

О. В. Замицький¹
Н. В. Бондар¹
С. О. Крадожон¹

ЛАБОРАТОРНІ ДОСЛІДЖЕННЯ КОМБІНОВАНОГО МЕТОДУ ЗНЕВОДНЕННЯ ВНУТРІШНІМИ ДЖЕРЕЛАМИ ТЕПЛОТИ В УМОВАХ ЕЛЕКТРИЧНОГО НАГРІВУ

¹Криворізький національний університет

Постійне погіршення якості залізних руд викликає необхідність переробки важкозбагачуваних корисних копалин, що вимагають глибокого збагачення, і ускладнює зневоднення. На вуглезбагачувальних фабриках широко застосовують процеси, які відбуваються у водних середовищах. В результаті цих процесів після відокремлення мінеральних домішок у вугіллі залишається значна кількість баласту — води. Тому завершальними операціями в процесах збагачення є механічне і термічне зневоднення продуктів збагачення вугілля, насамперед вугільних концентратів та шламів. При цьому основну складність становить сушіння флотоконцентрату (0...0,5 мм) і дрібного концентрату (0,5...6 мм), які мають після механічного зневоднення залишкову вологість 23...27% і близько 13% відповідно, що зумовлює необхідність додаткового теплового сушіння, від способу і апаратурного оформлення якого залежать якість вугільного концентрату, витрата палива, енерго- і металоємність процесу. Використання термічного сушіння для зневоднення продуктів збагачення пов'язано з різким збільшенням капіталовкладень та витрат дефіцитних енергоносіїв, що в умовах сучасного ринку сировини і стану економіки недоцільно. Зневоднення фільтрацією на вакуум-фільтрах, яке отримало повсюдне поширення на збагачувальних фабриках, не дозволяє отримати продукти збагачення кондиційної вологості. За підвищеної вологості концентрату збільшуються витрати на транспортування його споживачеві, а в зимовий час можливе його змерзання у залізничних вагонах. Розробка ефективних методів сушіння і термообробки дисперсних матеріалів набуває важливого практичного значення з огляду на високі вимоги, які висуваються до якості готової продукції і необхідності переходу до енерго- і ресурсозбережних технологій. Великою проблемою є зневоднення осадів шламової крупності, тому що наявні методи фільтрації для цього малоприматні. Отже встановлення закономірностей процесу зневоднення тонкодисперсних матеріалів є актуальним науковим завданням.

Ключові слова: сушильні установки, енергоефективність, тонкодисперсні матеріали.

Вступ

Постановка проблеми. Пошук нових методів сушіння тонкодисперсних матеріалів є важливим етапом розвитку промисловості. Сушіння — це найенергоємніший з усіх технологічних процесів, тому особливу увагу у виборі типу сушильного апарату необхідно приділяти енергетичним показникам пристрою. Розроблення оптимальних технічних рішень та технологічних режимів сушіння має бути пов'язане з максимальною ефективністю процесу.

Сушіння дисперсних матеріалів за допомогою струму знижує енергоємність процесу та підвищує його продуктивність. Завдяки цьому методу використовується найменша витрата умовного палива для випаровування 1 кг вологи. Перевагою також є те, що процес відбувається за короткий час і має низькі економічні витрати у разі впровадження його у виробництво. А низький рівень викидів забруднених газів в атмосферу сприяє покращенню екологічної ситуації.

Підвищення ефективності зневоднення осадів шламової крупності досягається за рахунок збільшення швидкості видалення рідини, зниження кінцевої вологості матеріалу і виробничих площ, зайнятих устаткуванням, на якому виконується зневоднення, підвищення продуктивності апаратів, зменшення їх вартості та в цілому витрат на процес [1]. Багатьма дослідженнями, які проводилися раніше і продовжують виконуватися і сьогодні, встановлені напрями вдосконалення механічного

зневоднення шляхом додавання до пульпи поверхнево-активних речовин, прогрівання осаду паром, продування стисненим повітрям, добавкою спеціальних присадок, механічного впливу на осад і іншими методами [2]—[7].

Наразі проблеми, що виникають в процесі сушіння осадів шламової крупності, залишаються актуальними, особливо в умовах ринкових відносин, коли підприємства прагнуть знизити витрати на переробку сировини і випускати продукти, що відповідають вимогам споживачів не тільки за вмістом корисної маси, але і за вологістю. При цьому механічні методи зневоднення є найнижко-витратнішими і досить ефективними [7].

Сушіння шламових продуктів вуглезбагачення виконується у дві стадії — механічними і термічними (для концентратів) методами. Для цього найчастіше використовують фільтрування під дією різниці тисків і сушіння. Останній процес серед всієї технології вуглезбагачення є найдорожчим та екологічно небезпечним. У зв'язку з цим вітчизняні та зарубіжні дослідження спрямовані на підвищення ефективності механічних методів сушіння. У дослідженнях встановлені залежності швидкості видалення вологи від властивостей парової структури опадів, що є основою теорії фільтрації.

Аналіз досліджень і публікацій. Як зазначалося вище, стратегія вибору оптимального технологічного процесу сушіння забезпечує ефективність використання дисперсних матеріалів у гірничій промисловості.

Існує безліч способів сушіння, але технології їх використання частіше за все є застарілими, не доскональними та мають різний рівень економічної та технічної ефективності. Деякі з цих технологій є конкурентоспроможними і широко вживаними у різних галузях промисловості.

Питання підвищення ефективності використання апаратів для сушіння дисперсних матеріалів досліджувались в роботах А. В. Ликова [8], Б. С. Сажина [9], В. И. Коновалова [10], Т. Ф. Киселевої [11] та ін. В цих працях не розглянуто аспекти використання сушарок з електричним струмом та їх впровадження в промисловість, що свідчить про необхідність подальшого вивчення питання.

Розглянемо деякі з них. Пристрій для сушіння тонкодисперсних матеріалів, що містить короб і розміщений в ньому конвеєр з приводом, тяговим і несучим елементами, який відрізняється тим, що конвеєр виконаний як дволанцюговий скребковий. Він містить тягові ланцюги, катки, осі і скрепки, виконані з двосторонніми робочими крайками гребінчастої форми з виступами і западинами, що чергуються, закріплені на осях з поворотом в горизонтальній площині на 180° кожного наступного скребка щодо попереднього, а осі кінцями закріплені в ланцюгах і спираються через катки на несучий елемент конвеєра із забезпеченням заданого зазору між виступами скребоків і поверхнею несучого елемента конвеєра, виконаного в вигляді порожнистої конструкції, з'єднаної трубопроводом з джерелом робочого тіла, що складається з піддону, виконаного з міцнощільного матеріалу і закриває піддон кришка, виконана з проникного для рідин і газів матеріалу, причому порожнину короба з'єднано з пристроями завантаження вологого і вивантаження сухого продукту, а також із зовнішніми системами, що забезпечують розрідження в порожнині короба.

Недоліки цього пристрою:

- 1) високі (до 3...4 м/с) швидкості теплоносія, що зумовлює значне (до 3...5) % винесення продукту в навколишнє середовище;
- 2) значні збитки, зумовлені винесенням продукту в навколишнє середовище;
- 3) низький коефіцієнт теплопередачі;
- 4) забруднення навколишнього середовища продуктами виносу;
- 5) висока енергоємність процесу сушіння, зумовлена втратою тепла з газами, що відходять;
- 6) значна складність і вартість систем очищення газів, що відходять [12].

Сушильні агрегати вихрового типу із закрученим газодисперсним потоком знаходять ширшого застосування для інтенсивного зневоднення високовологих тонкодисперсних матеріалів. Це пов'язано з інтенсивним перебігом високотемпературних і дифузійних процесів між газовою фазою і дисперсними частками за порівняно малої тривалості перебування в апараті. Крім того, в апаратах цього типу є можливість поєднувати різні технологічні процеси, такі як диспергування водних суспензій, ретельне змішування твердих компонентів сумішей, їх часткове подрібнення і сушіння [13].

Принцип роботи вихрового апарата. Рух газової фази в робочій зоні сушарки зумовлено швидкісним напором теплоносія, який виходить із завихрювача, а також дією відцентрової сили, створюваної лопатями турбулізатора у разі його обертання.

Газодисперсна фаза рухається по висхідній спіралі в кільцевому зазорі між корпусом апарата і обертовими лопатями турбулізатора у верхню частину вихрової камери. Особливістю конструкції вихрової сушарки з активними гідродинамічними режимами є те, що безперервний тепло- і масоо-

бмін між твердими частинками і газовим середовищем відбувається в умовах постійно мінливих по висоті камери швидкостей, температур і вологовмісту взаємодіючих фаз.

Недоліками є швидкий знос лопатей, позаяк вони працюють в умовах високої температури і великої стиральної дії матеріалу [14].

Зазвичай для зневоднення рудних концентратів використовується вакуумне фільтрування, що складається з двох основних операцій: утворення (набір) осаду і сушіння. Крім того, проводиться розвантаження осаду. Утворення осаду може відбуватися під впливом тільки вакуумного фільтрування або завдяки взаємодії його із силою тяжіння. У першому випадку сила вакууму спрямована перпендикулярно до сили тяжіння (дисккові вакуум-фільтри) або в протилежну сторону (барабанні вакуум-фільтри із зовнішньою фільтрувальною поверхнею). В другому випадку обидві сили спрямовані в одну сторону (стрічкові, планфільтри, барабанні фільтри з внутрішньою фільтрувальною поверхнею) [15]. Недоліки: невелика поверхня фільтрування по відношенню до зайнятої площі приміщення і висока вартість.

Спосіб сушіння дисперсних матеріалів за допомогою електричного струму (коли електричний струм пропускають безпосередньо через шар вологого матеріалу), описаний в роботі [16]. При цьому вологий матеріал приводять в контакт з електродами і включають безпосередньо в електричний ланцюг, через який пропускають електричний струм. Під час проходження електричного струму через вологий матеріал в останньому виділяється теплова енергія, яка приводить до розігріву і випаровуванню вологи. Через те, що зі зменшенням вологості матеріалу, який просушується, величина струму, що протікає через матеріал, і кількість тепла, що виділяється, поволі знижуються, контроль за процесом сушіння здійснюють за величиною струму, що протікає в ланцюзі.

Недоліками процесу є необхідність забезпечення високого рівня електричної безпеки; суттєва залежність швидкості зневоднення та кінцевого вмісту вологи матеріалу, що висушується, від електромеханічних властивостей матеріалу та кількості і складу домішок у волозі.

Порівняння відомих методів сушіння тонкодисперсних матеріалів наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Техніко-економічні показники різних способів сушіння продуктів вуглезабагачення [17]

Спосіб сушіння і установка для її здійснення	Питома витрата на випаровування 1 кг вологи	
	Умовного палива, кг/кг	Електроенергії, кВт*год/кг
Конвективний (сушарки барабанні, турбінні, киплячого шару, розпилювальні)	0,225	1,8
Контактний (сушарки барабанні, стрічкові)	0,365	2,9
Радіаційний (сушарки барабанні, стрічкові)	10,5	85,5
Віброаерокиплячого шару (сушарки горизонтальні, вертикальні, спіральні)	0,17	1,4
Струмами високої частоти (стрічкова сушарка)	0,275	2,2
Пропусканням електричного струму через вироби з обдувом теплоносієм	0,31	2,5
Прямим впливом електричного струму	0,0105	0,9
Комбінований внутрішніми джерелами тепла	0,09	0,8

Результати дослідження

На основі проведених досліджень запропоновано метод, який дозволяє підвищити продуктивність процесу і знизити його енергоємність, за рахунок впливу електричного струму на поверхневий шар матеріалу, а пари що утворюються створюють надлишковий тиск в цій зоні пароутворення, що приводить до видалення (витискання) вологи в зоні фільтрації. Використовуючи цей спосіб, видалення вологи відбувається комбіновано. Такий комбінований вплив електричного струму і надлишкового тиску парів дозволяє отримати велику інтенсивність зневоднення за мінімальної енергоємності процесу. Поставлена мета досягається тим, що зневоднювальний агрегат містить електроди пластинчастої форми, які встановлені над зневоднюваним матеріалом і мають можливість контакту з ним шляхом занурення, а над електродами встановлений герметичний кожух (рис. 1).

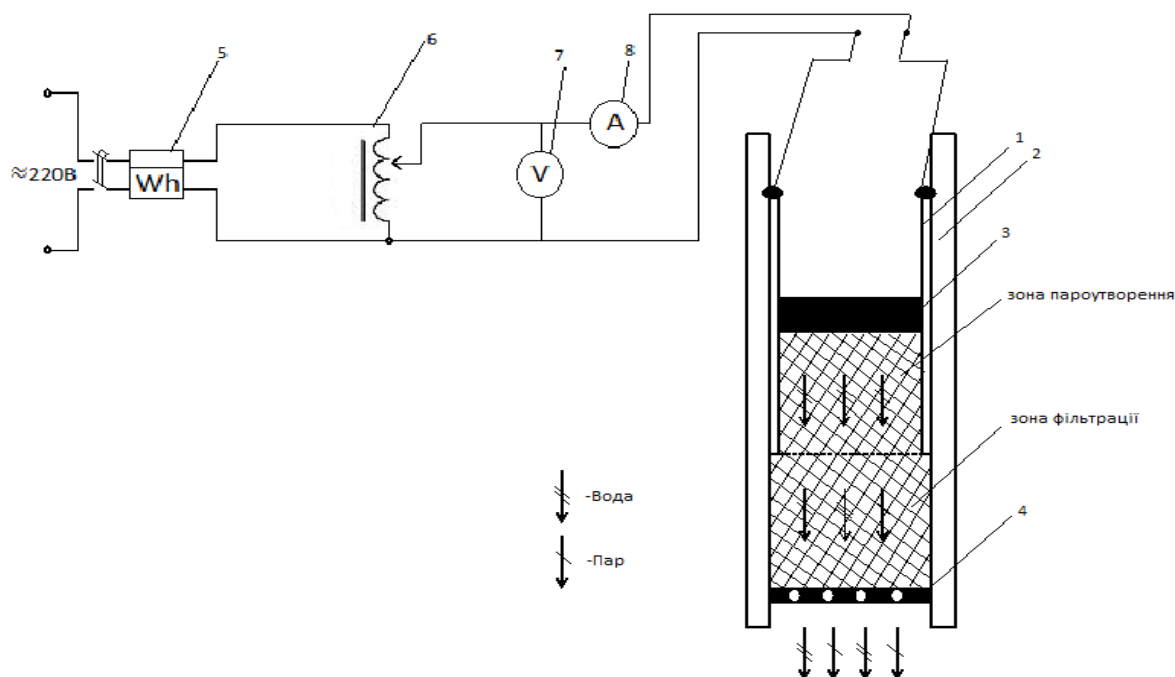


Рис. 1. Лабораторна установка для зневоднення продуктів збагачення комбінованим способом: 1 — електроди, 2 — стінки, 3 — герметична прокладка, 4 — перфорована решітка, 5 — лічильник, 6 — лабораторний автотрансформатор, 7 — ватметр, 8 — амперметр

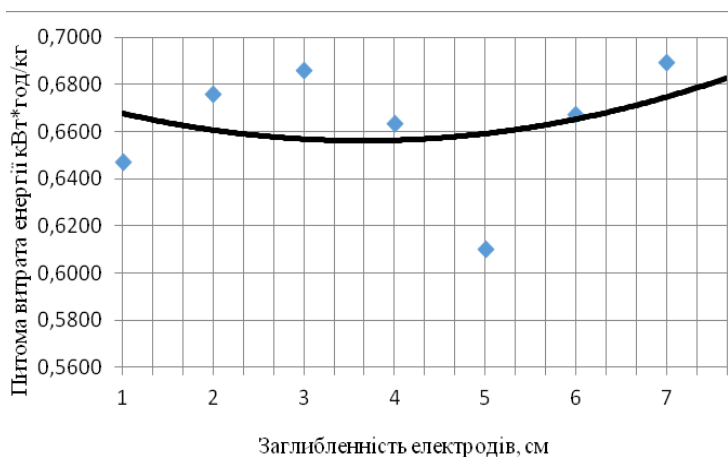


Рис. 2. Графік залежності питомої витрати енергії на видалення 1кг вологи від глибини заглибленості електродів (вологість — 14 %, напруга — 250 В, матеріал — пісок)

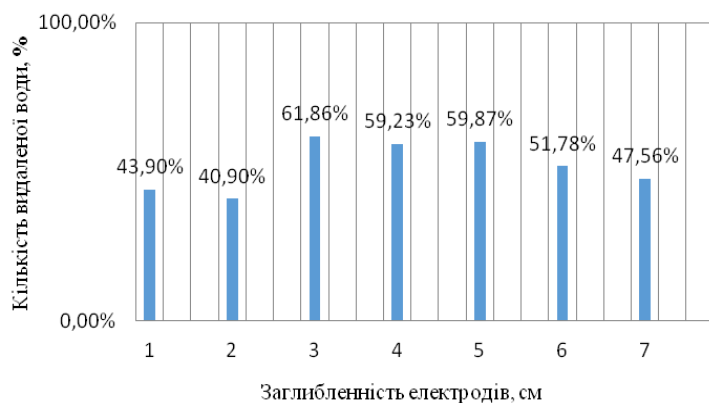


Рис. 3. Графік залежності кількості видаленої крапельної вологи від заглибленості електродів

Установка складається з електродів, герметичного корпусу, перфорованої решітки з фільтротканиною.

У разі підключення напруги до електродів відбувається резистивний нагрів капілярної вологи і її пароутворення внутрішніми джерелами теплоти. При цьому виникає підвищений тиск в шарі матеріалу між електродами.

Відбувається фільтрація, яка утворюється паром крапельної вологи з шару матеріалу, розташованого в зоні фільтрації через перфоровану перегородку, що дозволяє різко знизити енерговитрати.

В результаті проведених експериментів на лабораторній установці з використанням цього методу зі зміною заглибленості електродів у шар матеріалу (піску), яка варіювалась з 14 до 100 %, отримано результати, показані на рис. 2 та рис. 3

З графіків випливає, що з використанням запропонованого методу питомі витрати електроенергії вдалося знизити в середньому до 0,67 кВт·год/кг, що менше за інші відомі методи сушіння.

Виявлено, що найбільшу ефективність витискання крапельної вологи можна досягти у разі занурення електродів на 60...65 % у шар матеріалу.

Також проведені експерименти на шламах аглофабрики.

Таблиця 2

Результати лабораторних експериментів сушіння шламів з початковою вологістю 15,2 %

№ з/п	Напруга U , В	Заглибленість електродів, см	Час сушіння τ , с	Кінцева вологість u	Питома витрата енергії, кВт·год/кг	Напруженість електричного поля E , В/м · 10 ³	Висота шару s , см
1	250	4	10	13,5	0,97	8,33	6
2			15	11,8	0,91		
3			20	11,6	0,89		
4			30	10,7	0,86		
5			40	10,3	0,87		
6			50	10,1	0,89		
7			60	9,9	0,91		

Таблиця 3

Результати лабораторних експериментів сушіння шламів з початковою вологістю 18,2 %

№ з/п	Напруга U , В	Заглибленість електродів, см	Час сушіння τ , с	Кінцева вологість u	Питома витрата енергії, кВт·год/кг	Напруженість електричного поля, E , В/м · 10 ³	Висота шару s , см
1	250	4	10	14,4	0,95	8,33	6
2			15	13,2	0,92		
3			20	12,5	0,87		
4			30	10,5	0,81		
5			40	10,3	0,85		
6			50	10,2	0,91		
7			60	10,1	0,89		

Таблиця 4

Результати лабораторних експериментів сушіння шламів з початковою вологістю 20 %

№ з/п	Напруга U , В	Заглибленість електродів, см	Час сушки τ , с	Кінцева вологість u	Питома витрата енергії, кВт·год/кг	Напруженість електричного поля E , В/м · 10 ³	Висота шару s , см
1	250	4	10	17,5	0,93	8,33	6
2			15	15,5	0,87		
3			20	14,9	0,84		
4			30	12,3	0,78		
5			40	10,8	0,81		
6			50	10,4	0,83		
7			60	10,2	0,85		

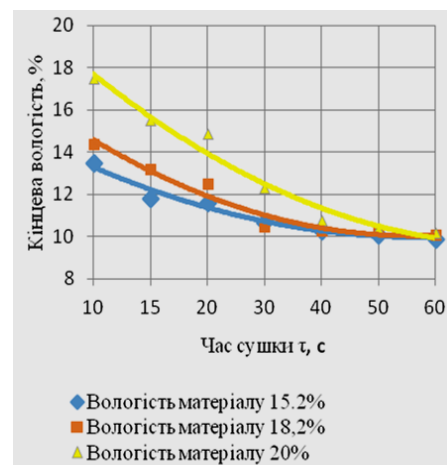
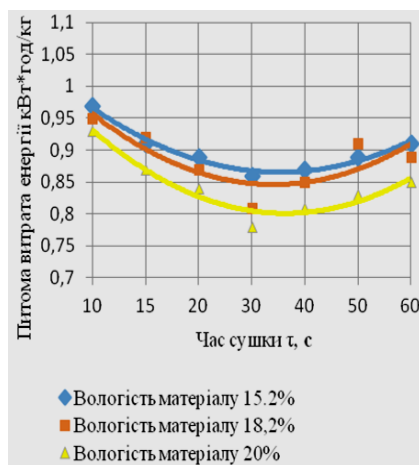


Рис. 4. Графік залежності величини питомої витрати енергії на видалення 1 кг вологи та кінцевої вологості матеріалу від часу сушіння (матеріал–шлам)

Як впливає з рис. 4, крива кінцевої вологості має асимптотичний характер до горизонтальної осі, це пояснюється зменшенням швидкості вологовидалення через зниження електропровідності

матеріалу зі зниженням його вологості, і як наслідок — зменшення потужності внутрішніх джерел теплоти. На графіку зліва видно, що питома витрата енергії з використанням цього методу сушіння в середньому 0,8...0,85 кВт·год/кг, що підтверджує економічність його використання.

Висновки

Лабораторні дослідження зневоднення тонкодисперсних продуктів збагачення комбінованим способом підтвердили раціональність, екологічність та економічність методу, позаяк питома витрата енергії в середньому складає 0,8...0,85 кВт·год/кг.

Виявлено, що найбільшу ефективність витискання крапельної вологи можна досягти у разі занурення електродів на 60...65% у шар матеріалу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] А. Д. Полулях, «Особенности современных технологий углеобогащения,» *Збагачення корисних копалин*, наук.-техн. зб., Дніпропетровськ, вип. 17 (58), с. 3-6, 2003.
- [2] В. А. Жужиков, *Фильтрование. Теория и практика разделения суспензий*, Москва: Химия, 1980, 398с.
- [3] С. Э. Фридман, О. К. Щербаков, и А. М. Комлев, *Обезвоживание продуктов обогащения*, Москва: Недра, 1988, 240 с.
- [4] Е. Е. Гарковенко, и др. Особенности флотации и обезвоживания тонкодисперсных углесодержащих материалов, Донецк, Украина: Норд-Пресс, 2002, 266 с.
- [5] П. И. Пилов, «Распределение частиц твердой фазы в турбулентном потоке жидкости при выделении осадка,» *Науковий вісник НГА України*, № 1, с. 74-77, 1998.
- [6] А. Д. Полулях, и О. В. Ищенко, «Состояние подготовки и обогащение машинных классов рядового угля в Украине,» *Збагачення корисних копалин*, наук.-техн. зб., вип. 23 (64), с. 21-26, 2005.
- [7] А. С. Кофанов, и др., «Пути снижения влажности флотоконцентрата и тонкого шлама,» *Збагачення корисних копалин*, наук.-техн. зб., вип. 23 (64), с. 142-146, 2005.
- [8] А. В. Лыков, *Теория сушки*, Москва: Энергия, 1968, 472 с.
- [9] Б. С. Сажин, и В. Б. Сажин, *Научные основы техники сушки*, Москва: Наука, 1997, 448 с.
- [10] В. И. Коновалов, Т. Кудра, и Н. Ц. Гатапова, «Новые зарубежные исследования в области сушки и термообработки: результаты и тенденции,» *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та*, т. 14, № 3, с. 530-537, 2008.
- [11] Т. Ф. Киселева, *Технология сушки: Учебно-методический комплекс*, Кемеровский технологический институт пищевой промышленности, Кемерово, 2007, 117 с.
- [12] М. Д. Герасимов, М. П. Покушалов, и А. Л. Покушалов, «Устройство сушки,» *RU 2459164 C1*. 20.08.2012.
- [13] К. А. Данилов, Д. Р. Кривошеев, и Е. В. Гусев, «Аппарат для сушки дисперсных материалов,» *Молодые ученые — развитию текстильно-промышленного кластера*, № 1, с. 502-504, 2016.
- [14] А. И. Сокольский, Е. В. Гусев, и О. Б. Колибаба, «Условия и конструктивные меры масштабного перехода от лабораторных установок к промышленным образцам при проектировании сушильных агрегатов вихревого типа,» *Вестник Ивановского государственного энергетического университета*, № 2, с. 22-29, 2020.
- [15] С. Ф. Шинкоренко, Е. П. Белецкий, и А. А. Ширяев, *Справочник по обогащению руд черных металлов*, Москва: Недра, 1980, 482 с.
- [16] О. В. Замицкий, «Экологически чистый способ доводки тонкодисперсных продуктов обогащения по влажности,» Москва, *МГГУ*, № 3, с. 82-84, 1995.
- [17] О. В. Замицкий, «Разработка способа и технических средств доводки по влажности тонкодисперсных продуктов обогащения прямым воздействием переменного электрического тока,» дис. канд. техн. наук., Криворожский технический университет, Кривой Рог, 1995, 29 с.

Рекомендована кафедрою інженерних систем у будівництві, ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 5.11.2021

Замицький Олег Володимирович — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри теплоенергетики, e-mail: olegvladam@knu.edu.ua ;

Бондар Наталя Василівна — старший викладач кафедри теплоенергетики, e-mail: bondar_nv@knu.edu.ua ;

Крадощон Сергій Олександрович — аспірант кафедри гірничих машин та обладнання, e-mail: kradozhon.so@knu.edu.ua .

Криворізький національний університет, Кривий Ріг

O. V. Zamytskyi¹
N. V. Bondar¹
S. O. Kradozhon¹

Laboratory Studies of the Combined Method of Dehydration by Internal Heat Sources in the Conditions of Electric Heating

¹Kyryvi Rih National University

The constant deterioration of the quality of iron ore necessitates the processing of hard-to-enrich minerals that require deep enrichment, and complicates dehydration. Coal processing plants widely use processes carried out in aquatic environments, during which, along with the separation of mineral impurities in the coal remains a significant amount of ballast - water. Therefore, the final operations in the enrichment process are mechanical and thermal dehydration of coal enrichment products, primarily coal concentrates and sludges. The main difficulties are the drying of flotation concentrate (0...0,5 mm) and fine concentrate (0,5...6 mm), which retained after mechanical dehydration residual humidity of 23...27% and about 13%, respectively, which necessitates additional heat drying, the quality of coal concentrate, fuel consumption, energy and metal consumption of the process depend on the method and hardware design. The use of thermal drying for humidity adjustment is associated with a sharp increase in investment and consumption of scarce energy, which in today's raw materials market and the situation in the economy are impractical. Dehydration by filtration on vacuum filters, which has become widespread in concentrators, does not allow obtaining enrichment products with conditioned humidity. At the raised humidity of concentrate expenses for its transportation to the consumer increase, and in the winter time it's freezing in railway cars is possible. The development of effective methods for drying and heat treatment of dispersed materials is becoming important in practice due to the high requirements for the quality of finished products and the need to move to energy- and resource-saving technologies. Dehydration of sludge sediments is a big problem, because the existing filtration methods are not very suitable for this. Thus, the establishment of patterns of dehydration of finely dispersed materials is an urgent scientific task.

Keywords: drying installations, energy efficiency, fine materials.

Zamytskyi Oleh V. — Dc. Sc. (Eng), Professor, Head of the Chair of Thermal Power Engineering, e-mail: olegvladzam@knu.edu.ua ;

Bondar Natalia V. — Senior Lecturer of the Chair of Thermal Power Engineering, e-mail: bondar_nv@knu.edu.ua ;

Kradozhon Serhii O. — Post-Graduate Student of the Chair of Mining Machinery and Equipment, e-mail: kradozhon.so@knu.edu.ua