

УДК 622.734

doi:10.20998/2413-4295.2025.04.09

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РОЗДІЛЕННЯ ПОЛІДИСПЕРСНИХ ШЛАМІВ
ВУГЛЕЗБАГАЧЕННЯ У ФІЛЬТРАЦІЙНИХ ТА ОСАДЖУВАЛЬНИХ ЦЕНТРИФУГАХ****А. О. ШКОП, О. В. ШЕСТОПАЛОВ*, А. С. БОСЮК, Д. М. ВОЙТЕНКО, Д. Ю. МАТИСС***Кафедра хімічної техніки та промислової екології, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, УКРАЇНА***e-mail: Oleksii.Shestopalov@khpri.edu.ua*

АНОТАЦІЯ Процеси збагачення вугілля супроводжуються утворенням значної кількості полідисперсних шламів, ефективно розділення та зневоднення яких є важливою технологічною та екологічною проблемою. Одним із перспективних способів вирішення цієї проблеми є використання модульних установок, що поєднують фільтраційні та осаджувальні центрифуги, встановлені послідовно, що дозволяє поетапно вилучати зернисті фракції та зневоднювати продукти різної крупності. Обмеженням широкого впровадження таких технологій є недостатня вивченість впливу параметрів центрифугування на ефективність затримання твердої фази, склад продуктів та ступінь зневоднення полідисперсних шламів вуглезбагачення. Метою роботи було дослідження процесу розділення полідисперсних шламів вуглезбагачення у фільтраційних та осаджувальних центрифугах. Досліджено роботу модуля зневоднення, що складається з фільтруючої центрифуги ФГУ-600 та осаджувальних центрифуги ОГШ-469, на шламах антрациту класу 0–3 мм. Встановлено вплив конструктивних параметрів фільтруючих поверхонь, частоти обертання ротора та конуса, а також режимів подачі пульпи на ефективність затримання твердої фази, гранулометричний склад продуктів розділення та ступінь їх зневоднення. Отримані продукти фільтраційної центрифуги характеризуються низькою вологістю (9-10%) та зниженою зольністю (13-15%), тоді як осаджувальна центрифуга забезпечує ефективне зневоднення дрібніших фракцій до вологості 24,6% при високому вилученні твердої фази. Фугат осаджувальної центрифуги містить мінімальну кількість твердої фази (1,5 г/л) з високою зольністю (72%). На підставі проведених випробувань встановлено, що послідовне використання фільтраційної та осаджувальної центрифуг дозволяє досягти високої ефективності розділення та зневоднення полідисперсних шламів, мінімізувати втрати вугільної фракції та зменшити екологічне навантаження. Проведені дослідження дозволяють визначити оптимальні режими роботи модуля для отримання продуктів із заданими характеристиками.

Ключові слова полідисперсні шлами; вуглезбагачення; фільтраційна центрифуга; осаджувальна центрифуга; розділення; зневоднення; ефективність затримання твердої фази; гранулометричний склад.

**STUDY OF THE PROCESS OF SEPARATION OF POLYDISPERSED COAL
ENRICHMENT SLUDGES IN FILTRATION AND SEDIMENTATION CENTRIFUGES****A. SHKOP, O. SHESTOPALOV, A. BOSIUK, D. VOITENKO, D. MATISS***Department of Chemical Engineering and Industrial Ecology, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute",
Kharkiv, UKRAINE*

ABSTRACT Coal enrichment processes are accompanied by the formation of a significant amount of polydisperse sludge, the effective separation and dewatering of which is an important technological and environmental problem. One promising way to solve this problem is to use modular installations that combine filtration and sedimentation centrifuges installed in series, which allows for the step-by-step removal of granular fractions and dewatering of products of various sizes. The widespread implementation of such technologies is limited by the insufficient study of the influence of centrifugation parameters on the efficiency of solid phase retention, product composition, and the degree of dewatering of polydisperse coal enrichment sludges. The aim of the work was to study the process of separating polydisperse coal enrichment sludges in filtration and sedimentation centrifuges. The operation of a dewatering module consisting of an FG-600 filter centrifuge and an OGS-469 sedimentation centrifuge was studied on anthracite sludge of class 0-3 mm. The influence of the design parameters of the filter surfaces, the rotation frequency of the rotor and cone, as well as the pulp feed modes on the efficiency of solid phase retention, the granulometric composition of the separation products, and the degree of their dewatering was established. The products obtained from the filtration centrifuge are characterized by low moisture content (9-10%) and reduced ash content (13-15%), while the sedimentation centrifuge provides effective dewatering of finer fractions to a moisture content of 24.6% with high solids recovery. The sediment centrifuge effluent contains a minimum amount of solid phase (1.5 g/l) with high ash content (72%). Based on factory tests, it has been established that the sequential use of filtration and sedimentation centrifuges allows for high efficiency in the separation and dewatering of polydisperse slurries, minimizes coal fraction losses, and reduces the environmental impact. The studies conducted allow for the determination of optimal operating modes for the module to obtain products with specified characteristics.

Keywords: polydisperse sludge; coal enrichment; filtration centrifuge; sedimentation centrifuge; separation; dewatering; solid phase retention efficiency; particle size distribution.

Вступ

У сучасних умовах розвитку вугільної промисловості актуальною проблемою є ефективне розділення шламів вуглезбагачення, які є побічними

продуктами процесів збагачення вугілля. Шлами вуглезбагачення, як правило, являють собою полідисперсні суспензії, що містять частинки різного розміру: від зернистих (більше 50–60 мкм) до тонких (менше 50–60 мкм) [1]. Вони поділяються на первинні

(надходять з рядовим вугіллям) та вторинні (утворюються під час збагачення), а також на незбагачені (рядові) та збагачені (концентрати флотації, гідроциклонів, концентраційних столів тощо) [1,2]. Згідно з даними досліджень, вміст класів крупності 1–3 мм у рядовому вугіллі сягає 20–40%, а додаткове утворення дрібних фракцій відбувається під час транспортування та збагачення [2]. Такі продукти характеризуються високою зольністю (від 20% до 80% і більше), що ускладнює їх подальше використання та призводить до втрат корисних компонентів [3].

Накопичення шламів у зовнішніх шламонакопичувачах та відвалах не тільки збільшує експлуатаційні витрати, але й спричиняє вторинне забруднення навколишнього середовища [4,5]. Світові запаси шламів та відходів збагачення коксового та енергетичного вугілля становлять значні ресурси, переробка яких може зменшити екологічне навантаження та відновити втрачені запаси вугілля [5, 6]. Наприклад, тонкодисперсна фракція розміром менше 40 мкм переважно складається з глинистої фракції із зольністю до 80%, тоді як частинки більше 40 мкм містять вугільні зерна, придатні для подальшого використання і вилучення [7,8]. Тому ключовим завданням є розробка технологій для ефективного розділення та зневоднення полідисперсних шламів, що дозволить виключити скид рідких відходів у шламонакопичувачі та мінімізувати втрати зернистої вугільної фракції, а також створити передумови для переробки вже накопичених відходів [3,9].

Одним із поширених методів очищення шламів є використання осаджувальних центрифуг, які забезпечують затримання твердої фази, але зазнають механічних пошкоджень через присутність крупних абразивних частинок (більше 1–1,5 мм) [9,10]. Для подолання цієї проблеми перспективними є модульні установки, що поєднують фільтраційні та осаджувальні апарати, дозволяючи поетапно вилучати зернисті продукти різної крупності [10,11]. Фільтраційні центрифуги ефективні для видалення крупних фракцій шляхом фільтрування, тоді як осаджувальні центрифуги забезпечують зневоднення дрібніших класів за рахунок центробіжних сил [11,12]. Дослідження показують, що попередня класифікація шламів за класами крупності покращує ефективність зневоднення, знижує вологість осаду до 15–33% та підвищує затримання твердої фази до 87% [3,13]. Однак процеси зневоднення залежать від дисперсного складу, потужності та характеристик зневоднюючого устаткування, що вимагає досліджень з реальними шламами та уточнення результатів в промислових умовах [14,15].

Літературний огляд свідчить про значний інтерес до оптимізації процесів розділення полідисперсних шламів. Так, у роботі [2,15] розглянуто вплив глинистих мінералів на зневоднення вугільних суспензій, підкреслюючи роль реагентів для покращення фільтрації. Дослідження [16] фокусуються на

зневодненні дрібного вугілля до товарного продукту, пропонуючи комбіновані методи. Теоретичні аспекти фільтрації та центрифугування детально описано в [11,12], де акцентується на оцінці продуктивності фільтраційного осаду та структури фільтраційного шару. Крім того, моделювання процесів у центрифугах для полідисперсних суспензій представлено в [17,18], де показано вплив параметрів на ефективність розділення. Експериментальні дані щодо декантерних центрифуг для зневоднення вугільно-водних шламів наведено в [19,20]. Додаткові способи інтенсифікації процесів розділення суспензій та промислових шламів, такі як агрегація (коагуляція, флокуляція) та подальше гравітаційне розділення описано в працях [1,21,22], що підтверджує необхідність інтеграції фільтраційних та осаджувальних центрифуг для підвищення ефективності.

Мета роботи

Мета даного дослідження – вивчення процесу розділення полідисперсних шламів вуглезбагачення у послідовно з'єднаних фільтраційній та осаджувальних центрифугах з метою оптимізації параметрів затримання твердої фази та зневоднення.

Методика виконання експерименту

Для дослідження використовувався згущений шлам (дрібна вугільна фракція) однієї з вуглезбагачувальних фабрик, який подавався на модульну установку, що складалася із послідовно підключених центрифуг: фільтруючої ФГУ-600 та осаджувальної ОГШ-469. Схема розміщення центрифуг та габаритні розміри наведені на рис. 1 та 2.

Центрифуга ФГУ-600 була налаштована на частоту обертання конуса центрифуги 1589 об/хв. (фактор розділення $Fr=400$) та ротора 1144 об/хв. ($Fr=436$). Фільтруюче поле ротора центрифуги мало наступні характеристики:

- площа внутрішньої поверхні ротора $S_{рот} = 3580 \text{ см}^2$;
- площа зазорів шпальт – 346 см^2 ;
- форма шпальт – трапецеїдальна (висота 3,7 мм, велика основа трапеції – 2,5 мм; кут нахилу при великій основі 85° , зазор шпальт довжиною 190 мм спрямовані по осі ротора);
- зазори шпальт були розподілені наступним чином: величина зазору 0,25 мм – 146 шт.; величина зазору 0,3 мм – 434 шт.; величина зазору 0,35 мм – 80 шт.; величина зазору 0,4 мм – 10 шт.

Фільтруюче поле конуса сформоване 4 трапецеїдальними секторами пластинами (розміри секторів $272 \times 111 \times 180 \text{ мм}$) із загальною площею конуса 1596 см^2 (площа отворів складала $329,5 \text{ см}^2$).

Центрифуга ОГШ-469 працювала з частотою обертання ротора 1800 об / хв ($Fr = 900$), відносні обороти шнека – 12,5 об/хв.

Випробування виконувались наступним чином. Була організована подача води на вхід у центрифугу

ФГУ-600 з постійною витратою 1,285 м³/годину (0,357 л/сек). Живлення центрифуги ФГУ-600 здійснювалось шляхом висипання вугільного шламу з відер в струмінь води, що постійно подавалася по жолобу (рис. 2). Витрата шламу в живленні складало 1,867 т/год (за сухою твердою фазою).

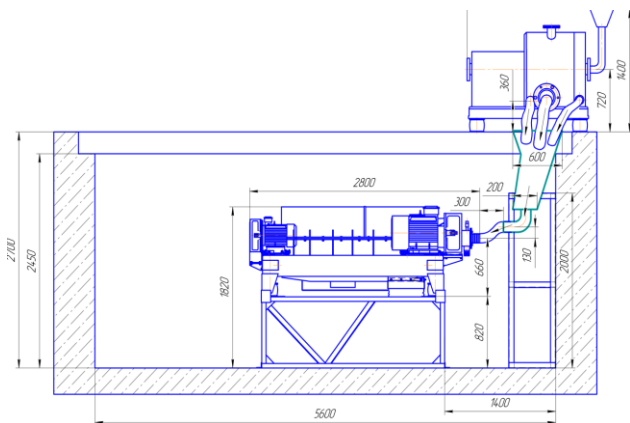


Рис. 1 – Схема розміщення центрифуг ФГУ-600 та ОГШ-469 в процесі досліджень

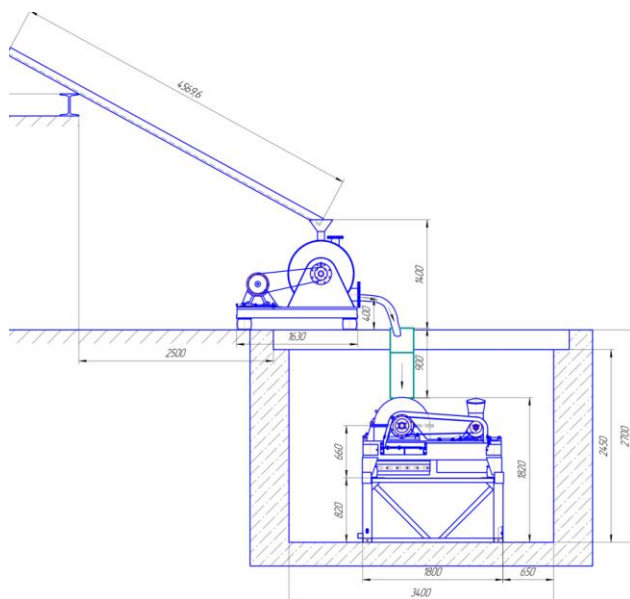


Рис. 2 – Схема подачі шламу на розділення у центрифуги ФГУ-600 та ОГШ-469 в процесі досліджень

Фільтрат центрифуги ФГУ-600 змішувалися та надходили на зневоднення до центрифуги ОГШ-469.

Витрата суспензії з ротора центрифуги ФГУ-600 складає 0,9 м³/год (0,25 л/сек). Витрата твердої фази в задисковий простір 1,1 – 2,4% від обсягу вихідного живлення.

В процесі дослідження відбирались проби потоків (рис. 3) та здійснювався їх аналіз на вміст твердої фази, її гранулометричного складу, вологості шламу, зольності.

Визначення вмісту твердої фази в пробі шляхом висушування наважки проби до постійної маси у сушильній шафі при температурі 105°C в електричній печі з датчиком температури «Харків 2М». Гранулометричний аналіз методом мокрого просіювання через стандартний набір сит (від 0,02 мм до 3 мм) на віброситі ВА-В01. Зольність зразків визначали за стандартними методиками шляхом високотемпературного прожарювання в муфельній печі до повного згоряння органічної маси, а потім зважування залишку для розрахунку зольності у відсотках від маси сухої речовини зразка.

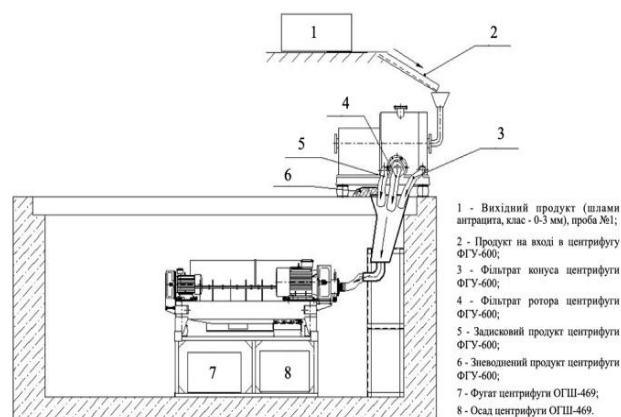


Рис. 3 – Схема досліджуваних потоків

Обговорення результатів

Вихідний продукт, який подавався на розділення у центрифуги (рис. 3, зразок №1) мав початкову вологість $W=18,65\%$ та зольність $Ad=17\%$ та наступний гранулометричний склад, наведений у табл. 1.

Таблиця 1 – Результати ситового аналізу вихідного шламу

Розмір часток, мм	Маса зразка на ситах, г	Частка класу, %
3,0–1,25	14,55	18,2
1,25–1,0	4,9	6,1
1,0–0,8	8,9	11,1
0,8–0,63	11,35	14,2
0,63–0,5	8,65	10,8
0,5–0,3	16,45	20,6
0,3–0,2	10,97	13,7
0,2–0,1	2,82	3,5
0,1–0,063	0,67	0,8
0,063–0,04	0,48	0,6
0,04–0,02	0,08	0,1
Всього	79,82	100

Аналіз табл. 1 свідчить, що приблизно 40% вихідного шламу має розмір часток менше 0,5 мм, а близько 60 % представлені антрацитом розміру 0,5 – 3

мм. Така фракція може бути цікавою для вилучення та вторинного використання. Наявність зернистих часток більше 1 мм на рівні 24,36 % потребує попереднього вилучення перед зневодненням шламу у осаджувальних центрифугах типу ОГШ для їх захисту від механічного пошкодження шляхом фільтрації.

Відібраний зразок шламу після змішування з водою перед входом у центрифугу ФГУ-600 (рис. 3, зразок №2) мав густину (вагу 1 л суспензії) 1368,9 г та концентрацію твердої фази $C=738$ г/л. Під час фільтрації шлам розділюється на фільтрати конуса, ротора та зневоднений продукт, гранулометричних склад яких наведено у табл. 2 – 4.

Таблиця 2 – Результати ситового аналізу фільтрату конуса центрифуги ФГУ-600

Розмір часток, мм	Маса зразка на ситах, г	Частка класу, %
3,0–1,0	0,05	0,05
1–0,8	0,1	0,11
0,8–0,63	1,1	1,28
0,63–0,5	3,4	3,97
0,5–0,3	19,07	22,29
0,3–0,2	21,05	24,61
0,2–0,1	11,45	13,38
0,1–0,063	3,75	4,38
0,063–0,04	2,35	2,74
0,04–0,02	3,7	4,32
менше 0,02	19,5	22,80
Всього	85,52	100

Аналіз фільтрату конуса свідчить (табл. 2), що 94,58% твердої фази у фільтраті є дрібнодисперсними частинками менше 0,5 мм із зольністю $Ad=30\%$. Концентрація твердої фази у фільтраті склала $C=82,5$ г/л, що свідчить про ефективне затримання твердої фази більших класів фільтрувальною поверхнею.

Таблиця 3 – Результати ситового аналізу фільтрату ротора центрифуги ФГУ-600

Розмір часток, мм	Маса зразка на ситах, г	Частка класу, %
3,0–1,0	1,14	1,68
1–0,8	1,1	1,62
0,8–0,63	2,2	3,25
0,63–0,5	2,5	3,69
0,5–0,3	4,2	6,20
0,3–0,2	5,5	8,12
0,2–0,1	4,1	6,05
0,1–0,063	1,84	2,71
0,063–0,04	1,4	2,06
0,04–0,02	3,2	4,72
менше 0,02	40,5	59,84
Всього	67,68	100

Фільтрату ротора центрифуги (табл. 3) мав близько 90% часток менше 0,5 мм із вищою зольністю $Ad=50\%$. Концентрація твердої фази у фільтраті склала $C=67,7$ г/л.

Зневоднений продукт центрифуги (табл. 4) в середньому містив 25,12% часток більше 1 мм, 34,08% часток розміром 0,5–1 мм та 40,8% часток менше 0,5 мм з яких близько 20% менше 0,2 мм. Такий розподіл свідчить про вилучення зернистого класу антрациту із зольністю $Ad=13-15\%$ та низькою вологістю ($W=10,1\%$), що створює перспективу вилучення та вторинного використання вугілля із шламів. Невеличка частка осаду, яка потрапила у задисковий простір (рис. 3, зразок 5) мала вологість $W=9,75\%$.

Таблиця 4 – Результати ситового аналізу зневодненого продукту центрифуги ФГУ-600

Розмір часток, мм	Маса зразка на ситах, г	Частка класу, %
3,0–1,25	17,05	19,21
1,25–1,0	5,25	5,916
1,0–0,8	9,05	10,19
0,8–0,63	12,85	14,48
0,63–0,5	8,35	9,40
0,5–0,3	18,05	20,34
0,3–0,2	10,97	12,36
0,2–0,1	4,5	5,07
0,1–0,063	1,6	1,80
0,063–0,04	0,9	1,01
0,04–0,02	0,17	0,19
Всього	88,74	100

Подальше розділення фільтратів у осаджувальній центрифугі ОГШ-469 призвело до отримання осаду з вологістю $W=24,6\%$ та зольністю $Ad=42\%$ та фугату з концентрацією твердої фази $C=1,5$ г/л та вмістом високозольних тонкодисперсних часток $Ad=72\%$ розміром менше 0,02 мм.

За результатами дослідження була складена узагальнена кількісно-якісна схема роботи досліджуваної модульної установки для розділення полідисперсних шламів (рис. 4).

В результаті дослідження встановлено, що попередня фільтрація концентрованих полідисперсних суспензій дозволяє вилучити низькозольний продукт та створити передумови до збагачення шламових відходів, осадів відстійників або шламонакопичувачей вугільного шламу. Модульні установки, які складаються із фільтрувального устаткування (фільтруючі центрифуги, барабанні сита та ін.) можуть бути використані для вилучення вугільних зернистих класів із відходів з подальшим осадженням твердої фази в центрифугах ОГШ.

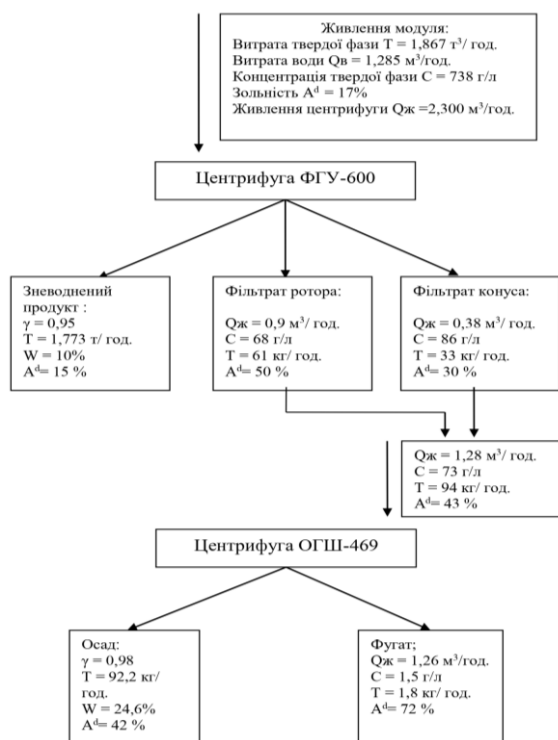


Рис. 4 – Якісно-кількісна схема розділення полідисперсного шламу

Отримані експериментальні результати можуть бути використані для визначення оптимальних режимів роботи модульних установок зневоднення шламу вуглезбагачення та для розробки промислових схем переробки (перезбагачення) шламових відходів та осадів.

Висновки

Встановлено, що полідисперсні шлами вуглезбагачення класів з розміром до 3 мм містять значну частку зернистих низькозольних фракцій, вилучення яких є доцільним як з технологічної, так і з екологічної точки зору, оскільки це дозволяє скоротити обсяги відходів, які направляються у шламонакопичувачі або відвали.

Доведено ефективність попереднього фільтраційного розділення у фільтраційній центрифугі для селективного вилучення зернистої вугільної фракції з низькою вологістю та зольністю, що створює передумови для повторного використання вугілля та зменшення втрат його з відходами.

Показано, що подальше зневоднення дрібнодисперсних високозольних фракцій в осаджувальній центрифугі забезпечує отримання фугату з мінімальним вмістом твердої фази, що сприяє зниженню забруднення водних об'єктів і підвищенню ефективності водооборотних систем вуглезбагачувальних фабрик.

Встановлено, що послідовне використання фільтраційної та осаджувальної центрифуг у складі модульної установки дозволяє комплексно вирішити задачу зневоднення та розділення полідисперсних шламу, мінімізувати екологічне навантаження на навколишнє середовище та підвищити рівень ресурсозбереження у вугільній промисловості.

Список літератури

1. Сергєєв П. В., Білецький В. С. *Селективна флокуляція вугільних шламу органічними реагентами: монографія*. Донецьк: Східний видавничий дім, Донецьке відділення НТШ, Редакція гірничої енциклопедії, 2010. 240 с.
2. Ma X., Fan Y., Dong X., Chen R., Li H., Sun D., Yao S. Impact of Clay Minerals on the Dewatering of Coal Slurry: An Experimental and Molecular-Simulation Study. *Minerals*. 2018. Vol. 8. P. 400. doi: 10.3390/min8090400.
3. Shkop A., Tseitlin M., Shestopalov O. Exploring the ways to intensify the dewatering process of polydisperse suspensions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 6, No. 10(84). P. 35–40. doi: 10.15587/1729-4061.2016.86085.
4. Cacciuttolo C., Cano D., Custodio M. Socio-Environmental Risks Linked with Mine Tailings Chemical Composition: Promoting Responsible and Safe Mine Tailings Management Considering Copper and Gold Mining Experiences from Chile and Peru. *Toxics*. 2023. Vol. 11, No. 5. P. 462. doi: 10.3390/toxics11050462.
5. 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, No. 11. P. 1445. doi: 10.3390/min13111445.
6. Doi A., Nguyen T. A. H., Nguyen N. N., Nguyen C. V., Raji F., Nguyen A. V. Enhancing shear strength and handleability of dewatered clay-rich coal tailings for dry-stacking. *Journal of Environmental Management*. 2023. Vol. 344. P. 118488. doi: 10.1016/j.jenvman.2023.118488.
7. Balaeva Ya. S., Kaftan Yu. S., Miroshnichenko D. V., Kotliarov E. I. Influence of Coal Properties on the Gross Calorific Value and Moisture-Holding Capacity. *Coke and Chemistry*. 2018. Vol. 61, No. 1. P. 4–11. doi: 10.3103/s1068364x18010039.
8. 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. P. 118172. doi: 10.1016/j.seppur.2020.118172.
9. Shkop A., Tseitlin M., Shestopalov O., Raiko V. Study of the strength of flocculated structures of polydispersed coal suspensions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 1, No. 10(85). P. 20–26. doi: 10.15587/1729-4061.2017.91031.
10. Shestopalov O., Briankin O., Rykusova N., Hetta O., Raiko V., Tseitlin M. Optimization of floccular cleaning and drainage of thin dispersed sludges. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2020. No. 3. P. 75–86. doi: 10.21303/2461-4262.2020.001239.
11. Zhang F., Boumival G., Ata S. Overview of fine coal filtration. Part II: Filtration aiding treatments and reagents. *Separation and Purification Technology*. 2025. Vol. 353. P. 128584. doi: 10.1016/j.seppur.2024.128584.

12. 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, No. 3. P. 457–478. doi: 10.1080/08827508.2024.2334956.
13. Shkop A., Shestopalov O., Sakun A., Tseitlin M., Ponomarova N., Bosiuk A., Romanchyk A., Bădiță-Voicu L. Research of efficiency of cleaning and dehydration of coal slims in centrifuges. *International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics*. 2025. Issue 19. doi: 10.17683/ijomam/issue19.13.
14. Shkop A. Dewatering coal polydisperse suspensions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015. Vol. 2, No. 6(74). P. 44. doi: 10.15587/1729-4061.2015.40557.
15. Li K., Zhou F., Fu S., Zhang Y., Dai C., Yuan H., Yu S. Study on the separation performance of a decanter centrifuge used for dewatering coal water slurry. *Chemical Engineering Research and Design*. 2023. Vol. 195. P. 711–720. doi: 10.1016/j.cherd.2023.06.013.
16. Phengsaart T., Srichonphaisan P., Kertbundit C., Soonthornwiphat N., Sinthugoot S., Phumkokrux N., Juntarasakul O., Maneeintr K., Numprasanthai A., Park I., Tabelin C. B., Hiroyoshi N., Ito M. Conventional and recent advances in gravity separation technologies for coal cleaning: A systematic and critical review. *Heliyon*. 2023. Vol. 9, No. 2. P. e13083. doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e13083.
17. Zheng J., Lu J., Ma C., Lv T., Lu H. Study of the Fluidized Separation Process of Irregular Coarse-Grained Pulverized Coal Agglomerates Based on Modified Computational Fluid Dynamics-Population Balance Method. *ACS Omega*. 2022. Vol. 7, No. 25. P. 21750–21762. doi: 10.1021/acsomega.2c01825.
18. 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, No. 11. P. 320. doi: 10.3390/separations12110320.
19. Singh R. K., Das A. Analysis of separation response of Kelsey centrifugal jig in processing fine coal. *Fuel Processing Technology*. 2013. Vol. 115. P. 71–78. doi: 10.1016/j.fuproc.2013.04.005.
20. Wang H., Huang F., Fazli M., Kuang S., Yu A. CFD-DEM investigation of centrifugal slurry pump with polydisperse particle feeds. *Powder Technology*. 2024. Vol. 447. P. 120204. doi: 10.1016/j.powtec.2024.120204.
21. 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. P. 118172. doi: 10.1016/j.seppur.2020.118172.
22. Doi A., Nguyen T. A. H., Nguyen N. N., Nguyen C. V., Raji F., Nguyen A. V. Enhancing shear strength and handleability of dewatered clay-rich coal tailings for dry-stacking. *Journal of Environmental Management*. 2023. Vol. 344. P. 118488. doi: 10.1016/j.jenvman.2023.118488.
2. Ma X., Fan Y., Dong X., Chen R., Li H., Sun D., Yao S. Impact of Clay Minerals on the Dewatering of Coal Slurry: An Experimental and Molecular-Simulation Study. *Minerals*, 2018, Vol. 8, pp. 400. doi: 10.3390/min8090400
3. Shkop A., Tseitlin M., Shestopalov O. Exploring the ways to intensify the dewatering process of polydisperse suspensions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2016, Vol. 6, No. 10(84), pp. 35–40, doi: 10.15587/1729-4061.2016.86085.
4. Cacciuttolo C., Cano D., Custodio M. Socio-Environmental Risks Linked with Mine Tailings Chemical Composition: Promoting Responsible and Safe Mine Tailings Management Considering Copper and Gold Mining Experiences from Chile and Peru. *Toxics*, 2023, Vol. 11, No. 5, pp. 462, doi: 10.3390/toxics11050462.
5. 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, No. 11, pp. 1445, doi: 10.3390/min13111445.
6. Doi A., Nguyen T. A. H., Nguyen N. N., Nguyen C. V., Raji F., Nguyen A. V. Enhancing shear strength and handleability of dewatered clay-rich coal tailings for dry-stacking. *Journal of Environmental Management*, 2023, Vol. 344, pp. 118488, doi: 10.1016/j.jenvman.2023.118488.
7. Balaeva Ya. S., Kaftan Yu. S., Miroshnichenko D. V., Kotliarov E. I. Influence of Coal Properties on the Gross Calorific Value and Moisture-Holding Capacity. *Coke and Chemistry*, 2018, Vol. 61, No. 1, pp. 4–11, doi: 10.3103/s1068364x18010039.
8. 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, pp. 118172, doi: 10.1016/j.seppur.2020.118172.
9. Shkop A., Tseitlin M., Shestopalov O., Raiko V. Study of the strength of flocculated structures of polydispersed coal suspensions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, Vol. 1, No. 10(85), pp. 20–26, doi: 10.15587/1729-4061.2017.91031.
10. Shestopalov O., Briankin O., Rykusova N., Hetta O., Raiko V., Tseitlin M. Optimization of floccular cleaning and drainage of thin dispersed sludges. *EUREKA: Physics and Engineering*, 2020. No. 3, pp. 75–86, doi: 10.21303/2461-4262.2020.001239.
11. Zhang F., Bournival G., Ata S. Overview of fine coal filtration. Part II: Filtration aiding treatments and reagents. *Separation and Purification Technology*, 2025, Vol. 353, pp. 128584, doi: 10.1016/j.seppur.2024.128584.
12. 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, No. 3, pp. 457–478, doi: 10.1080/08827508.2024.2334956.
13. Shkop A., Shestopalov O., Sakun A., Tseitlin M., Ponomarova N., Bosiuk A., Romanchyk A., Bădiță-Voicu L. Research of efficiency of cleaning and dehydration of coal slims in centrifuges. *International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics*, 2025, Issue 19, doi: 10.17683/ijomam/issue19.13.
14. Shkop A. Dewatering coal polydisperse suspensions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2015, Vol. 2, No. 6(74), pp. 44, doi: 10.15587/1729-4061.2015.40557.

References (transliterated)

1. Serhieiev P. V., Biletskyi V. S. *Selektivna flokulatsiia vuhilnykh shlamiv orhanichnykh reahentamy: monohrafiia. [Selective flocculation of coal sludge with organic reagents: monograph]*. Donetsk: Skhidnyi vydavnychyi dim, Donetske viddilennia NTSh, Redaktsiia hirnychoi entsyklopedii, 2010. 240 p.

15. Li K., Zhou F., Fu S., Zhang Y., Dai C., Yuan H., Yu S. Study on the separation performance of a decanter centrifuge used for dewatering coal water slurry. *Chemical Engineering Research and Design*, 2023, Vol. 195, pp. 711–720, doi: 10.1016/j.cherd.2023.06.013.
16. Phengsaart T., Srichonphaisan P., Kertbundit C., Soonthornwiphat N., Sinthugoot S., Phumkokrux N., Juntarasakul O., Maneeintr K., Numprasanthai A., Park I., Tabelin C. B., Hiroyoshi N., Ito M. Conventional and recent advances in gravity separation technologies for coal cleaning: A systematic and critical review. *Heliyon*, 2023, Vol. 9, No. 2, pp. e13083, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e13083.
17. Zheng J., Lu J., Ma C., Lv T., Lu H. Study of the Fluidized Separation Process of Irregular Coarse-Grained Pulverized Coal Agglomerates Based on Modified Computational Fluid Dynamics-Population Balance Method. *ACS Omega*, 2022, Vol. 7, No. 25, pp. 21750–21762, doi: 10.1021/acsomega.2c01825.
18. 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, No. 11, pp. 320, doi: 10.3390/separations12110320.
19. Singh R. K., Das A. Analysis of separation response of Kelsey centrifugal jig in processing fine coal. *Fuel Processing Technology*, 2013, Vol. 115, pp. 71–78, doi: 10.1016/j.fuproc.2013.04.005.
20. Wang H., Huang F., Fazli M., Kuang S., Yu A. CFD-DEM investigation of centrifugal slurry pump with polydisperse particle feeds. *Powder Technology*, 2024, Vol. 447, pp. 120204, doi: 10.1016/j.powtec.2024.120204.
21. 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, pp. 118172, doi: 10.1016/j.seppur.2020.118172.
22. Doi A., Nguyen T. A. H., Nguyen N. N., Nguyen C. V., Raji F., Nguyen A. V. Enhancing shear strength and handleability of dewatered clay-rich coal tailings for dry-stacking. *Journal of Environmental Management*, 2023, Vol. 344, pp. 118488, doi: 10.1016/j.jenvman.2023.118488.

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.

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.

Alona Bosiuk – 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.

Войтенко Дмитро Максимович – аспірант кафедри хімічної техніки та промислової екології, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: 0009-0004-9968-447X; e-mail: dmytro.m.voitenko@mit.khpi.edu.ua.

Dmytro Voitenko – postgraduate student, department of chemical engineering and industrial ecology, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0009-0004-9968-447X; e-mail: dmytro.m.voitenko@mit.khpi.edu.ua.

Дмитро Юрійович Матісс – аспірант кафедри хімічної техніки та промислової екології, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: 0009-0009-1371-5877; e-mail: Dmytro.Matiss@mit.khpi.edu.ua.

Dmytro Matiss – postgraduate student, department of chemical engineering and industrial ecology, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0009-0009-1371-5877; e-mail: Dmytro.Matiss@mit.khpi.edu.ua.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Шкоп А. О., Шестопалов О. В., Босюк А. С., Войтенко Д. М., Матісс Д. Ю. Дослідження процесу розділення полідисперсних шламів вуглезбагачення 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.

Please cite this article as:

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 technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2025, no. 4(26), pp. 56–62, doi:10.20998/2413-4295.2025.04.09.

Надійшла (received) 03.11.2025
Прийнята (accepted) 19.12.2025