

ХІМІЧНА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ЕКОЛОГІЯ

Д. П. Кіндзера, В. М. Атаманюк, З. Я. Гнатів, І. М. Мітін

Національний університет “Львівська політехніка”,

кафедра хімічної інженерії

kindzera74@ukr.net

ВИРОБНИЦТВО ЛЕГКИХ НАПОВНЮВАЧІВ
НА ОСНОВІ ТЕХНОГЕННОЇ СИРОВИНИ<https://doi.org/10.23939/ctas2021.01.131>

В Україні разом зі збільшення потреби тоннажності виробництва легких наповнювачів зростає потреба у сировинних ресурсах, адже більшу частину асортименту легких наповнювачів виготовляють з природної сировини.

Отже, перспективним напрямом утилізації шлаків ТЕС та вугільного концентрату, отриманого збагаченням первинного вугільного шламу, є залучення останніх у виробничий процес із забезпеченням попереднього їх сушіння. Реалізація сушіння шлаків ТЕС та вугільного концентрату фільтраційним методом дасть змогу зменшити споживання енергії, оскільки значна кількість вологи із вказаних матеріалів буде витіснятися та виноситися рухомим тепловим агентом внаслідок перепаду тисків. Результати досліджень впливу швидкості руху теплового агента на тривалість процесу сушіння шлаку ТЕС та вугільного концентрату, а також отримані значення коефіцієнтів тепловіддачі за різних швидкостей руху теплового агента для шлаку ТЕС $\alpha = 40 \div 112 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$ та вугільного концентрату $\alpha = 92,5 \div 294 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$ дадуть змогу розрахувати енергозатрати та науково обґрунтовано запропонувати оптимальні технологічні параметри для інтенсифікації процесу сушіння компонентів шихти для виробництва пористих наповнювачів.

Ключові слова: пористі теплоізоляційні наповнювачі; утилізація; шлаки ТЕС; вугільний концентрат; фільтраційне сушіння; тепловий агент; коефіцієнт тепловіддачі.

Вступ

Сучасні тенденції розвитку будівельної промисловості тісно пов'язані із використанням теплоізоляційних пористих наповнювачів, які здатні змінювати в широких межах густину, теплопровідність та міцність будівельних конструкцій та виробів, надаючи останнім нових властивостей [1–3]. Завдання збільшення обсягів виробництва пористих наповнювачів актуальне, беручи до уваги підвищення попиту на продукцію. У світовій практиці намітилась стійка тенденція до застосування побічних продуктів промисловості для їх виробництва, а саме: кускових паливних або відвальних металургійних шлаків, доменних гранульованих шлаків, зол виносу котелень та золошлакових

сумішей теплових електростанцій, цегляного бою та відходів вуглезбагачення [4–6].

В Україні разом із потребою збільшення тоннажності виробництва легких наповнювачів зростає потреба у сировинних ресурсах, адже більшу частину асортименту легких наповнювачів виготовляють з природної сировини і рідше із використанням побічних продуктів промисловості [4, 7]. Отже, побічні продукти виробництва можуть використовуватись як сировинні компоненти для виготовлення керамзиту, аглопориту, вермикуліту, жужільної пемзи, перліту, а також наповнювачів на основі гідросилікатів [3], тому “відходами” чи “вторинними продуктами” їх можна вважати лише щодо продукції основного виробництва.

Незворотними наслідками роботи вугільно-переробної промисловості та теплоенергетики є утворення та накопичення величезних обсягів твердих відходів, які є постійним джерелом забруднення навколишнього середовища та спричиняють загрози для населення. Щороку в Україні накопичується приблизно 8 млн тонн золошлаків вугільних ТЕС та ТЕЦ, а обсяги вже накопичених сягають 300 млн тонн [9]. Основна кількість золошлакових відходів у Прикарпатті утворюється на Бурштинській ТЕЦ (в середньому 80 тис. т/рік), вони розміщені на 204,6 га. На території Червоноградського вугільного району накопичено близько 14 млн м³ грубих та 12 млн м³ дрібних фракцій хвостів збагачення у результаті діяльності вуглезбагачувальної фабрики. Беручи до уваги неналежний рівень вторинного використання, переробки та утилізації, обсяги останніх невпинно зростають.

У сучасних умовах нестачі природних ресурсів утилізація відходів вуглезбагачення та шлаків ТЕС та ТЕЦ із їх залученням у виробничі цикли як вторинної сировини для отримання нових продуктів є важливим завданням сьогодення. В Україні вже реалізовано деякі рішення щодо утилізації вугільних шлаків та золошлаків ТЕЦ. Вугільні шлами, зокрема вуглецевмісні аргіліти Червоноградської збагачувальної фабрики, із теплою згорання 12–14 МДж за зольності 35–45 % і вологості до 22 % подають на збагачення, а отриманий післяфлотаційний вугільний концентрат після зневоднення використовують як енергетичний компонент шихти для спалювання в котлах ТЕЦ [10–12]. Золу та шлаки ТЕС частково використовують як складову сировинної шихти для виготовлення будівельних виробів [6, 13]. Однак рівень утилізації золошлакових відходів ТЕС в Україні низький і становить не більше ніж 7,5 %, тоді як країни ЄС утилізують приблизно 43 % їх загального обсягу [9], низький також рівень утилізації вугільних шлаків.

Одним із перспективних напрямів залучення вказаних відходів у виробничий процес є використання їх для виробництва теплоізоляційних пористих наповнювачів, зокрема, аглопоритового гравію [14], який за класичною технологією

одержують випалюванням шихти, основним компонентом якої є глина або глиниста порода, а додатками – вугілля та тирса, які здатні до вигорання за температури 1200–1500 °С, що сприяє формуванню пористості готового продукту [3, 13].

У разі залучення у виробничий цикл відходів вуглезбагачення та шлаків ТЕС основні сировинні компоненти шихти можна замінити на флотаційну глинисту породу, а додатками можуть бути дрібна фракція вугільного концентрату, отримана повторним збагаченням первинного вугільного шламу, та шлаки ТЕС та ТЕЦ [11]. На більшості діючих ТЕС застосовують систему гідротранспортування золошлакових сумішей у відвали. Тому шлаки та вугільний концентрат – це гідросуміші, які потребують попередньої дегідратації.

Найбільша проблема реалізації процесів сушіння вугільного концентрату та шлаків ТЕС, після їх попереднього зневоднення у центрифугах чи гідроциклонах, полягає в тому, що під час їх сушіння у барабанних сушарках за температур теплового агента більше ніж 300 °С пилоподібна фракція здатна до самозагорання, що спричиняє виробничі небезпеки.

Внаслідок низької ефективності використання теплової енергії в барабанних сушарках енергетичні затрати на процес сушіння у декілька разів більші, ніж потрібно для перетворення вологи на пару.

Реалізація сушіння вугільного концентрату та шлаків ТЕС фільтраційним методом дає змогу використати низькотемпературний тепловий агент; інтенсифікувати процеси масо- та теплопередавання, збільшивши швидкість руху теплового агента до науково обґрунтованих меж, і завдяки цьому зменшити тривалість сушіння, беручи до уваги вищі значення коефіцієнтів тепло- та масовіддачі; зменшити втрати матеріалів із відпрацьованим сушильним агентом, оскільки найдрібніші частинки втримуватимуться стаціонарним шаром, а також зменшити споживання енергії під час сушіння, оскільки значну кількість вологи з вказаних матеріалів буде механічно витіснити та виносити рухомий тепловий агент внаслідок перепаду тисків. Отже, застосування фільтраційного методу сушіння дає змогу вилучити із технологічного процесу центрифугування як попередню стадію зневоднення

вугільного концентрату та шлаків ТЕС, що позитивно впливає на собівартість готової продукції.

Для розроблення науково обґрунтованих режимів фільтраційного сушіння шлаку та вугільного концентрату як складових шихти для виробництва пористих наповнювачів необхідно дослідити кінетику процесу, щоб визначити його тривалість та встановити оптимальні параметри інтенсифікації. Фільтраційне сушіння є складним тепло- та масообмінним процесом, який відбувається між частинками матеріалів та сушильним агентом під час його профільтовування крізь пористий шар. Тому експериментальний метод дослідження є надійнішим для визначення коефіцієнтів тепловіддачі від сушильного агента до частинок нерухомого шару. Отримані значення дадуть змогу розрахувати енергозатрати на реалізацію процесу, проведеного за різних швидкостей руху теплового агента.

Мета роботи – дослідження основних закономірностей кінетики та теплообміну фільтраційного сушіння вугільного концентрату та шлаку ТЕС за різних швидкостей руху теплового агента з метою зниження енергозатрат та інтенсифікації процесу зневоднення компонентів шихти для виготовлення легких наповнювачів.

Матеріали та методи досліджень

Шлак. У звалищах спостерігається неоднорідність шлаку за хімічним складом, насипною густиною, кількістю незгорілих частинок вугілля тощо. Як об'єкт сушіння шлак Бурштинської ТЕЦ являє собою полідисперсну суміш з розмірами частинок 0,16–15 мм та середнім вологовмістом 0,28 кг H_2O /кг сух. мат., зумовленим наявністю вологи всередині пористої структури частинок, поверхневої вологи та вологи міжзернового простору стаціонарного шару, яка утримується силами поверхневого натягу в порах і каналах між окремими частинками.

Вугільний концентрат. Для дослідження використано фракцію вугільного концентрату $d = (0,63, 0,31) \cdot 10^{-3} \text{ м}$ Червоноградської збагачувальної фабрики з початковим вологовмістом

0,66 кг H_2O /кг сух. мат., зумовленим наявністю внутрішньої вологи в порах частин, поверхневої вологи частин та вільної вологи, яка утримується силами поверхневого натягу в порах і каналах між частинками.

Оскільки вологовмісти шлаку та вугільного концентрату перевищують необхідний формувальний вологовміст шихти для виробництва аглопориту, то виникає потреба сушіння останніх. Дослідження кінетики процесу сушіння шлаку та вугільного концентрату, а також процесу теплообміну проводили на експериментальній установці фільтраційного сушіння за методиками, наведеними у роботі [15].

Результати досліджень та їх обговорення

Результати експериментальних досліджень впливу швидкості руху теплового агента на зміну вологовмісту шарів шлаку та вугільного концентрату в часі під час реалізації процесу фільтраційного сушіння подано у вигляді графічних залежностей на рис. 1 та 2, відповідно. Висоту шару та температуру теплового агента для кожного шару вибирали як оптимальні на підставі попередньо виконаних розрахунків енергозатрат.

Як видно з рис. 1, вологовміст шлаку в результаті сушіння змінюється від 0,28 до 0,01 кг H_2O /кг сух. мат. Аналіз рис. 1 показує, що збільшення швидкості теплового агента від 0,63 до 2,02 м/с дає змогу зменшити тривалість сушіння (табл. 1).

Отже, збільшення швидкості руху теплового агента втричі дає змогу зменшити час сушіння у 2,2 разу.

На рис. 2 наведено результати досліджень зміни вологовмісту вугільного концентрату в часі для перепадів тиску для сухого матеріалу $DP_{\text{сх.}} = 1962; 3924; 5886 \text{ Па}$ і, як наслідок, – за різних швидкостей руху теплового агента. Вологовміст вугільного концентрату в результаті сушіння змінюється від 0,66 кг/кг сух. мат. до 0,01 кг/кг сух. мат. Залежність тривалості сушіння вугільного концентрату від перепадів тиску за сухим матеріалом подано у табл. 2.

Таблиця 1

Залежність часу сушіння шлаку від фіктивної швидкості руху теплового агента

Фіктивна швидкість U_0 , м/с	0,63	0,98	1,33	1,67	2,02
Тривалість процесу, t , с	830	760	580	450	380

w^c , кг H_2O /кг сух. м.

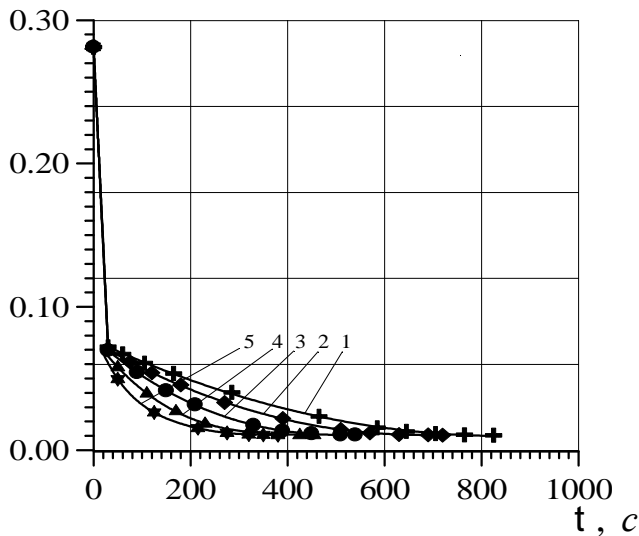


Рис. 1. Зміна вологовмісту стаціонарного шару шлаку в часі ($H=120 \cdot 10^{-3}$ м; $T=353$ К):

1 – $v_0 = 0,63$ м/с; 2 – $v_0 = 0,98$ м/с; 3 – $v_0 = 1,33$ м/с;
4 – $v_0 = 1,67$ м/с; 5 – $v_0 = 2,02$ м/с

w^c , кг H_2O /кг сух. м.

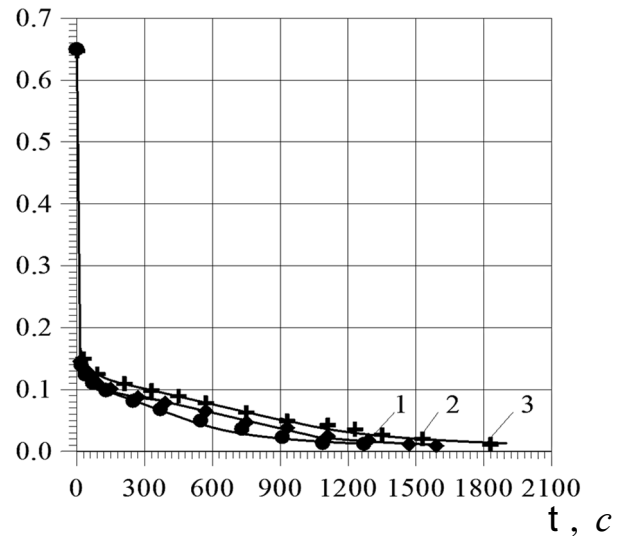


Рис. 2. Зміна вологовмісту стаціонарного шару вугільного концентрату в часі ($H=75 \cdot 10^{-3}$ м; $T=318$ К):

1 – $DP=5886$ Па, 2 – $DP=3924$ Па, 3 – $DP=1962$ Па

Таблиця 2

Залежність часу сушіння вугільного концентрату від перепадів тиску за сухим матеріалом

Перепад тисків DP , Па	1962	3924	5886
Тривалість процесу, t , с	1860	1590	1275

Отже, зростання перепаду тисків за сухим матеріалом в три рази приводить до зменшення часу сушіння в 1,46 разу.

Як видно з наведених графічних залежностей, для обох матеріалів наявний період механічного витіснення та винесення вологи зі стаціонарних шарів останніх (прямолинійна ділянка на рис. 1 та рис. 2), що забезпечуватиме зменшення енергозатрат на реалізацію процесів сушіння. У вказаний період рухомий тепловий агент видаляє поверхневу вологу, яка втримується частинками шлаку та вугілля за рахунок сил поверхневого натягу, а також вільну вологу, що міститься у проміжках між частинками.

Окрім механічного витіснення та винесення вологи, процеси фільтраційного сушіння шлаку та вугільного концентрату (рис. 1 та рис. 2) характеризуються наявністю двох періодів: повного насичення теплового агенту вологою, що триває до

досягнення фронтом масообміну перфорованої перегородки (значення швидкості сушіння постійне) та часткового насичення теплового агенту вологою, за якого простежується поступове збільшення сухого матеріалу за висотою шару (швидкість сушіння знижується).

Для визначення коефіцієнтів тепловіддачі від теплового агенту (за різних швидкостей його руху) до частинок шлаку та вугільного концентрату проводили експериментальні дослідження у “тонкому шарі”, які полягали у вимірюванні температури теплового агенту над та під шарами досліджуваних матеріалів. Результати експериментальних досліджень процесу теплообміну подано у вигляді графічних залежностей зміни температури теплового агенту на виході із шару шлаку (рис. 3) та на виході із шару вугільного концентрату (рис. 4).

Беручи до уваги середньоарифметичне значення температури теплового агенту \bar{t} , К та тривалість процесу Δt , с (згідно з даними рис. 3 та рис. 4); середнє значення температури поверхні частин матеріалів, \bar{T}_n , К; поверхню теплообміну F , м² та кількість теплоти, витраченої на нагрівання шарів матеріалів ΔQ , Дж, розраховували значення коефіцієнтів тепловіддачі α від теплового агенту до частин шлаку та вугілля, використовуючи залежність [15]:

$$\alpha = \frac{\Delta Q}{F \times (\bar{t} - \bar{T}_n) \times \Delta t} \quad (1)$$

Кількість теплоти, витраченої на нагрівання шарів матеріалів, визначали з рівняння:

$$DQ = m \times c_s \times (\bar{T} - T_0) \quad (2)$$

де m – маса матеріалу; кг; c_s – теплоємність матеріалу, Дж/кг·К; \bar{T} – середня температура поверхні

частин всередині шару, К; T_0 – початкова температура частин, К.

Залежність значень коефіцієнтів тепловіддачі **а** для шлаку та вугільного концентрату за різних швидкостей руху теплового агенту подано у вигляді графічних залежностей на рис. 5 та рис. 6, відповідно.

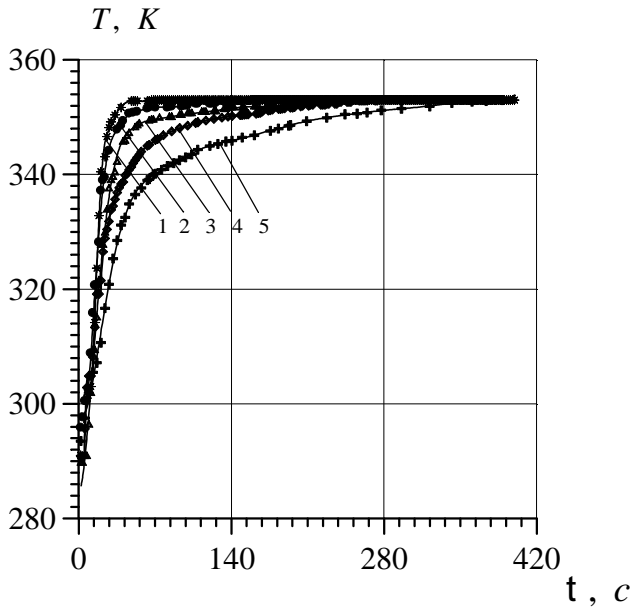


Рис. 3. Зміна температури теплового агенту на виході із шару шлаку ($H = 0,010$ м): 1 – $v_0 = 2,02$ м/с; 2 – $v_0 = 1,67$ м/с; 3 – $v_0 = 1,33$ м/с; 4 – $v_0 = 0,98$ м/с; 5 – $v_0 = 0,63$ м/с

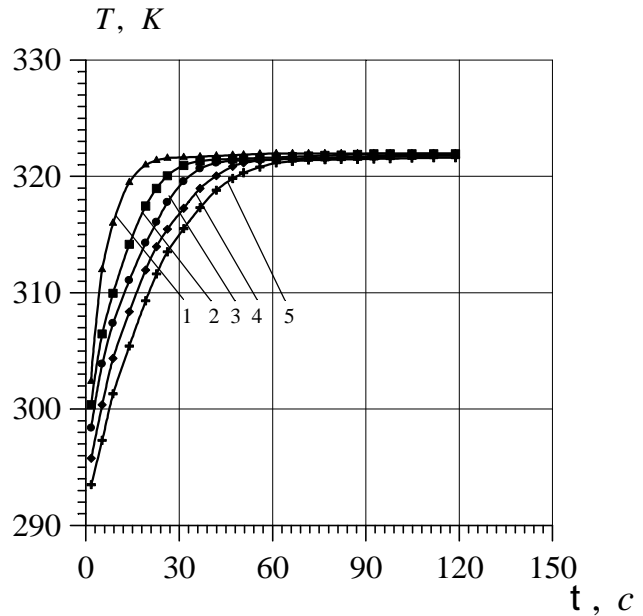


Рис. 4. Зміна температури теплового агенту на виході із шару вугільного концентрату ($H = 0,010$ м): 1 – $v_0 = 2,7$ м/с; 2 – $v_0 = 2,19$ м/с; 3 – $v_0 = 1,67$ м/с; 4 – $v_0 = 1,14$ м/с; 5 – $v_0 = 0,59$ м/с

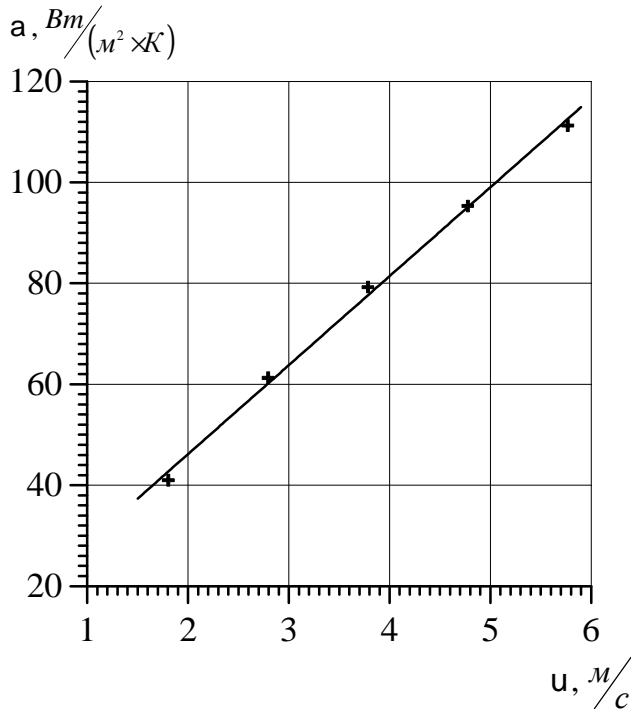


Рис. 5. Значення коефіцієнтів тепловіддачі a від теплового агенту до частин шлаку

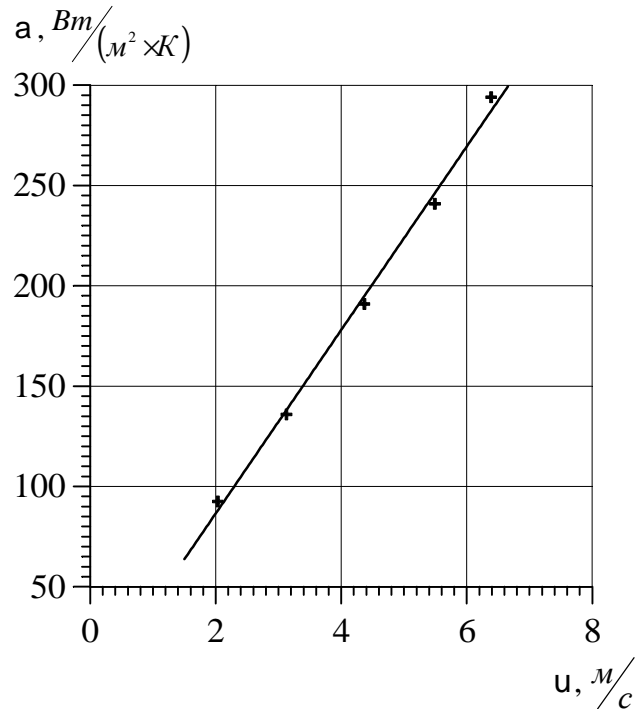


Рис. 6. Значення коефіцієнтів тепловіддачі a від теплового агенту до частин вугільного концентрату

Враховуючи складність гідродинамічної картини руху теплового агенту крізь шари шлаку та вугільного концентрату, значення коефіцієнтів тепловіддачі є усередненими. Розраховані значення коефіцієнтів тепловіддачі від теплового агенту до частин шлаку та вугільного концентрату дадуть змогу розрахувати енергозатрати на реалізацію процесу фільтраційного сушіння вказаних матеріалів.

Висновок

Запропонований метод утилізації шлаку та вугільного концентрату, отриманого збагаченням первинного вугільного шламу, забезпечить підвищення рівня екологічної безпеки промислових об'єктів, а також дасть змогу розширити сировинну базу для одержання пористих наповнювачів, зменшити енерговитрати на виробництво останніх завдяки застосуванню енергоефективного методу сушіння, що позитивно вплине на собівартість продукції.

Результати досліджень кінетики сушіння шлаку та вугільного концентрату та отримані внаслідок узагальнення результатів теплообміну значення коефіцієнтів тепловіддачі від теплового агенту до частин шлаку $\alpha = 40 \div 112 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$ та вугільного концентрату $\alpha = 92,5 \div 294 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$ дадуть змогу розрахувати енергозатрати та науково обґрунтовано вибрати оптимальні параметри теплового агенту для інтенсифікації процесу сушіння компонентів шихти для виробництва пористих заповнювачів.

References

1. Братута, Е. Г., Павленко, А. М., Кошлак, А. В., Круглякова, О. В. (2010). Пористі теплоізоляційні матеріали. Харків: Едена.
2. Кривенко, П. В., Пушкарьова, К. К., Кочевих, М. О. (2001). Заповнювачі для бетону. Київ: ФАДА, ЛТД.
3. Герич, О. С., Ракицький, В. Л., Собченко, В. В. (2012). Застосування пористих заповнювачів для бетону. *Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут"* Серія "Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження", 1(19), 36–40.
4. Нефедова, Л. С., Стржалковская, Н. В., Энтин, З. Б. (2012). Зола ТЭС – сырье для цемента и бетона. *Цемент и его применение*, 2, 40–46.
5. Челядин, Л. І. (2013). Техногенні відходи та їх перетворення у будівельні матеріали. *Науковий вісник НЛТУ України*, 23(17), 85–90.
6. Челядин, Л. І. (2000). Екологічні та хіміко-технологічні аспекти утилізації та модифікації техногенних матеріалів. *Вопросы химии и химической технологии*, 1, 250–252.
7. Павленко, А. М., Чейлытко, А. А. (2009). Создание основы для нового теплоизоляционного материала. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*, 39, 13–16.
8. Гвоздевич, О., Кульчицька-Жигайло, Л. (2020). Розвиток інноваційних низьковуглецевих технологій для вуглецевмісних відвальних масивів. *Проблеми та перспективи реалізації та впровадження міждисциплінарних наукових досягнень*, т. 2. doi:10.36074/12.06.2020.v2.12
9. Як заробити на промислових відходах (2020, April 03). Retrieved from <https://re-solutions.com.ua/yak-zarobyty-na-promyslovyh-vidhodah>
10. Георгій, П. (2020, December 23). Золи та золошлаки ТЕС і ТЕЦ – відходи чи цінна сировина? Retrieved from <http://neiau.org/zoly-ta-zoloshlaky-tes-i-tecz-vidhody-chy-czinna-syrovyna/>
11. Дунаевская, Н. И. (2012). К вопросу о комплексном использовании шламов, сухих отходов углеобогащения, высокосольного и бурого угля в энергетике: доклад на совещании у Президента НАН Украины 22.02.12. Retrieved from <http://escosys.narod.ru/2012-5>
12. Полулях, А. Д., Зозуля, О. А., Полулях, Д. А., & Перерва, А. Ю. (2010). Перспективы применения мокрой винтовой сепарации для обогащения первичного угольного шлама на цоф "Червоноградская". *Збагачення корисних копалин*, 40(81), 71–80.
13. Хлопицький, О. О. (2014). Стан, проблеми та перспективи переробки золошлакових відходів теплоелектростанцій України. *ScienceRise*, 4(2(4)), 23. doi:10.15587/2313-8416.2014.28511
14. Абашина, К. О. (2016). Утилізація промислових відходів: конспект лекцій з навчальної дисципліни. Нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова.
15. Атаманюк, В. М., Гумницький, Я. М. (2013). Наукові основи фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів. Львів: Видавництво Львівської політехніки.

D. P. Kindzera, V. M. Atamaniuk, Z. Ya. Gnativ, I. M. Mitin

Lviv Polytechnic National University,
Department of Chemistry Engineering
kindzera74@ukr.net

PRODUCTION OF LIGHT FILLERS ON THE BASIS OF TECHNOGENIC RAW MATERIALS

In Ukraine, along with the growing demand for tonnage production of light fillers, the need for raw materials is growing, considering that most of the range of light fillers is made from natural raw materials. Thus, a promising direction of utilization of TPP slags and coal concentrate obtained by enrichment of primary coal sludge is there involvement to the production process after preliminary drying. Drying of the thermal power plant slag and the coal concentrate, which are hydraulic mixtures, by the filtration method will reduce energy consumption due to the displacement and removal of significant amount of moisture by the moving thermal agent due to the pressure drop. The results of studies of the thermal agent velocity effect on the drying process duration of TPP slag and coal concentrate, as well as the obtained values of heat transfer coefficients at different velocities of the thermal agent for TPP slag $\alpha = 40 \div 112$ and coal concentrate $\alpha = 92.5 \div 294$ will allow to calculate energy consumption and scientifically substantiate the optimal technological parameters for intensification of the drying process of the charge components for porous fillers production.

Key words: porous heat-insulating fillers; utilization; slag of thermal power plant; coal concentrate; filtration drying; thermal agent; heat transfer coefficient.