

УДК 628.477

doi:10.20998/2413-4295.2026.01.16

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПЕРЕРОБКИ РІДКИХ ВІДХОДІВ ШЛАМО- ТА МУЛОНАКОПИЧУВАЧЕЙ У ВТОРИННІ РЕСУРСИ: ПРОМИСЛОВИЙ ДОСВІД**А. О. ШКОП¹, О. В. ШЕСТОПАЛОВ^{1*}, В. С. БУТКО¹, А. С. БОСЮК¹, О. П. АВДЄЄВА²,
Н. Г. ПОНОМАРЬОВА³**

¹ кафедра хімічної техніки та промислової екології, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, УКРАЇНА

² кафедра комп'ютерного моделювання процесів та систем, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, УКРАЇНА

³ кафедра інтегрованих технологій, процесів та апаратів, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, УКРАЇНА

*e-mail: Oleksii.Shestopalov@khpі.edu.ua

АНОТАЦІЯ Представлено аналіз методів переробки рідких відходів шламо- та мулонакопичувачів у вторинні ресурси на основі промислового досвіду. Накопичення полідисперсних суспензій у відкритих накопичувачах призводить до значного екологічного навантаження: інфільтрації токсичних речовин у ґрунтові води, евтрофікації водойм, емісії метану та сірководню, а також вітрового рознесення пилу з важкими металами та канцерогенними сполуками. Об'єми накопичених шламів сягають десятків мільйонів тонн, щорічне поповнення становить 5–10 % від обсягу переробки сировини на підприємствах, де вони утворюються. Запропоновано комплексну схему поводження з рідкими відходами, що включає такі основні етапи: вилучення шламових відходів із шламонакопичувачей, класифікацію на барабанних ситах, механічне зневоднення на осаджувальних центрифугах з дозуванням флокулянтів за потреби, термічне сушіння та переробка. Використання модульних установок ТОВ «НТЦ «Екомаш» дозволяє переробляти відходи безпосередньо на місці накопичення та отримання осаду, готового до переробки у вторинну сировину. Експериментально та промислово підтверджено ефективність модульних установок, які використовуються як у водно-шламових схемах підприємств, так і для зневоднення рідких відходів шламонакопичувачей. Технологія повністю адаптована до умов українських підприємств, характеризується низькими капітальними витратами на модульні комплекси, швидкою окупністю за рахунок реалізації вторинних енергоресурсів та відповідає принципам циркулярної економіки. Впровадження дозволяє припинити вторинне забруднення довкілля, рекультивувати землі накопичувачів, мінімізувати ризики аварійних скидів. Перспективи масштабування пов'язані з розширенням застосування модульних установок на підприємствах вуглезабачувальної, гірничодобувної, водоочисної, харчової та інших галузей промисловості України.

Ключові слова: шламонакопичувачі; центрифуга; зневоднення; вторинні енергоресурси; паливні пелети; модульні установки; промислові шлами; активний мул; вуглезабачення.

ANALYSIS OF METHODS FOR PROCESSING LIQUID WASTE FROM SLUDGE AND MUD STORES INTO SECONDARY RESOURCES: INDUSTRIAL EXPERIENCE**A. SHKOP¹, O. SHESTOPALOV^{1*}, V. BUTKO¹, A. BOSIUK¹, O. AVDIEIEVA²,
N. PONOMAROVA³**

¹ Department of Chemical Engineering and Industrial Ecology, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

² Department of Computer Modeling of Processes and Systems, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

³ Department of Integrated Technologies, Processes and Devices, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT The analysis of methods for processing liquid waste from sludge and slurry storage facilities into secondary resources, based on industrial experience, is presented. The accumulation of polydisperse suspensions in open storage facilities leads to a significant environmental burden: the infiltration of toxic substances into groundwater, eutrophication of water bodies, emissions of methane and hydrogen sulfide, as well as the wind-borne dispersion of dust containing heavy metals and carcinogenic compounds. The volume of accumulated sludge reaches tens of millions of tons, with annual replenishment accounting for 5–10% of the raw material processing volume at the facilities where it is generated. A comprehensive liquid waste management scheme is proposed, including the following main stages: removal of sludge waste from sludge storage tanks, classification on drum screens, mechanical dewatering and sedimentation in centrifuges with flocculant dosing as needed, thermal drying and processing. The use of modular units from LLC "NTC "Ekomash" allows for the processing of waste directly at the site of accumulation and the production of sludge ready for conversion into secondary raw materials. The effectiveness of the modular units has been experimentally and industrially confirmed; they are used both in the water-sludge treatment systems of enterprises and for dewatering liquid waste from sludge storage tanks. The technology is fully adapted to the conditions of Ukrainian enterprises, is characterized by low capital costs for modular complexes, rapid payback through the sale of secondary energy resources, and complies with the principles of the circular economy. Implementation allows for the elimination of secondary environmental pollution, the reclamation of storage pond land, and

the minimization of risks associated with accidental discharges. Scaling prospects are linked to the expansion of modular plant applications at enterprises in the coal enrichment, mining, water treatment, food, and other industrial sectors of Ukraine.

Keywords: *sludge accumulators; centrifuge; dehydration; secondary energy resources; fuel pellets; modular plants; industrial sludge; activated sludge; coal enrichment.*

Вступ

Шламонакопичувачі та шламосховища використовуються на багатьох підприємствах, де утворюються рідкі або пастоподібні відходи неорганічного або органічного походження після технологічних процесів. Накопичення рідких відходів у шлаго-, бардо- та мулонакопичувачах є однією з найбільш гострих екологічних проблем вугільної, гірничовидобувної, хімічної, харчової, енергетичної, нафтогазової та інших галузей промисловості України. Так, наприклад, шламонакопичувачі вуглебагачувальних фабрик містять полідисперсні суспензії з високим вмістом вугільної фракції, яка при переробці може стати вторинним ресурсом. За даними досліджень, об'єми накопичених шламів сягають десятків мільйонів тонн, а щорічне поповнення становить 5–10 % від обсягу переробки вугілля [1]. Великі обсяги накопичення рідких шламів характерні і для шламосховищ рудобагачувальних комбінатів, установок видобутку нафти і газу, підприємств харчової промисловості (спиртових заводів, пивоварень), теплоелектростанцій, машинобудівних підприємств і навіть комунального сектору (мулові майданчики з надлишковим активним мулом). Такі накопичувачі спричиняють значне забруднення навколишнього середовища (грунтів, поверхневих і підземних вод важкими металами та органічними сполуками, повітря випаровуванням з поверхні шламосховищ) і несуть потенційну екологічну небезпеку (підвищують ризик аварійних скидів), а також призводять до втрати корисних компонентів [2–4]. Найбільш значний негативний вплив на навколишнє природне середовище спостерігається при тривалому зберіганні шламів у відкритих відстійниках і мулонакопичувачах: відбувається інфільтрація токсичних речовин у ґрунтові води, евтрофікація водойм через надходження біогенних елементів (азот, фосфор), емісія метану та сірководню з анаеробних зон, а також вітрове рознесення пилу з поверхні висушених ділянок, що призводить до забруднення довкілля важкими металами та канцерогенними сполуками. Особливо критичними є ризики для регіонів з високою щільністю великих промислових підприємств, де шламонакопичувачі вже перевищують проєктні обсяги та перебувають у стані потенційної аварійності. Окрім того, під будівництво шламосховищ відводиться значна територія, що робить непридатним до використання сотень гектар земельних угідь. Після заповнення шламонакопичувача виникає необхідність їх розширення, або будівництва нових. Вилучення, зневоднення шламів з їх подальшої переробкою є перспективним напрямком створення нових технологій, спрямованих не тільки на зменшення

негативного впливу на довкілля вже існуючих техногенних шламосховищ, але і вторинного використання ресурсів та цінних компонентів шламу. Цей напрямок також характерний і для мулонакопичувачей станцій очистки стічних вод, де активний мул після збродження або зневоднення може бути висушений і використаний як паливо (після гранулювання або пелетування) [3,5]. У міжнародній практиці переробка рідких відходів у вторинні ресурси, в тому числі і енергетичні, ґрунтується на принципах циркулярної економіки: вилучення, попереднє розділення на тверду і рідку фазу, зневоднення осаду, сушіння та вторинне використання в якості енергетичного ресурсу, мінерального наповнювача або вилуговування цінних компонентів та рідкоземельних металів.

Стан розробки питань у вітчизняній і зарубіжній літературі свідчить про активний розвиток технологій. У вітчизняних роботах [2,6] аналізуються склад шламів металургійної, хімічної та вугільної промисловості, екологічні ризики та можливості вилучення енергетичної фракції. Зарубіжні дослідження [7–9] акцентують увагу на термічні, гідрометалургійні та центрифужні методи з використанням LCA-аналізу та моделювання процесів. Особливе місце займають модульні мобільні установки, що дозволяють переробляти шлами безпосередньо на території накопичувачів без будівництва стаціонарних комплексів [10–12].

Мета роботи

Обґрунтувати технології поводження із промисловими шлами, що забезпечує зниження екологічного навантаження на довкілля, доцільність технологічних операцій оброблення, підвищення ефективності утилізації та можливості повторного використання корисних компонентів.

Задачі дослідження:

- проаналізувати сучасний стан системи поводження із промисловими шлами в Україні та визначити ключові проблеми їх накопичення, зберігання та перероблення;
- ідентифікувати основні типи промислових шламів різних галузей та перспективи їх переробки;
- обґрунтувати перспективні напрямки технологій оброблення та утилізації промислових шламів.

Методика виконання експерименту

Дослідження виконано із застосуванням комплексу загальнонаукових та спеціальних методів, зокрема системного аналізу, порівняльного аналізу, контент-аналізу та узагальнення науково-технічної інформації.

Інформаційну основу дослідження становили наукові публікації, представлені у вітчизняних та міжнародних наукометричних базах даних, а також матеріали технічних звітів та відкриті джерела, що висвітлюють сучасні промислові рішення. У процесі дослідження проведено систематизацію та класифікацію промислового досвіду, технологій та інженерних рішень використання модульних установок, розроблених ТОВ «НТЦ «Екомаш».

Узагальнення отриманих результатів дало змогу визначити основні тенденції розвитку і впровадження екологічно орієнтованих технологій очищення та зневоднення промислових шламів, які можуть містити ресурсоцінні компоненти.

Обговорення результатів

Аналіз сучасних методів переробки рідких відходів шламонакопичувачів базується на принципах вилучення твердої фази шляхом механічного зневоднення з подальшою переробкою осадів, наприклад, термічною сушкою та утилізацією у вигляді вторинних енерго- або мінеральних ресурсів. Для шламів вуглезбагачувальних фабрик або шламосховищ інших відходів (пруди-охолоджувачі, бардонакопичувачі, мулові майданчики та інші) ключовим є використання установок осаджувальних центрифуг та фільтраційних установок, що дозволяє розділити полідисперсну суспензію на за класами крупності та фазами на рідину (в ідеалі освітлену воду) та зневоднений осад. Як показано в роботах [2–4], ефективність розділення досягає 80–95 % за рахунок центробіжного поля та оптимального дозування флокулянтів. Зневоднений продукт надалі сушиться та переробляється або гранулюється, перетворюючись на паливні пелети з теплотворною здатністю, порівнянною з біомасою (рис. 1).

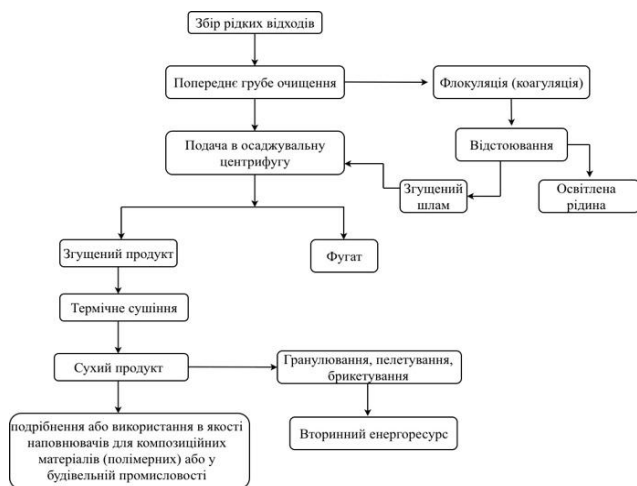


Рис. 1 – Переробки рідких відходів шламо- та мулонакопичувачів у вторинні енергоресурси

Особливий інтерес становить можливість вилучення рідких відходів і мулів шламонакопичувачей, прудів-охолоджувачей,

бризкальних басейнів та інших резервуарів з осадом за допомогою пересувних модульних установок. Такі комплекси включають барабанне сито для грубої очистки та осаджувальну центрифугу для тонкого зневоднення, що дозволяє безпосередньо на місці вилучати тверду фракцію з донних відкладень без будівництва стаціонарних комплексів (рис. 2).

Процес вилучення донних відкладень здійснюється за допомогою зануреного всмоктувального пристрою у формі плаваючого кільцевого колектора з гнучким рукавом (рис. 2а), що забезпечує гідравлічне відкачування пульпи з глибини 0,5–2,0 м. Після первинного розділення на барабанному ситі частково зневоднений осад вивантажується похилим стрічковим конвеєром (рис. 2б), а кінцевий зневоднений продукт (рис. 2в) спрямовується на подальшу утилізацію.



Рис. 2 – Пересувні модульні установки для вилучення та первинної переробки донних відкладень шламонакопичувачей: а – занурений всмоктувальний пристрій для виїмки пульпи з донних відкладень; б – вивантаження частково зневодненого осаду через похилий конвеєр після барабанного сита; в – зневоднений осад після механічного розділення в мобільному комплексі

Така схема дозволяє безпосередньо на місці накопичувача вилучати тверду фазу мулів та осадів без будівництва стаціонарних комплексів.

Після вилучення пульпи з шламонакопичувача та проходження грубого очищення на барабанному ситі (видалення великих механічних домішок та часткове відокремлення води) основний етап механічного зневоднення здійснюється в осаджувальній центрифугі. Цей процес забезпечує значне зниження вологості пульпи з 90–95 % (типова

для донних відкладень) до 30–50 % у зневодненому осаді, при цьому фугат (освітлена рідина) може направлятися на доочищення.

Технологічні модулі доцільно також використовувати для вилучення цінної сировини та мінімізації її скиду у шламосховище. На рис. 3 представлено загальний вигляд модульної установки, яка складається з класифікуючої ємності (барабанного сита) та центрифуги з вивантаженням осаду на транспортер. Така установка дозволяє вилучити з рідких відходів вуглезабагачення перед скидом у відстійники додатково тверді частинки вугілля розміром більше 1 мм на барабанному ситі та до 90–95% часток розміром 0,05–1 мм в центрифугі. При цьому найменші частинки, які саме і містять переважно негорючі глиняні частинки з високою зольністю залишаються у фугаті.



Рис. 3 – Модульна установка зневоднення рідких відходів вуглезабагачення

Для мулонакопичувачів станцій очистки стічних вод (надлишковий активний мул та органічні рештки відстійників) застосовується аналогічна технологія, детально описана в [3,5]. Згущення надлишкового активного мулу відбувається у слабкому центрифугальному полі ($Fr = 200–600$) з хімічним підсиленням агрегаування за допомогою катіонного, а подальше зневоднення – в осаджувальних центрифугах при $Fr \approx 450$ та витраті до $10 \text{ м}^3/\text{год}$. Вміст твердої фази в згущеному продукті підвищується з 4,2 г/л до 12,8 г/л, а залишок у зневодненій рідині становить лише 0,3–0,5 г/л. Зневоднений активний мул є перспективним вторинним енергоресурсом: після термічного сушіння до вологості приблизно 8–10 % та гранулювання (пелетування) може використовуватися

в якості твердого палива або органічного добрива. Це узгоджується з принципами циркулярної економіки, де органічна фракція мулу забезпечує високу теплотворну здатність або використовується як джерело поживних елементів для рослин. Перспективна схема зневоднення активного мулу та збродженого надлишкового активного мулу наведено на рис. 4 [5].

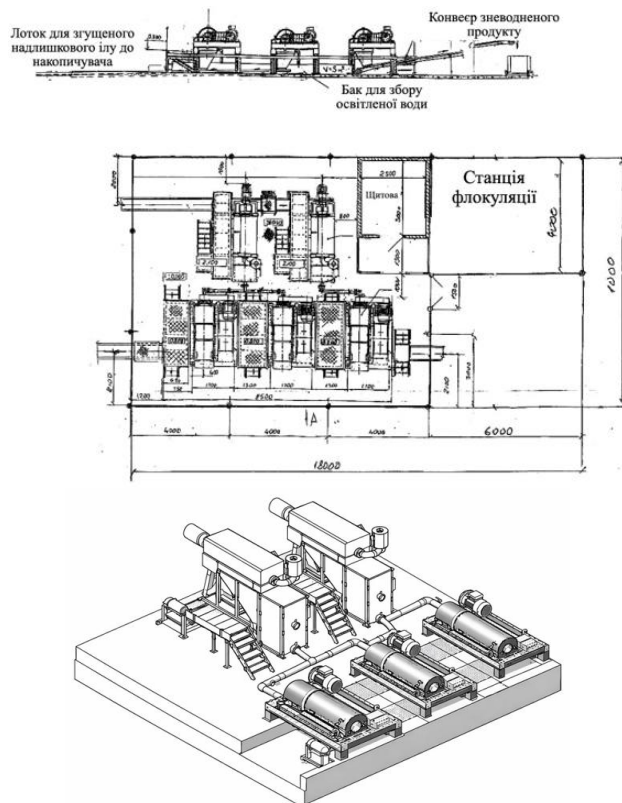


Рис. 4 – Схематичне зображення модульної установки зневоднення активного мулу

Аналогію процесів підтверджує досвід переробки післяспиртової барди з зовнішніх накопичувачів [13]. Виймка барди з накопичувачів (глибина 4–7 м) здійснюється земснарядом або шламовими насосами з розбавленням до текучості (вологість ~90 %), механічне зневоднення – у центрифугах типу Ecomash SHS 521A-113. Вихід сухої маси сягає 77–86 %, енергоспоживання – 0,47–0,55 кВт·год/кг сухого остатку. Після сушіння (контактним способом при 108–120 °С) можна отримати пелети з теплотворною здатністю 19,25–23,2 МДж/кг, що перевищує показники дубових пелет.

Вилучення вугільної фракції з мулонакопичувачів вуглезабагачувальних фабрик є ключовим етапом рекультивації та переробки накопичених відходів, що дозволяє повернути в економічний обіг значні обсяги втраченого паливного ресурсу. Процес здійснюється за допомогою земснарядів (плаваючих або самохідних) або занурювальних шламонасосів, які гідравлічно розмивають та відкачують донні відкладення з глибини 1–5 м. Пульпа (суміш води та твердої фази з вмістом

вугілля до 30 %) транспортується по трубопроводах до мобільних або стаціонарних модулів зневоднення.

На рис. 5 представлено типовий вигляд процесу вилучення рідких відходів з шламонакопичувача вуглезбагачення за допомогою земснаряда. Земснаряд, оснащений всмоктувальним пристроєм та механічним розпушувачем, що забезпечує ефективне розмивання осаду (рис. 5а). Земснаряд утримується на плаву за допомогою понтонів та якірної системи, а відкачана пульпа подається по гнучкому або жорсткому трубопроводу (позначено стрілкою) до берегової установки.



а



б

Рис. 5 – Вилучення вугілля із шламонакопичувачів вуглезбагачення: а – забір згущеного шламу та його транспортування на модуль; б – класифікований продукт після механічного зневоднення

Після відкачування пульпи відбувається механічне зневоднення (барабанні сита та центрифуги), а зневоднений осад вивантажується на майданчик (рис. 5б) і є перспективним для подальшої переробки (збагачений вугільний зернистий продукт) та вторинного використання (в будівельній галузі, для рекультивациі кар'єрів, меліорації, вилучення мінеральних компонентів).

Результати аналізу свідчать про високу ефективність зневоднення промисловими центрифугами: для шламу вуглезбагачення вихід корисної (вугільної) фракції сягає 70–80 % від сухої маси осаду, для активного мулу мулонакопичувачів – стабільне зниження об'єму мулу на 50–60 %. Екологічний ефект полягає у припиненні інфільтрації токсичних речовин у ґрунтові води, зменшенні емісії метану та сірководню з анаеробних зон, а також суттєвому зниженні пилового забруднення повітря важкими металами та канцерогенними сполуками з поверхні висушених ділянок. Економічна доцільність

підтверджується низькими капітальними витратами на модульні установки (відсутність потреби в стаціонарних комплексах та інфраструктурі) та швидкою окупністю за рахунок реалізації вторинного енергоресурсу. Економічний ефект проявиться у зниженні витрат на зберігання відходів та будівництва нових шламонакопичувачів, уникненні штрафів за забруднення та отриманні додаткового доходу від використання вторинних ресурсів. Порівняння з переробкою, наприклад, післяспиртової барди із зовнішніх накопичувачів демонструє універсальність технологічного ланцюжка «механічне зневоднення + термічне сушіння + пелетування/гранулювання», який забезпечує використання енергетичної цінності продукту незалежно від типу та складу відходів.

Перспективи впровадження пов'язані з можливістю використання модульних установок безпосередньо на територіях зберігання та місцях утворення промислових відходів органічного та неорганічного походження. Вищеописані методи дозволяють переробляти десятки тисяч тонн відходів щорічно без зупинки основного виробництва та мінімального втручання у вже існуючу інфраструктуру.

Висновки

Проведений аналіз методів переробки рідких відходів шламо- та мулонакопичувачів підтвердив високу ефективність та перспективність запропонованої технології, яка базується на принципах механічного зневоднення з подальшим використанням у якості вторинних ресурсів. Використання промислового досвіду створення та експлуатації модульних установок, розроблених ТОВ «НТЦ «Екомаш» дозволяє безпосередньо на місці накопичення чи утворення відходів впровадити інженерні рішення із очищення, зневоднення та переробки промислових шламу, які містять полідисперсні частинки твердої фази органічного або мінерального походження. Запропоновані технологічні рішення модульного типу повністю відповідають поставленій меті – забезпечують суттєве зниження екологічного навантаження (припинення інфільтрації токсикантів у ґрунтові води, зменшення емісії метану, сірководню та пилового забруднення), економічну доцільність (низькі капітальні витрати завдяки відсутності стаціонарних комплексів, швидка окупність) та підвищення ресурсної ефективності шляхом повернення втрачених корисних компонентів у виробничий цикл. Запропоновані практичні рекомендації щодо впровадження модульних установок на підприємствах вугільної, гірничодобувної, водоочисної, харчової та інших галузей промисловості України дозволяють переробляти десятки тисяч тонн відходів щорічно без зупинки основного виробництва. Це створює передумови рекультивациі земель шламонакопичувачів, мінімізації ризиків техногенних аварій та підвищення екологічної безпеки поводження з рідкими відходами та шламами.

Перспективи подальшого розвитку технології пов'язані з масштабуванням модульних комплексів, їх адаптації до конкретних підприємств та розширенням номенклатури перероблених відходів органічного та неорганічного походження. Впровадження інженерних і технологічних рішень стане вагомим внеском у вирішення екологічних проблем промислових регіонів України та забезпечення енергетичної безпеки країни.

Список літератури

1. Pavlychenko A., Haidai O., Firsova V., Ruskykh V., Tkach I. Technological directions of coal enrichment waste processing. *Collection of Research Papers of the National Mining University*. 2020. Vol. 62. P. 139–148. doi: 10.33271/crpnmu/62.139.
2. Шкоп А. О., Шестопалов О. В., Босюк А. С., Войтенко Д. М., Матісс Д. Ю. Дослідження процесу розділення полідисперсних шламів вуглезабагачення у фільтраційних та осаджувальних центрифугах. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2025. № 4 (26). С. 56–62. doi: 10.20998/2413-4295.2025.04.09.
3. Shkop A., Trembitskyi D., Shestopalov O., Bosiuk A., Loboiko V., Sakun A., Ponomarova N., Voicu A. C. Study of the process of mechanical dewatering of liquid waste from municipal wastewater treatment plants in sedimentation centrifuges. *International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics*. 2025. Issue 20, vol. 1. P. 366–375. doi: 10.17683/ijomam/issue20.38.
4. Nguyen C. V., Nguyen A. V., Doi A., Dinh E., Nguyen T. V., Ejtemaei M., Osborne D. Advanced solid-liquid separation for dewatering fine coal tailings by combining chemical reagents and solid bowl centrifugation. *Separation and Purification Technology*. 2021. Vol. 259. 118172. doi: 10.1016/j.seppur.2020.118172.
5. Shkop A., Shestopalov O., Bosiuk A., Abramova A., Titov A., Romanchyk A. Devising the technology for thickening and dehydration of activated sludge from municipal treatment plants in sedimentation centrifuges. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2025. Vol. 4(10(136)). P. 47–55. doi: 10.15587/1729-4061.2025.337917.
6. Khrutba V. O., Nikitchenko J. S., Kriukovska L. I., Lukianova V. V., Spasichenko O. V. Ways of reduction of environmental risks of slag heaps of metallurgical enterprises, Ukraine. *Environmental Safety and Natural Resources*. 2021. Vol. 38(2). P. 39–54. doi: 10.32347/2411-4049.2021.2.39-54.
7. Liu L., Pan H., Ge W., Kong C. Multi-Parameter Synergistic Effects on Fine Coal Slurry Sedimentation in High-Gravity Fields: A CFD Study. *Separations*. 2025. Vol. 12(11). P. 320. doi: 10.3390/separations12110320.
8. Thushanthan K., Mannan M. A., Rahman M. E., Poologanathan K., Rahman M. Thermal valorisation of sewage sludge into artificial aggregates: A critical review of processes, environmental performance, and circular bioeconomy implications. *Bioresource Technology Reports*. 2026. Vol. 34. 102658. doi: 10.1016/j.biteb.2026.102658.
9. Adamu Saleh R., Gimba A. S. B., Adeleke A. A., Olosho A. I., Ikubanni P. P., Adesina O., Aminu M. D., Omotosho E. Advancements in hydrometallurgical processes for rare earth elements recovery from coal ash. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*. 2025. P. 1–55. doi: 10.1080/19392699.2025.2551654.
10. Cacciottolo C., Atencio E. Dry Stacking of Filtered Tailings for Large-Scale Production Rates over 100,000 Metric Tons

per Day: Envisioning the Sustainable Future of Mine Tailings Storage Facilities. *Minerals*. 2023. Vol. 13(11). P. 1445. doi: 10.3390/min13111445.

11. Zhang F., Bournival G., Ata S. Overview of Fine Coal Filtration. Part I: Evaluation of Filtration Performance and Filter Cake Structure. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2024. Vol. 46(3). P. 457–478. doi: 10.1080/08827508.2024.2334956.
12. Shkop A., Shestopalov O., Sakun A. Et al. Research of efficiency of cleaning and dehydration of coal slimes in centrifuges. *International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics*. 2025. Vol. 19. P. 112–121. doi: 10.17683/ijomam/issue19.13.
13. Шкоп А. О., Пономарьова Н. Г., Шестопалов О. В., Босюк А. С., Войтенко Д. М., Бутко В. С. Розробка технології переробки післяспиртової барди зовнішньої бардонакопичувачів у паливні пелети. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2025. №3. С. 142–159. doi: 10.20998/2078-5364.2025.3.13.

References (transliterated)

1. Pavlychenko A., Haidai O., Firsova V., Ruskykh V., Tkach I. Technological directions of coal enrichment waste processing. *Collection of Research Papers of the National Mining University*, 2020, vol. 62, pp. 139–148, doi: 10.33271/crpnmu/62.139.
2. Shkop A., Shestopalov O., Bosiuk A., Voitenko D., Matiss D. Study of the process of separation of polydispersed coal enrichment sludges in filtration and sedimentation centrifuges. *Bulletin of the National Technical University «KhPI» Series: New Solutions in Modern Technologies*, 2025, 4(26), 56–62, doi: 10.20998/2413-4295.2025.04.09.
3. Shkop A., Trembitskyi D., Shestopalov O., Bosiuk A., Loboiko V., Sakun A., Ponomarova N., Voicu A. C. Study of the process of mechanical dewatering of liquid waste from municipal wastewater treatment plants in sedimentation centrifuges. *International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics*, 2025, Issue 20, vol. 1, pp. 366–375, doi: 10.17683/ijomam/issue20.38.
4. Nguyen C. V., Nguyen A. V., Doi A., Dinh E., Nguyen T. V., Ejtemaei M., Osborne D. Advanced solid-liquid separation for dewatering fine coal tailings by combining chemical reagents and solid bowl centrifugation. *Separation and Purification Technology*, 2021, vol. 259, 118172, doi: 10.1016/j.seppur.2020.118172.
5. Shkop A., Shestopalov O., Bosiuk A., Abramova A., Titov A., Romanchyk A. Devising the technology for thickening and dehydration of activated sludge from municipal treatment plants in sedimentation centrifuges. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2025, vol. 4(10(136)), pp. 47–55, doi: 10.15587/1729-4061.2025.337917.
6. Khrutba V. O., Nikitchenko J. S., Kriukovska L. I., Lukianova V. V., Spasichenko O. V. Ways of reduction of environmental risks of slag heaps of metallurgical enterprises, Ukraine. *Environmental Safety and Natural Resources*, 2021, vol. 38(2), pp. 39–54, doi: 10.32347/2411-4049.2021.2.39-54.
7. Liu L., Pan H., Ge W., Kong C. Multi-Parameter Synergistic Effects on Fine Coal Slurry Sedimentation in High-Gravity Fields: A CFD Study. *Separations*, 2025, vol. 12(11), pp. 320, doi: 10.3390/separations12110320.
8. Thushanthan K., Mannan M. A., Rahman M. E., Poologanathan K., Rahman M. Thermal valorisation of sewage sludge into artificial aggregates: A critical review of processes, environmental performance, and circular

- bioeconomy implications. *Bioresource Technology Reports*, 2026, vol. 34, 102658, doi: 10.1016/j.biteb.2026.102658.
9. Adamu Saleh R., Gimba A. S. B., Adeleke A. A., Olosho A. I., Ikubanni P. P., Adesina O., Aminu M. D., Omotosho E. Advancements in hydrometallurgical processes for rare earth elements recovery from coal ash. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 2025, pp. 1–55, doi: 10.1080/19392699.2025.2551654.
 10. Cacciuttolo C., Atencio E. Dry Stacking of Filtered Tailings for Large-Scale Production Rates over 100,000 Metric Tons per Day: Envisioning the Sustainable Future of Mine Tailings Storage Facilities. *Minerals*, 2023, vol. 13(11), pp. 1445, doi: 10.3390/min13111445.
 11. Zhang F., Bournival G., Ata S. Overview of Fine Coal Filtration. Part I: Evaluation of Filtration Performance and Filter Cake Structure. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 2024, vol. 46(3), pp. 457–478, doi: 10.1080/08827508.2024.2334956.
 12. Shkop A., Shestopalov O., Sakun A. Et al. Research of efficiency of cleaning and dehydration of coal slims in centrifuges. *International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics*, 2025, vol. 19, 112–121, doi: 10.17683/ijomam/issue19.13.
 13. Shkop A. O., Ponomarova N. H., Shestopalov O. V., Bosiuk A. S., Voitenko D. M., Butko V. S. Rozrobka tekhnolohii pererobky pisliaspirtovoi bardy zovnishnii bardonakopychuvachiv u palyvni pelety. *Intehrovani tekhnolohii ta enerhozberezhennia*, 2025, 3, pp. 142–159, doi: 10.20998/2078-5364.2025.3.13.

Відомості про авторів (About authors)

Шкоп Андрій Олександрович – кандидат технічних наук, докторант, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри хімічної техніки та промислової екології, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-1974-0290; e-mail: Andrii.Shkop@mit.khpi.edu.ua

Andrii Shkop – Ph.D., Senior Lecturer, department of chemical engineering and industrial ecology, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-1974-0290; e-mail: Andrii.Shkop@mit.khpi.edu.ua

Шестопалов Олексій Валерійович – кандидат технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри хімічної техніки та промислової екології, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0001-6268-8638; e-mail: oleksii.shestopalov@khpi.edu.ua

Oleksii Shestopalov – Ph.D., Prof., head of department of chemical engineering and industrial ecology, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-6268-8638; e-mail: oleksii.shestopalov@khpi.edu.ua

Бутко Владислав Сергійович – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», асистент кафедри «Хімічна техніка та промислова екологія»; м. Харків, Україна; ORCID: 0009-0006-8790-0387; e-mail: Vladyslav.Butko@khpi.edu.ua

Butko Vladyslav – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; department of chemical engineering and industrial ecology, assistant of the department of chemical engineering and industrial ecology; ORCID: 0009-0006-8790-0387; e-mail: Vladyslav.Butko@khpi.edu.ua

Босюк Альона Сергіївна – доктор філософії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри хімічної техніки та промислової екології, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0001-5254-2272; e-mail: Alona.Bosiuk@mit.khpi.edu.ua

Bosiuk Alona – Ph.D., Senior Lecturer, department of chemical engineering and industrial ecology, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-5254-2272; e-mail: Alona.Bosiuk@mit.khpi.edu.ua

Авдєєва Олена Петрівна – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри комп'ютерного моделювання процесів та систем; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-9358-4265; e-mail: Olena.Avdieieva@khpi.edu.ua

Avdieieva Olena – PhD, Assoc. Prof., Associate Professor, department of computer modeling of processes and systems, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-9358-4265; e-mail: Olena.Avdieieva@khpi.edu.ua

Пономарьова Наталія Георгіївна – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри інтегрованих технологій, процесів та апаратів; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0001-8931-5882; e-mail: Nataliia.Ponomarova@khpi.edu.ua

Ponomarova Natalya – PhD, Assoc. Prof., Associate Professor, department of integrated technologies, processes and devices, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-8931-5882; e-mail: Nataliia.Ponomarova@khpi.edu.ua

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Шкоп А. О., Шестопалов О. В., Бутко В. С., Босюк А. С., Авдєєва О. П., Пономарьова Н. Г. Аналіз методів переробки рідких відходів шламо- та мулонакопичувачей у вторинні ресурси: промисловий досвід. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2026. № 1 (27). С. 120–126. doi:10.20998/2413-4295.2026.01.16.

Please cite this article as:

Shkop A., Shestopalov O., Butko V., Bosiuk A., Avdieieva O., Ponomarova N. Analysis of methods for processing liquid waste from sludge and mud stores into secondary resources: industrial experience. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2026, no. 1(27), pp. 120–126, doi:10.20998/2413-4295.2026.01.16.

Надійшла (received) 17.02.2026
Прийнята (accepted) 20.03.2026
Опублікована (published) 02.04.2026