яків. У роботі [9] вивчали вплив

сезонної температури на ефективність обробки стоків та видалення патогенів. Повідомляється, що більш ефективне зниження БСК та ХСК досягається в літній період за середньої температури 26-27 °С. Ця температура є оптимальною для зростання, активності та розмноження дощового черв'яка виду *Eisenia fetida*, а будь-яке відхилення від неї призводить до зниження ефективності обробки стоків і чисельності черв'яків. Ефективність видалення патогенів з підвищенням температури збільшується: при 38-40 °С спостерігається зниження кількості сальмонел на 96,9 %, кишкової палички на 99,3 %.

Вплив зимових температур на активність дощових черв'яків вивчали у роботі [10]. Було показано, що температура в насадці верміфільтра взимку була на 1-5 °С вищою, ніж у навколишньому середовищі. В цих умовах здатність дощових черв'яків до поглинання та перетравлення органічних відходів стічних вод складала близько 1/3 від такої в літній період при однаковому гідравлічному навантаженні, а швидкість видалення забруднюючих речовин була вдвічі нижчою за таку в літній період. Звідси слідує висновок, що в зимовий період верміфільтр потрібно утеплювати.

Фільтруючий матеріал верміфільтра має подвійне призначення: утримувати завислі тверді речовини на своїй поверхні та забезпечувати середовище проживання, сприятливе для існування популяції компостних черв'яків і мікроорганізмів. Площа поверхні та пористість цих фільтруючих матеріалів впливають на ефективність очищення. Матеріали з низькою гранулометриєю (дрібні частинки) та великою площею поверхні можуть повисити продуктивність верміфільтру, але утруднити дренаж стічних вод. Садовий ґрунт у певній кількості повинен бути використаний в установці верміфільтрації як місце існування черв'яків. Крім того, він є найбільш підходящим субстратом для нітрифікуючих бактерій (*Nitrobacteraceae*, *Nitrosomonas*, *Nitrosococcus*), які окислюють аміак, що утворюється в процесі гниття органічних речовин, до нітритів та нітратів [11]. Дослідження різних природних матеріалів, таких як річковий пісок, деревне вугілля, скляні кульки як фільтруючий матеріал для верміфільтра показали, що найбільш високою була ефективність зниження ХСК, БСК та зважених частинок на насадці з річкового піску, відповідно 96 %, 89 % та 90 % [12]. Автори дійшли висновку, що результати дослідження можуть бути використані на різних децентралізованих установках для очищення стічних вод.

Дослідження ефективності верміочистки стічних вод проводилися як для муніципальних, так і для промислових стічних вод. Так у роботі [13] проведено дослідження з очищення токсичних стічних вод нафтової промисловості. Показано, що

черв'яки *Eisenia fetida* не тільки вижили в нафтовому середовищі, а й очистили темно-коричневі стічні води з різким запахом до блідо-жовтої води без запаху, що вказує на зникнення всіх токсичних вуглеводнів. Вуглеводні C10-C14 були відновлені дощовими черв'яками на 99,9 %, C15-C28 на 99,8 % і C29-C36 на 99,7 %.

Позитивні результати були отримані у процесі очищення стічних вод промислових підприємств молочної промисловості [14]. Відходи цих підприємств містять велику кількість завислих речовин, а також органічних домішок у розчиненому та колоїдному стані. Дощові черв'яки за п'ять днів знижували показники по БСК більш ніж на 98 %, ХСК - на 95 %, зменшували загальний вміст розчинених речовин на 90-92 %, вміст зважених твердих речовин - на 90-95 %. Очищена вода могла використовуватися повторно для іригації.

У роботі [15] проведено аналіз результатів досліджень процесу верміфільтрації останнього десятиліття, який показав широкі можливості застосування цієї технології. Особливо відзначено її ефективність для очищення сильнозабруднених стічних вод (ХСК \geq 92 г/л, БСК \geq 25 г/л): при оптимальних параметрах процесу ступінь очищення становить відповідно 89% і 91%. Показано, що існує можливість застосування технології для зниження концентрації важких металів – Zn, Pb, Cr, Cu – при комбінуванні очищення побутових стічних вод та органічної фракції твердих побутових відходів. Автори також підкреслили екологічність методу порівняно з іншими методами очистки стічних вод. За рахунок того, що дощові черв'яки створюють у фільтраційному шарі аеробне середовище, пригнічується розвиток анаеробних мікроорганізмів, що виробляють парникові гази. Завдяки цьому у верміфільтрі припиняється утворення та викид цих газів в атмосферу.

Отже, численні публікації свідчать про високий рівень знань та ступінь практичного освоєння технології верміфільтрації в багатьох країнах. На думку провідних зарубіжних фахівців [16, 17] верміфільтрація є однією з найбільш перспективних технологій для масового впровадження в найкоротші терміни.

Системи верміфільтрації для очищення стічних вод не потребують складного та дорогого обладнання.

Основні принципи конструювання систем верміфільтрації зводяться до наступного [18]:

1. Фільтруючий матеріал складається з кількох шарів, розмір часток яких зазвичай збільшується з глибиною. Ці шари можуть бути мінеральними (пісок, гравій, пористі матеріали (шлак, пемза)) або органічними (компост, кора, тирса).

2. Додатковий верхній фільтруючий шар (верміфільтр) включає органічний субстрат або ґрунт, що містить популяцію дощових черв'яків,

таких як *Eisenia fetida*, *Eisenia andrei*, *Perionyx sansibaricus* або *Lumbricus Rubellus*.

3. Стічні води подаються у верхню частину фільтра за допомогою розподільчої системи, просочуються через матеріал, що фільтрує, покритий біоплівкою, утвореною колоніями мікроорганізмів. Дощові черв'яки живляться мікробною біомасою, твердими та колоїдними речовинами, що містяться у стічних водах.

4. Очищені стічні води збираються в нижньому шарі гравію або в окремому відстійнику, звідки вони можуть бути спрямовані на скидання, подальшу обробку або повторне використання.

5. Фільтруючі шари не вимагають особливого догляду, оскільки популяція дощових черв'яків підтримує мережу каналів по всьому середовищу. У поверхневому шарі, що фільтрує, з часом накопичуються капроліти дощових черв'яків, які необхідно періодично видаляти для використання в якості біогумусу у сільському господарстві або садівництві.

6. Системи верміфільтрації не вимагають зовнішнього джерела живлення, хоча для подачі води до розподільчих пристроїв можуть використовуватися насоси.

Верміфільтри можуть експлуатуватися як одиночні агрегати або в системі послідовно комунікованих між собою фільтрів (самопливних чи насосних), залежно від ступеня забруднення стічних вод та необхідної якості очищеної води (рис. 1) Більша кількість верміфільтрів у системі може підвищити ступінь очищення, оскільки у багатоступінчастих системах збільшується загальний обсяг аеробної зони, що створюється черв'яками. Пересуваючись по субстрату, черв'яки його розривають, утворюють проходи, заповнені повітрям. Стабільні аеробні умови всередині шару, що фільтрує, сприяють розвитку мікроорганізмів, що здійснюють процеси нітрифікації амонію і окислення органічних речовин і забезпечують зниження ХСК у стічних водах.

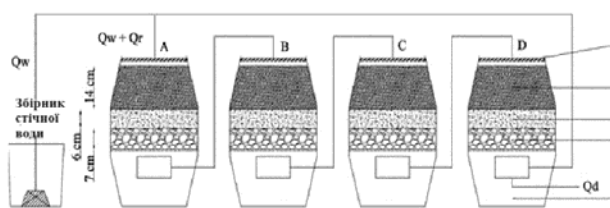


Рисунок 1 – Ступінчаста система верміфільтрів

Q_w – вихідний потік стічних вод; Q_r – зворотний потік води на додаткову очистку; Q_d – очищена вода

Також у аеробному середовищі, що утворюється, пригнічується діяльність анаеробних мікробів, що викликають процеси гниття, тому процес верміфільтрації не супроводжується

виділенням смердючих газів, що також є важливою перевагою технології верміфільтрації [19].

Установка кількох агрегатів послідовно може розглядатися як альтернатива централізованим системам водовідведення, прийнятим у більшості країн світу. З урахуванням того, що багато невеликих міст і селищ не можуть дозволити собі створювати та обслуговувати дорогі станції очищення стічних вод, децентралізовані системи знаходять все більше визнання фахівців [20].

Так, у Франції на основі запатентованого способу обробки побутових та агропромислових стічних вод за допомогою технології верміфільтрації [21] розроблено проект Resyclaqua очищення стічних вод від передмістя Монпельє з населенням 2000 осіб.

Триступенева система верміфільтрації з використанням дощового черв'яка *Eisenia fetida* випробовувалась протягом тривалого періоду для очищення побутових стічних вод у сільській місцевості та показала наступну ефективність: хімічна потреба у кисні – 81,3 %; амоній 98 %; загальний азот (нітрати) – 60,2 %, загальний фосфор – 98,4 % [22].

Інноваційне рішення для виробництва чистої води високої якості було запропоновано у рамках Європейського проекту Horizon 2020 (Project European Union's Horizon 2020) [23]. Комплексна установка включає біологічні та фізико-хімічні очисні модулі; стічна вода послідовно проходить верміфільтр (люмбрифільтр), фільтр з дафніями, ультрафіолетову або біосонячну (biosolar) систему очищення (рис.2).



Рисунок 2 - Комплексна установка очищення стічних вод

Система призначена для невеликих та середніх населених пунктів. Технологія пройшла випробування на пілотних установках в Ірландії та Іспанії (університет Жирони). Якість очищеної води відповідає вимогам Рамкової директиви Європейського парламенту з водних ресурсів. Регенерована та дезінфікована вода може бути спрямована на повторне використання або спущена у природні прісноводні водойми.

Переваги технології верміфільтрації

Технологія очищення стічних вод методом верміфільтрації має значні переваги перед традиційними аеробними технологіями, а саме: низькі інвестиції, низькі експлуатаційні витрати при високому ступені очищення.

До переваг системи верміфільтрації відноситься також те, що вона може бути встановлена децентралізовано, на місці утворення

стічних вод, що дозволить знизити навантаження на станцію очищення стічних вод. При цьому очищена вода не містить патогенних мікроорганізмів і токсичних хімікатів і придатна для використання у системі замкнутого водопостачання підприємства, що дозволяє економити значні обсяги прісної води. Повторне використання верміфільтрованої води, вермікомпоста як органічного добрива та біомаси компостних черв'яків як білкового корму для тварин дає можливість частково компенсувати витрати на цю технологію та підвищити її рентабельність. Важливо відзначити також, що процес верміфільтрації проходить без утворення побічних продуктів – осадів стічних вод і поганопахучих газів, що відрізняє його від традиційних способів очищення стічних вод і робить більш екологічним.

Обмеження технології верміфільтрації: незважаючи на значні переваги перед відомими аеробними технологіями, існують деякі обмеження для широкого застосування технології верміфільтрації у практиці очистки стічних вод. Це пов'язано з кількома причинами, а саме:

- досі не проводилися великомасштабні та довгострокові випробування, безперервний моніторинг процесу в польових умовах із очищенням реальних стічних вод. Більшість досліджень проведено у лабораторних та пілотних масштабах;

- не проведені тривалі систематичні дослідження впливу очищеної верміфільтрованої води на зростання та врожайність сільськогосподарських культур;

- неможливо використовувати верміфільтраційні установки для очищення стічних вод підприємств, що працюють сезонно (заводи виробництва цукру, кемпінги, літні табори), оскільки зупинка верміфільтрів призводить до загибелі мікрофлори, іммобілізованої на субстраті біофільтра.

Висновки

Очищення та повторне використання стічних вод – один з основних напрямків боротьби з глобальною водною кризою. Серед усіх існуючих зелених технологій верміфільтрація займає особливе місце завдяки великим перевагам, таким як децентралізація, утворення високоцінних кінцевих продуктів, і може розглядатися як нова парадигма очищення стічних вод.

Завдяки своїй простоті та економічній ефективності технологія верміфільтрації відкрила нові можливості для очищення стічних вод у країнах, що розвиваються, а також у малих та середніх віддалених європейських населених пунктах, що мають обмежені ресурси. Багато країн, таких як Чилі, Мексика, Венесуела, Індія, Бразилія вже впровадили цю систему у промислових масштабах. Знайшла застосування ця технологія

також у Австралії, Китаї, деяких європейських країнах (Франція, Португалія).

В Україні до сих пір не приділялося уваги цьому інноваційному методу очистки стічних вод, незважаючи на те, що в нашій країні давно і добре розвинені технології вермікомпостування та вермікультивування: ще у вісімдесятих роках минулого сторіччя в Івано-Франківську була створена перша у колишньому радянському союзі асоціація «Біоконверсія», яка займалась промисловим вермікультивуванням. Ця асоціація існує і дотепер.

Верміфільтраційна технологія очистки стічних вод безумовно, заслуговує уваги відчизняних біотехнологів. Вважаємо, що враховуючи високий світовий рівень технічних знань про процес верміфільтрації, багатий власний досвід використання вермікультури українські фахівці зможуть запровадити технологію верміфільтрації в нашій країні вже найближчим часом.

Список літератури

1. Arora S. The effect of seasonal temperature on pathogen removal efficacy of vermifilter for wastewater treatment / S. Arora, A. A. Kazmi // [Water Research](#). 2015. Vol.74. P.88–99. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.02.001>
2. Lourenço N. Optimization of a vermifiltration process for treating urban wastewater./ L.M. Nunes, N. Lourenço// *Ecological Engineering*. 2017. Vol.100, P.138-146. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.11.074>
3. Hartenstein R., Earthworms and trickling filters. / R. Hartenstein, D.L Kaplan, E.F. Neuhauser // *J. Water Pollution Control Federation*. 1984. Vol. 56. № 3, P. 294-298. <http://www.jstor.org/stable/25042220>
4. Sinha R.K., Vermiculture revolution. / R.K Sinha, D. Valani // *The Technological Revival of Charles Darwin's Unheralded Soldiers of Mankind*: Nova Sci. Pub. Inc., 2011. 328 p.
5. Yang, J. Ecological and physiological adaptabilities of earthworm in vermifilter under different hydraulic loading. / J. Yang, L.M. Zhao, Q.Y. Chen., D.H Yi // *Journal of Tongji University*. 2009. Vol. 8. P. 1049–1055.
6. Kumar, T., Evaluation of the vermifiltration process using natural ingredients for efficient wastewater treatment / T. Kumar, R., Bhargava, Prasad, KSH, V. Pruti, // *Ecol. English – 2015. –Vol. 75. – P. 370–377.* <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.11.044>
7. Tomar P. Urban wastewatertreatment using vermibiofiltration system / P. Tomar, S. Suthar // *Desalination*, 2011, Vol. 28. P 95-103 <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.09.007>
8. Kumar T. A comparative study on vermifiltration using epigeic earthworm *Eisenia fetida* and *Eudrilus eugeniae* / T. Kumar, A. Rajpal, S. Arora, R. Bhargava, Hari K.S. Prasad, A.A Kazmi. // *Desalination and Water Treatment*. 2016. Vol. 57. № 14. P. 6347-6354. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1010230>
9. Arora S., The effect of seasonal temperature on pathogen removal efficacy of vermifilter for wastewater treatment / S Arora, A.A. [Kazmi](#) // [Water Research](#). 2015. Vol.74, P.88-99. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.02.001>

10. Yang J. Analysis on the performance of vermifilter at low temperature in winter / J. Yang, S. Zhang, J. Yang, Z. Lu // In: ICEET-2009. International Conference on 16–18 Oct. 2009 / Energy and Environment Technology. – 2009. – Vol.3.– P. 193–197 <https://doi.org/10.1109/ICEET.2009.512>
11. Sinha R.K. Vermiculture revolution. The Technological Revival of Charles Darwin's Unheralded Soldiers of Mankind / R.K Sinha, D.Valani - Nova Sci. Pub. Inc., 2011. 328 p.
12. Kumar T. Performance Evaluation of Vermifilter at Different Hydraulic Loading Rates Using River Bed Material / T. Kumar, A. Rajpal, R. Bhargava, K.S.H. Prasad // Ecological Engineering. 2014. Vol. 62. P 77-82. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.10.028>
13. Sinha R.K. Earthworms: nature's chemical managers and detoxifying agents in the environment: an innovative study on treatment of toxic wastewaters from the petroleum industry by vermifiltration technology / R.K. Sinha, V. Chandran, B.K. Soni, U. Patel, A. Ghosh // Environmentalis. 2012. Vol. 32. P. 445–452 <https://doi.org/10.1007/s10669-012-9409-2>
14. Sinha R.K. Removal of high BOD and COD loadings of primary liquid waste products from dairy industry by vermifiltration technology using earthworms / R.K. Sinha ,G.Bharambe, P. Bapat // Indian Journal of Environmental Protection. 2007. Vol. 27. № 6. P.486-501
15. Sidesse S. New developments on vermifiltration as a bio-ecological wastewater treatment technology: Mechanism, application, performance, modelling, optimization, and sustainability / S. Sidesse, Y. Saapi, A. Harinaivo, Andrianisa, Zorom Malicki, Lawani A. Mounirou, Hemez Ange Aurélien Kouassi, Mahugnon Samuel Ahoossouhe // Heliyon, 29 February 2024 Volume 10, Issue 4, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25795>
16. Arora S. Vermifiltration as a natural, sustainable and green technology for environmental remediation: A new paradigm for wastewater treatment process / S. Arora , S. Saraswat // Current Research in Green and Sustainable Chemistry Volume 4, 2021, 100061 <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2021.100061>
17. Mohan M. Vermifiltration: A Novel Sustainable and Innovative Technology for Wastewater Treatment./ M. Mohan, M. Manohar, S. Muthuraj, G.S Vijayalakshmi, P. Ganesh, M. Abdul Salam // In: Arora, S., Kumar, A., Ogita, S., Yau, Y.Y. (eds) Innovations in Environmental Biotechnology. 2022, Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-4445-0_24
18. Singh R. Vermifiltration as a sustainable natural treatment technology for the treatment and reuse of wastewater: A review./ R. Singh, K. Samal, R.R. Dash, P. Bhunia // Journal of Environmental Management. 2019. Vol. 247.P.140-151. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.075>
19. Mudziwapasi R. Potential synchronous detoxification and biological treatment of raw sewage in small scale vermifiltration using an epigeic earthworm *Eisenia fetida* / R. Mudziwapasi, S.S. Mlambo, P.K. Kuipa, N.L. Chigu // Resources and Environment. 2016. Vol. 6. №1. P.16–21. <https://doi.org/10.5923/j.re.20160601.03>
20. Yang, J. Ecological and physiological adaptabilities of earthworm in vermifilter under different hydraulic loading./ J.Yang, L.M Zhao, Q.Y.Chen, D.H Yi // Journal of Tongji University. 2009. Vol. 8. P. 1049–1055.
21. Soto P. Treating organically polluted water e.g. domestic wastewater, by separating solid elements. France Patent 2921651A1 or 20090403.
22. Wang, L. Enhancement of rural domestic sewage treatment performance, and assessment of microbial community diversity and structure using tower vermifiltration / L. Wang , F. Guo, Z. Zheng, X. Luo, J. Zhang // Bioresource Technology. 2011.Vol. 102. P. 9462–9470 <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.07.085>
23. Project European Union's Horizon 2020, Grant agreement ID: 689817 «Innovative Ecological on-site Sanitation System for Water and Resource Savings» <https://doi.org/10.3030/689817>

References

1. Arora S. The effect of seasonal temperature on pathogen removal efficacy of vermifilter for wastewater treatment / S.Arora, A.A. Kazmi // Water Research. 2015.Vol. 74. P. 88-99 <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.02.001>
2. Lourenço N. Optimization of a vermifiltration process for treating urban wastewater./ L.M. Nunes, N. Lourenço// Ecological Engineering. 2017. Vol.100, P.138-146 <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.11.074>
3. Hartenstein R., Earthworms and trickling filters. / R. Hartenstein, D.L Kaplan, E.F. Neuhauser // J.Water Pollution Control Federation. 1984.Vol. 56. № 3, P. 294-298. <http://www.jstor.org/stable/25042220>
4. Sinha R.K., Vermiculture revolution. / R.K Sinha, D. Valani // The Technological Revival of Charles Darwin's Unheralded Soldiers of Mankind: Nova Sci. Pub. Inc., 2011. 328 p.
5. Yang, J. Ecological and physiological adaptabilities of earthworm in vermifilter under different hydraulic loading. / J. Yang, L.M. Zhao, Q.Y. Chen., D.H Yi // Journal of Tongji University. 2009. Vol. 8. P. 1049–1055.
6. Kumar, T., Evaluation of the vermifiltration process using natural ingredients for efficient wastewater treatment / T. Kumar, R., Bhargava, Prasad, KSH, V. Pruti, // Ecol. English – 2015. –Vol. 75. – P. 370–377. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.11.044>
7. Tomar P. Urban wastewatertreatment using vermifiltration system / P. Tomar, S. Suthar // Desalination, 2011, Vol. 28. P 95-103 <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.09.007>
8. Kumar T. A comparative study on vermifiltration using epigeic earthworm *Eisenia fetida* and *Eudrilus eugeniae* / T. Kumar, A. Rajpal, S. Arora, R. Bhargava, Hari K.S. Prasad, A.A Kazmi. // Desalination and Water Treatment. 2016. Vol. 57. № 14. P. 6347-6354. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1010230>
9. Arora S., Kazmi A.A. The effect of seasonal temperature on pathogen removal efficacy of vermifilter for wastewater treatment / S Arora, A.A. Kazmi // Water Research. 2015.Vol. 74, P. 88-99 <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.02.001>
10. Yang J. Analysis on the performance of vermifilter at low temperature in winter / J. Yang, S. Zhang, J. Yang, Z. Lu // In: ICEET-2009. International Conference on 16–18 Oct. 2009 / Energy and Environment Technology. – 2009. – Vol.3.– P. 193–197 <https://doi.org/10.1109/ICEET.2009.512>
11. Sinha R.K. Vermiculture revolution. The Technological Revival of Charles Darwin's Unheralded Soldiers of Mankind / R.K Sinha, D.Valani - Nova Sci. Pub. Inc., 2011. 328 p.
12. Kumar T. Performance Evaluation of Vermifilter at Different Hydraulic Loading Rates Using River Bed Material / T. Kumar, A. Rajpal, R. Bhargava, K.S.H. Prasad //

Ecological Engineering. 2014. Vol. 62. P. 77-82.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.10.028>

13. Sinha R.K. Earthworms: nature's chemical managers and detoxifying agents in the environment: an innovative study on treatment of toxic wastewaters from the petroleum industry by vermifiltration technology / R.K. Sinha, V. Chandran, B.K. Soni, U. Patel, A. Ghosh // *Environmentalis*. 2012. Vol. 32. P. 445-452
<https://doi.org/10.1007/s10669-012-9409-2>

14. Sinha R.K. Removal of high BOD and COD loadings of primary liquid waste products from dairy industry by vermifiltration technology using earthworms / R.K. Sinha, G. Bharambe, P. Bapat // *Indian Journal of Environmental Protection*. 2007. Vol. 27. № 6. P. 486-501

15. Sidesse S. New developments on vermifiltration as a bio-ecological wastewater treatment technology: Mechanism, application, performance, modelling, optimization, and sustainability / S. Sidesse, Y. Saapi, A. Harinaivo, Andrianisa, Zorom Malicki, Lawani A. Mounirou, Hemez Ange Aurélien Kouassi, Mahugnon Samuel Ahoissouhe // *Heliyon*, 29 February 2024 Volume 10, Issue 4,
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25795>

16. Arora S. Vermifiltration as a natural, sustainable and green technology for environmental remediation: A new paradigm for wastewater treatment process / S. Arora, S. Saraswat // *Current Research in Green and Sustainable Chemistry* Volume 4, 2021, 100061
<https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2021.100061>

17. Mohan M. Vermifiltration: A Novel Sustainable and Innovative Technology for Wastewater Treatment. / M. Mohan, M. Manohar, S. Muthuraj, G.S. Vijayalakshmi, P. Ganesh, M. Abdul Salam // In: Arora, S., Kumar, A., Ogita, S., Yau, Y.Y. (eds) *Innovations in Environmental Biotechnology*. 2022, Springer, Singapore.
https://doi.org/10.1007/978-981-16-4445-0_24

18. Singh R. Vermifiltration as a sustainable natural treatment technology for the treatment and reuse of wastewater: A review. / R. Singh, K. Samal, R.R. Dash, P. Bhunia // *Journal of Environmental Management*. 2019. Vol. 247. P. 140-151.

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.075>

19. Mudziwapasi R. Potential synchronous detoxification and biological treatment of raw sewage in small scale vermifiltration using an epigeic earthworm *Eisenia fetida* / R. Mudziwapasi, S.S. Mlambo, P.K. Kuipa, N.L. Chigu // *Resources and Environment*. 2016. Vol. 6. №1. P. 16-21. <https://doi.org/10.5923/j.re.20160601.03>

20. Yang, J. Ecological and physiological adaptabilities of earthworm in vermifilter under different hydraulic loading. / J. Yang, L.M. Zhao, Q.Y. Chen, D.H. Yi // *Journal of Tongji University*. 2009. Vol. 8. P. 1049-1055.

21. Soto P. Treating organically polluted water e.g. domestic wastewater, by separating solid elements. France Patent 2921651A1 or 20090403.

22. Wang, L. Enhancement of rural domestic sewage treatment performance, and assessment of microbial community diversity and structure using tower vermifiltration / L. Wang, F. Guo, Z. Zheng, X. Luo, J. Zhang // *Bioresource Technology*. 2011. Vol. 102. P. 9462-9470
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.07.085>

23. Project European Union's Horizon 2020, Grant agreement ID: 689817 «Innovative Ecological on-site Sanitation System for Water and Resource Savings»
<https://doi.org/10.3030/689817>

Відомості про авторів / About the Authors

Зінченко Марія Георгіївна (Zinchenko Mariya) – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри хімічної техніки та промислової екології, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7984-2881>; e-mail: mazinchen999@gmail.com.

Букатенко Наталія Олексіївна (Bukatenko Nataliia) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри безпеки праці і навколишнього середовища, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4115-1422>; e-mail: bukanya75@gmail.com

Місик Ярина Тарасівна (Misyk Yaryna) – магістр кафедри хімічної техніки та промислової екології, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8370-2010> e-mail: yaryna.misyk@mit.khpi.edu.ua