



Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції
«Екологія. Людина. Суспільство»
пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНІШИНА
(12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference
«Ecology. Human. Society»
dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN
(June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315

<https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.329147>

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ ЗНЕВОДНЕННЯ ТОНКО ПОДРІБНЕНИХ ЗАЛІЗОРУДНИХ КОНЦЕНТРАТІВ

Андрій ПЕТЕЛЬКА, Людмила СКЛЯР

Криворізький національний університет

вул. Віталія Матусевича, 11, 50027 м. Кривий Ріг, Україна

e-mail: andrey.petelka@knu.edu.ua

Анотація

Дослідження присвячено підвищенню енергоефективності зневоднення тонко подрібнених залізрудних концентратів для виробництва сировини, придатної для технології прямого відновлення заліза (DRI). Метою є порівняння енергоефективності тканинних вакуум-фільтрів ДУ-100-2,5 та керамічних вакуум-фільтрів КДФ-90, а також визначення оптимальних параметрів роботи останніх для забезпечення масової частки вологи концентрату в межах 9,0 – 9,5% при мінімальних енергетичних витратах. Експерименти, проведені на ПРАТ «ЦГЗК», показали, що керамічні фільтри забезпечують продуктивність 0,7 – 0,9 т/м² і знижують енергоспоживання завдяки капілярній дії мікропор та ефективній регенерації. Наукова новизна полягає у розробці математичної моделі прогнозування залишкової вологи із середньою точністю 0,17% та величиною збіжності 0,9787. Практична значимість полягає у можливості впровадження енергоефективної технології на вітчизняних підприємствах для підвищення конкурентоспроможності на ринках концентратів.

Ключові слова: енергоефективність, зневоднення, залізрудний концентрат, керамічні вакуум-фільтри, DRI обкотиші, вакуум-фільтрація.

Вступ

Виробництво високоякісних залізрудних концентратів для технології прямого відновлення заліза (DRI) є важливим завданням для гірничо-збагачувальних підприємств. Зростання вимог до якості сировини, зокрема вмісту заліза (70,0–70,5%) та стабільної залишкової вологи (9,0–9,8%), зумовлює необхідність удосконалення технологій зневоднення. Зневоднення тонко подрібнених концентратів (98–99% класу -0,056 мм) є енергоємним процесом, що суттєво впливає на собівартість продукції. Традиційні тканинні вакуум-фільтри, такі як ДУ-100-2,5, мають високу енергоємність через проникнення повітря крізь фільтрувальну тканину, часте забруднення та потребу регулярної заміни фільтрувальних матеріалів. Керамічні вакуум-фільтри КДФ-90, які використовують капілярну дію мікропор, пропонують енергоефективну альтернативу завдяки стабільності процесу, довговічності та зниженню енергоспоживання. Метою дослідження є аналіз енергоефективності керамічних вакуум-фільтрів КДФ-90 порівняно з тканинними фільтрами ДУ-100-2,5, визначення ключових параметрів, що впливають на енергоспоживання, та розробка рекомендацій для їх

оптимізації. Дослідження проводилися на ПРАТ «ЦГЗК» з акцентом на досягнення стабільної залишкової вологи концентрату, придатної для виробництва DRI обкотишів.

Проблема та її зв'язок із науковими та практичними завданнями

Тонке подрібнення залізрудних концентратів для підвищення вмісту заліза призводить до збільшення питомої поверхні частинок, що ускладнює їх зневоднення. Тканинні вакуум-фільтри ДУ-100-2,5, які широко застосовуються на вітчизняних підприємствах, мають низку недоліків: низька ефективність при обробці тонких класів ($-0,056$ мм), нестабільна залишкова вологість (вище 9,8%) та високе енергоспоживання через проникнення повітря крізь тканину. Це призводить до додаткових витрат енергії на сушку та ускладнює виробництво сировини для DRI обкотишів, які вимагають чітко контрольованої вологи для забезпечення міцності та зношуваності сирих та обпалених залізрудних обкотишів. Керамічні вакуум-фільтри КДФ-90, завдяки мікропористій структурі пластин, забезпечують ефективне зневоднення за рахунок капілярної дії, що усуває проникнення повітря та знижує енергоспоживання. Дослідження [1] показують, що керамічна фільтрація може зменшити енергетичні витрати на 20–30% порівняно з тканинними фільтрами. Крім того, керамічні фільтри мають вищу довговічність і потребують менше обслуговування, що додатково сприяє економії ресурсів. Основним завданням дослідження є визначення оптимальних параметрів роботи КДФ-90 для мінімізації енергоспоживання при збереженні необхідної якості концентрату.

Методи дослідження

Експериментальні дослідження проводилися на ПРАТ «ЦГЗК» з використанням тонко подрібненого залізрудного концентрату (98–99% класу $-0,056$ мм, вміст заліза 70,0–70,5%). Порівнювалися два типи обладнання: тканинні вакуум-фільтри ДУ-100-2,5 та керамічні вакуум-фільтри КДФ-90. Основні параметри, що аналізувалися:

- масова частка заліза загального у концентраті;
- масова частка класу $-0,056$ мм;
- питома поверхня концентрату;
- вакуум у зонах набору та сушки;
- швидкість обертання дисків;
- питома продуктивність.

Для аналізу впливу параметрів на залишкову вологу та енергоспоживання використовувався лінійний аналіз засобами Microsoft Excel. Енергоспоживання оцінювалося через вимірювання потужності вакуумних насосів та частоти їх роботи. Дані порівнювалися з літературними джерелами [1, 2] для підтвердження енергоефективності керамічних фільтрів.

Результати та їх аналіз

Експерименти показали, що керамічні вакуум-фільтри КДФ-90 забезпечують стабільну продуктивність $0,7 - 0,9$ т/м² і залишкову вологу концентрату в межах 9,0 – 9,8%, що відповідає вимогам для виробництва DRI обкотишів. Тканинні фільтри ДУ-100-2,5, навпаки, мали нестабільну вологість (9,8 – 10,9%) і вищі енергетичні витрати через проникнення повітря крізь тканину. Керамічні фільтри знижують енергоспоживання на 15 – 25% завдяки капілярній дії мікропор, яка усуває потребу в додатковому тиску для фільтрації.

Було проведено серію випробувань на керамічних вакуум-фільтрах КДФ-90 з метою прогнозування залишкової вологи концентрату та підвищенню енергоефективності роботи обладнання. Результати випробувань керамічного вакуум-фільтра КДФ-90 наведені у Таблиці 1.

Таблиця 1. Результати випробувань керамічного вакуум-фільтра КДФ-90.

Fe заг.	кл. - 0,056 мм	Величина вакууму		Швидкість обертання дисків	Питома продуктивність	Питома поверхня концентрату	Залишкова волога концентрату	Розрахункова волога	Δ
		зона набору	зона сушки						
β _{заг}	β _{-0,056}	P _{наб.}	P _{суш.}	n	q	SSA	W	W _p	
%	%	бар	бар	об/хв	т/м ²	см ² /г	%	%	
69,41	98,2	0,78	0,85	0,82	0,9980	1870	9,27	9,655	0,385
69,41	98,1	0,77	0,86	0,82	0,9553	2018	10,03	9,662	0,368
69,61	94,2	0,47	0,86	0,83	0,8900	1860	9,50	9,481	0,019
70,40	98,6	0,85	0,74	0,82	1,0870	1959	10,00	9,885	0,115
69,80	95,2	0,85	0,86	0,7	0,8205	1971	9,23	9,32	0,09
69,90	96,6	0,77	0,88	0,77	0,6413	2192	9,43	9,3	0,13
70,31	98	0,77	0,87	0,79	1,1335	2011	9,75	9,84	0,09
70,38	97,8	0,77	0,88	0,85	0,8424	2178	9,66	9,653	0,007
70,87	98,4	0,73	0,86	0,88	0,5053	2082	9,30	9,3	0
70,10	98	0,89	0,87	0,86	0,4806	2083	9,06	9,22	0,16
70,48	99	0,82	0,87	0,88	0,5364	2008	9,08	9,3	0,22
70,59	97,6	0,83	0,87	0,84	0,5170	2054	9,28	9,23	0,05
70,38	98	0,73	0,84	0,73	0,4824	2229	9,10	9,154	0,054
70,97	97,1	0,88	0,71	0,6	1,2335	2119	9,20	9,869	0,669
70,69	99,4	0,89	0,63	0,8	0,9277	2165	9,83	9,855	0,025
70,78	99,2	0,82	0,8	0,83	1,0608	2133	9,93	9,925	0,005
70,68	99,2	0,69	0,81	0,8	0,9410	2101	9,13	9,742	0,612
70,59	98,6	0,89	0,46	0,7	0,9261	1889	9,70	9,699	0,001
70,68	99,1	0,88	0,77	0,7	0,7965	2229	9,60	9,539	0,061
70,98	99,6	0,72	0,85	0,55	0,9045	2006	9,70	9,361	0,339
Середнє відхилення									0,170
Стандартне відхилення									0,202
Збіжність									0,9787

За допомогою інструментів аналізу Microsoft Excel отримано коефіцієнти впливу показників роботи вакуум-фільтра для лінійної залежності прогнозованого рівня залишкової вологи концентрату:

$$W_p = 2,71377 \times Fe_{\text{заг}} + 1,65862 \times \beta_{-0,056} + 1,16268 \times n + 1,11527 \times q + 0,41852 \times SSA + 0,00022 \times P_{\text{наб.}} - 0,54507 \times P_{\text{суш.}} + 3,75866;$$

де, Fe_{заг} – масова частка заліза загального у концентраті (%);

β_{-0,056} – масова частка класу -0,056 мм (%);

SSA – питома поверхня концентрату (тис. см² / г);

P_{наб.}, P_{суш.} – вакуум у зонах набору та сушки (бар);

n – швидкість обертання дисків (хв⁻¹);

q – питома продуктивність (т/м²·год).

Середнє відхилення розрахункової вологи від фактичної становить 0,17%, величина стандартного відхилення – 0,202%, величина збіжності – 0,9787, що свідчить про високу точність залежності. Графік збіжності розрахункової та фактичної залишкової вологи наведено на Рис. 1.

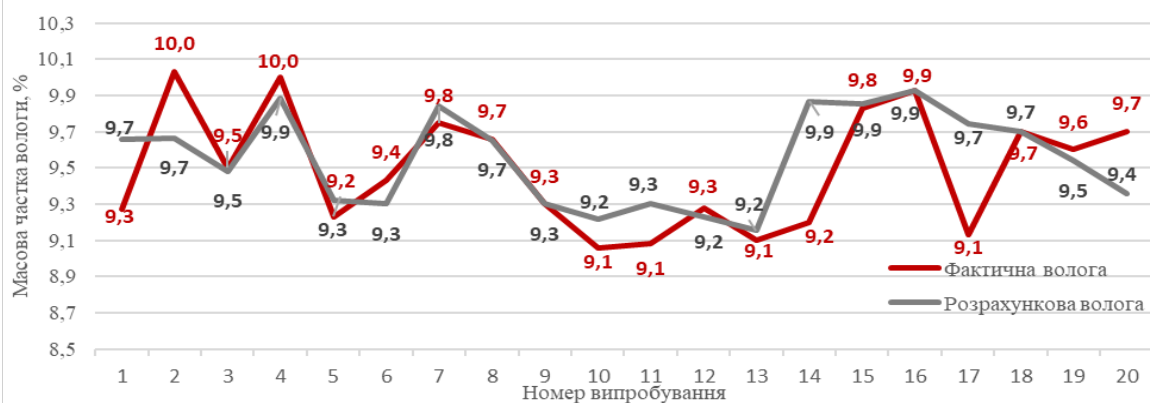


Рис. 1. Графік збіжності розрахованої та фактичної залишкової вологи

Аналіз енергоспоживання показав, що тканинні фільтри витрачають 1,2 - 1,5 кВт·год/т концентрату через необхідність підтримання високого вакууму та часту заміну тканин. Керамічні фільтри знижують ці витрати до 0,9 – 1,1 кВт·год/т завдяки стабільній роботі вакуумних насосів і довговічності пластин. Дослідження [3] підтверджують, що керамічна фільтрація забезпечує економію енергії до 30% при обробці залізорудних концентратів.

Обговорення

Керамічні вакуум-фільтри КДФ-90 мають значні переваги порівняно з тканинними фільтрами ДУ-100-2,5. По-перше, капілярна дія мікропор усуває проникнення повітря, що знижує навантаження на вакуумні насоси. По-друге, довговічність керамічних пластин (до 5 років порівняно з 3 – 6 місяцями для тканин) зменшує витрати на обслуговування. По-третє, ефективна регенерація за допомогою ультразвуку та азотної кислоти підтримує стабільну продуктивність без додаткових енерговитрат.

Літературні джерела [1, 3] підкреслюють, що енергоефективність керамічної фільтрації залежить від правильного вибору параметрів, таких як густина пульпи, рН суспензії та температура. Наприклад, нейтральний рН (7,0) і температура 36°C сприяють зниженню в'язкості пульпи, що додатково зменшує енергоспоживання. Додавання флокулянтів може підвищити ефективність при низькому вмісті твердих частинок, але їх використання потребує додаткових досліджень для тонких концентратів.

Висновки

1. Керамічні вакуум-фільтри КДФ-90 є енергоефективною альтернативою тканинним фільтрам ДУ-100-2,5, забезпечуючи продуктивність 0,7 – 0,9т/м² і залишкову вологу 9,0 – 9,8% при зниженні енергоспоживання на 15–25%.

2. Для дотримання оптимальних параметрів роботи КДФ-90 необхідно контролювати на коригувати такі параметри роботи як: масова частка заліза загального у концентраті, масова частка класу -0,056 мм, питома поверхня концентрату, вакуум у зонах набору та сушки, швидкість обертання дисків, питома продуктивність. Також регулярно необхідно проводити регенерацію фільтрувальних поверхонь за допомогою ультразвуку та азотної кислоти.

3. Розроблена математична залежність прогнозування залишкової вологи має високу точність (середнє відхилення 0,17%; стандартне відхилення 0,202%, величина збіжності 0,9787) і може бути використана для оптимізації процесу зневоднення.

4. Подальші дослідження мають бути спрямовані на аналіз впливу рН суспензії, температури, застосування флокулянтів і коагулянтів, а також на розробку методів зниження витрат при регенерації фільтрувальних пластин.

Література

1. Smith, J. Optimal ceramic filtration operating conditions for an iron-ore concentrate / J. Smith – Minerals Engineering, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.10.011>
2. Salmimies, R. The scaling and regeneration of the ceramic filter medium used in the dewatering of a magnetite concentrate / R. Salmimies. – International Journal of Mineral Processing, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2012.12.006>
3. Adail, M. Influence of process variables on the ceramic capillary filtration of iron ore slurries / M. Adail – Minerals Engineering, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107562>

INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY OF THE DEHYDRATION PROCESS OF FINELY GROUND IRON ORE CONCENTRATES

Andrii PETELKA

Kryvyi Rih National University
vul. V. Matusevicha, 11, Kryvyi Rih, 50027, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0004-5244-3433>

Lyudmila SKLYAR

Kryvyi Rih National University
vul. V. Matusevicha, 11, Kryvyi Rih, 50027, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-2721-1436>

Abstract

The study focuses on improving the energy efficiency of dewatering finely ground iron ore concentrates to produce raw materials suitable for Direct Reduced Iron (DRI) technology. The aim is to compare the energy efficiency of DU-100-2.5 fabric vacuum filters and KDF-90 ceramic vacuum filters, as well as to determine the optimal operating parameters of the latter to achieve a moisture content in the concentrate within the range of 9.0–9.5% with minimal energy consumption. Experiments conducted at PJSC "CGOK" demonstrated that ceramic filters provide a productivity of 0.7–0.9 t/m² and reduce energy consumption due to the capillary action of micropores and effective regeneration. The scientific novelty lies in the development of a mathematical model for predicting residual moisture with an average accuracy of 0.17% and a convergence value of 0.9787. The practical significance is the potential implementation of an energy-efficient technology at domestic enterprises to enhance competitiveness in the concentrate markets.

Keywords: energy efficiency, dewatering, iron ore concentrate, ceramic vacuum filters, DRI pellets, vacuum filtration.