галузь знань 16 «Хімічна та біоінженерія»

спеціальність 161 «Хімічні технології та інженерія»

ФІЛЬТРАЦІЙНЕ СУШІННЯ ТЕХНОГЕННОЇ СИРОВИНИ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ЛЕГКИХ НАПОВНЮВАЧІВ

Шифр Теплообмін

ЗМІСТ

ВСТУП 3

РОЗДІЛ 1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБ'ЄКТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ 8

1.1. Характеристики об'єктів дослідження 8

1.2. Експериментальна установка 8

1.3. Методики проведення експериментальних досліджень 9

1.3.1. Методика дослідження кінетики фільтраційного сушіння шлаку та вугільного концентрату 10

1.3.2. Методика дослідження процесу теплообміну між тепловим агентом і стаціонарними шарами шлаку та вугільного концентрату 11

РОЗДІЛ 2. ФІЛЬТРАЦІЙНЕ СУШІННЯ СИРОВИННИХ КОМПОНЕНТІВ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ЛЕГКИХ НАПОВНЮВАЧІВ 12

2.1. Результати експериментальних досліджень кінетики фільтраційного сушіння шлаку та вугільного концентрату 12

2.2. Результати експериментальних досліджень процесу теплообміну між тепловим агентом і стаціонарним шаром досліджуваного матеріалу 15

2.3. Схема установки фільтраційного сушіння промислового типу та практичне застосування результатів досліджень 20

2.4. Отримання лабораторних зразків легких наповнювачів 22

РОЗДІЛ 3. ТЕХНОЛОГІЧНА СХЕМА ВИРОБНИЦТВА ЛЕГКИХ НАПОВНЮВАЧІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ШЛАКУ ТА ВУГІЛЬНОГО КОНЦЕНТРАТУ 23

ВИСНОВКИ 26

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ЛІТЕРАТУРИ

АНОТАЦІЯ

ВСТУП

Актуальність роботи. Сучасні тенденції розвитку будівельної промисловості тісно пов'язані з використанням легких наповнювачів, які здатні змінювати в широких межах густину, теплопровідність та міцність будівельних конструкцій та виробів, таким чином, надавати останнім нових властивостей [1-3]. Завдання збільшення обсягів виробництва легких наповнювачів є актуальним, зважаючи на підвищення попиту на продукцію. У світовій практиці намітилась стійка тенденція щодо застосування побічних продуктів промисловості для їх виробництва, а саме: металургійних та доменних шлаків, золошлакових сумішей теплових електростанцій 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 з використанням побічних продуктів промисловості [4, 7]. Зважаючи на вищесказане, «побічні продукти» можуть бути використаними як сировинні компоненти для виготовлення керамзиту, аглопориту, вермикуліту, жужільної пемзи, перліту, а також наповнювачів на основі гідросилікатів [3].

Постановка проблеми. Незворотними наслідками роботи теплоенергетики та вугільно переробної промисловості є утворення та накопичення величезних обсягів твердих відходів, які є постійним джерелом забруднення навколишнього середовища та спричиняють загрози для населення. Зважаючи на те, що основу енергетики України складають теплові електростанції, які забезпечують понад 50% усього виробництва електроенергії, щороку, в результаті спалювання твердого палива в котлах за температури 1200–1700°С, утворюється близько 10 млн. тон золошлаків, а обсяги вже накопичених сягають приблизно 300 млн. тон [8]. Основна кількість золошлакових відходів на Прикарпатті утворюється на Бурштинській ТЕЦ (в середньому 80 тис. т/рік), які розміщені на 204,6 гектарах земельної площі, відведеної під відвали. На

території Червоноградського вугільного басейну накопичено приблизно 14 млн. $м^3$ крупних та 12 млн. $м^3$ дрібних фракцій хвостів збагачення в результаті діяльності вуглезбагачувальної фабрики. Зважаючи на неналежний рівень вторинного використання, переробки та утилізації, обсяги останніх неупинно зростають. У сучасних умовах нестачі природних ресурсів, утилізація великотоннажних відходів вуглезбагачення, золи та шлаків ТЕС та ТЕЦ, шляхом їх залучення у виробничі цикли для отриманням нових продуктів, є важливим завданням сьогодення.

Запровадження методів роздільного вилучення золи та шлаків на ряді теплових електростанцій, дало можливість розширити способи застосування вказаних відходів для виробництва ширшого асортименту цільових продуктів з новими властивостями. Більшість інформації, наявної в джерелах літератури, подається стосовно методів утилізації золи ТЕС та ТЕЦ, яка характеризується порівняно однорідним хімічним складом і незначним вмістом незгорілих часток палива, що позитивним чином впливає на можливість її застосування в технологіях виробництва безклінкерних в'яжучих, портландцементу, легких бетонів та розчинів, а також її застосування в як основної сировини для виробництва зольної кераміки [9]. Менша інформативність спостерігається щодо методів утилізації шлаків ТЕС та вугільних шламів, однак, необхідно відзначити, що в Україні вже існують деякі рішення щодо їх раціональної утилізації. Шлаки ТЕС, що є основними видами відходів при кусковому спалюванні палива, характеризуються різноманітнісю хімічного складу, тому, до їх використання підходять з більшою обережністю. Після встановлення хімічного складу, шлак може бути використаним як складова сировинної шихти для виробництва продукції будівельної промисловості [10, 6]. Вугільні шлами, в тому числі вуглецевмісні аргіліти Червоноградської збагачувальної фабрики, які мають теплоту згорання 12– 14МДж за зольності 35-45% і вологості до 22% подають на збагачення і отриманий післяфлотаційний вугільний концентрат після сушіння у барабанних сушарках використовують як енергетичний компонент шихти для спалювання в котлах ТЕЦ [11, 12]. Однак, рівень

утилізації шлакових відходів ТЕС в Україні є низьким і становить не більше 7,5%, в той час як країни ЄС утилізують приблизно 43% їх загального обсягу, низьким є також рівень утилізації вугільних шламів.

Перспективним напрямом залучення вказаних побічних продуктів у виробничий процес є використання останніх для виробництва легких наповнювачів, зокрема, аглопоритового гравію [13], який за класичною технологією одержують шляхом випалювання шихти, основним компонентом якої є глина або глиниста порода, додатками виступають вугілля та тирса, які здатні до вигоряння за температури 1200-1500°С, що сприяє формуванню пористості готового продукту [3, 12]. У разі залучення у виробничий цикл техногенної сировини, компоненти шихти можуть бути частково чи повністю замінені вугільним концентратом, отриманим шляхом збагачення первинного вугільного шламу, а також шлаком ТЕС.

Вугільний концентрат та шлаки, для транспортування яких у відвали на більшості діючих ТЕС застосовують систему гідротранспорту, представляють собою гідросуміші, які потребують попередньої зневоднення для їх подальшого використання. Найбільша проблема реалізації процесів сушіння вугільного концентрату та шлаків, після їх попереднього зневоднення у центрифугах чи гідроциклонах, полягає в тому, що пилоподібна фракція останніх здатна до самозагорання під час реалізації процесу в барабанних сушарках за температур теплового агенту понад 300^0С, а також у значних кількостях виноситься з відпрацьованим тепловим агентом, що зумовлює необхідність встановлення очисної апаратури. Окрім цього, внаслідок низької ефективності використання теплової енергії в барабанних сушарках, енергетичні затрати на процес сушіння є в декілька разів більшими, ніж це потрібно на перетворення вологи в пару.

Вирішення проблеми. Реалізація сушіння вугільного концентрату та шлаків фільтраційним методом дає змогу використати низькотемпературний тепловий агент; інтенсифікувати процеси масо- та теплопередачі, шляхом збільшення швидкості руху теплового агенту до науково обґрунтованих меж і таким чином зменшити тривалість сушіння, зважаючи на вищі значення

коефіцієнтів тепло- та масовіддачі; зменшити втрати матеріалів з відпрацьованим сушильним агентом, оскільки найдрібніші частинки будуть втримуватись стаціонарним шаром, а також зменшити споживання енергії в процесі сушіння, оскільки значна кількість вологи з вказаних матеріалів буде механічно витіснятися та виноситися рухомим тепловим агентом внаслідок перепаду тисків. Таким чином, застосування фільтраційного методу сушіння дає змогу виключити із технологічного процесу центрифугування, як попередню стадію зневоднення вугільного концентрату та шлаку, що позитивно впливає на собівартість готової продукції.

Для розробки науково обґрунтованих режимів фільтраційного сушіння шлаку та вугільного концентрату, як складових шихти для виробництва легких наповнювачів, необхідним є проведення досліджень кінетики процесу. Фільтраційне сушіння є складним тепло- та масообмінним процесом, який відбувається між частинками матеріалів та сушильним агентом під час його профільтровування крізь стаціонарний пористий шар. Тому, експериментальний метод дослідження є найбільш достовірним для визначення коефіцієнтів тепловіддачі від сушильного агенту до частинок стаціонарного шару. Отримані значення дадуть змогу розрахувати час сушіння шлаку та вугільного концентрату в установці промислового типу та її продуктивність.

Метою роботи є дослідження основних закономірностей кінетики та теплообміну фільтраційного сушіння вугільного концентрату та шлаку ТЕС за різних швидкостей руху теплового агенту для зниження енергозатрат на реалізацію процесу та розрахунку тривалості сушіння вказаних матеріалів в установці промислового типу та її продуктивності.

Завдання. Для досягнення поставленої мети необхідно розв’язати такі завдання:

- дослідити кінетику фільтраційного сушіння шлаку та вугільного концентрату за різних швидкостей руху теплового агенту;
- встановити основні закономірності теплообміну між тепловим агентом та стаціонарним шаром шлаку та вугільного концентрату;

- розрахувати коефіцієнти тепловіддачі від теплового агенту до шарів шлаку та вугільного концентрату за різних швидкостей руху теплового агенту;
- запропонувати залежності для розрахунку тривалості фільтраційного сушіння вказаних матеріалів в установці промислового типу, а також її продуктивності;
- розробити технологічну схему виробництва легких наповнювачів з використанням техногенної сировини.

Використані методики дослідження. У роботі використовували методи фізичного та математичного моделювання процесу фільтраційного сушіння. Для визначення гранулометричного складу полідисперсних сумішей шлаку та вугільного концентрату використовували ситовий аналіз, для визначення пористості стаціонарних шарів застосовували пікнометричний метод. Для опрацювання та узагальнення результатів експериментальних досліджень використовували комп'ютерну техніку та пакети прикладних програм, а саме: Excel, Graf4Win, Corel Draw, MathCAD, AutoCAD.

Загальна характеристика роботи. Робота складається із вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел літератури. Роботу викладено на 26 сторінках основного тексту, які містять 9 рисунків та 3 таблиці.

За результатами досліджень автором опубліковано тези міжнародної конференції [17], результати впроваджено на ТзОВ «ЄВРО ТЕХ ЕКСПЕРТ БУД» (акт проведення експериментальних досліджень наповнювача для виготовлення легких бетонів [18]). Особистий вклад автора становить 85%.

РОЗДІЛ 1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБ'ЄКТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

1.1. Характеристики об'єктів дослідження

Шлак. Як об'єкт сушіння, шлак Бурштинської ТЕЦ представляв собою полідисперсну суміш з розмірами частин від $0{,}16 \cdot 10^{-3}$ до $1{,}5 \cdot 10^{-3}$ м (визначено методом ситового аналізу) та середнім вологовмістом 0,28 кг H_2O/кг сух. мат., зумовленим наявністю вологи в середині 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 використовували вугільний концентрат Червоноградської збагачувальної фабрики з розмірами частин від $0{,}31 \cdot 10^{-3}$ до $0{,}63 \cdot 10^{-3}$ м (визначено методом ситового аналізу) 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.

Початкові вологовмісти шлаку та вугільного матеріалу були визначені за стандартною методикою, представленою у роботі [14].

1.2. Експериментальна установка

Для дослідження кінетики фільтраційного сушіння шлаку та вугільного концентрату, а також процесів теплообміну між тепловим агентом та стаціонарними шарами вказаних матеріалів використовували експериментальну установку, схема якої представлена на рис. 1.1.

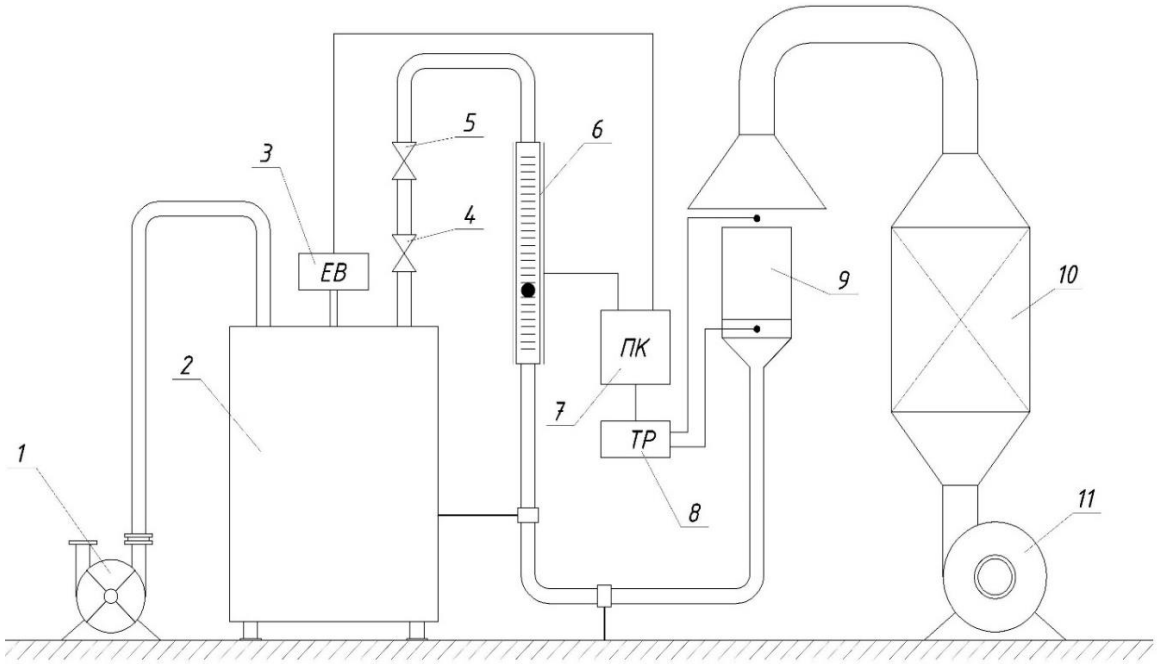

Рис. 1.1. Схема експериментальної установки: 1 – вакуумний насос; 2 – ресивер; 3 – електронний вакуумметр ДВ250А; 4, 5 – запірний і регулюючий вентилі; 6 – електронний ротаметр РПФ-І; 7 – персональний комп'ютер; 8 – електронний терморегулятор РТ-100; 9 – контейнер; 10 – калорифер; 11 – вентилятор.

1.3. Методики проведення експериментальних досліджень

Дослідження кінетики сушіння шлаку та вугільного концентрату, а також процесу теплообміну проводили на експериментальній установці фільтраційного сушіння, схема якої зображена на рис. 1.1. Формування стаціонарних шарів шлаку та вугільного концентрату проводили в контейнері 9 з внутрішнім діаметром 97 мм. Схема контейнера, як складової експериментальної установки представлена на рис. 1.2. Контейнер (1) виготовлений з алюмінію, оснащений перфорованим дном (2) та теплоізоляційною вставкою (3) з фторопласту для зменшення тепловтрат.

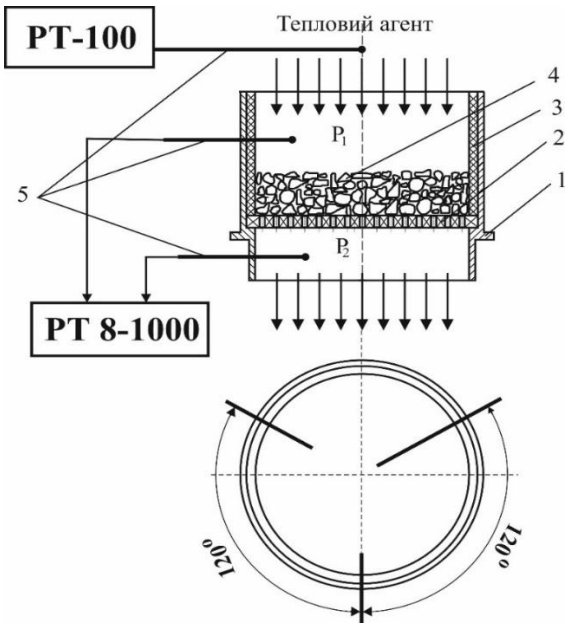

Рис. 1.2. Схема контейнера, як складової експериментальної установки: 1 –- основа контейнера; 2 – перфороване дно; 3 – теплоізоляційна вставка; 4 – стаціонарний шар матеріалу.

1.3.1. Методика дослідження кінетики фільтраційного сушіння шлаку та вугільного концентрату

Для дослідження кінетики фільтраційного сушіння, в контейнері 9 формували стаціонарний вологого матеріалу, висота якого повинна бути більшою за $H=20d_{част}$, згідно рекомендацій, представлених у роботі [14] та для зменшення нерівномірності пористості шару по висоті контейнера, враховуючи, що досліджувані матеріали (шлак та вугільний концентрат) є полідисперсними, а формування шару відбувається стихійно.

Дослідження проводили почергово для шлаку та вугільного концентрату. Для проведення досліджень вмикали вентилятор 11 та калорифер 10, за допомогою якого тепловий агент нагрівали до заданої температури (температура контролювалась за допомогою електронного терморегулятора 8). Після встановлення належної температури теплового агенту, вмикали вакуум-насос 1 та у ресивер 2 поміщали контейнер 9 із стаціонарним шаром матеріалу. За допомогою регулюючого вентиля 5 встановлювали витрати теплового

агенту, які вимірювали за допомогою електронного ротаметра 6. Дослідження проводили за різних фіктивних швидкостей фільтрування теплового агенту υ_0. Діапазон зміни швидкості профільтровування теплового агенту крізь шар матеріалу вибрано із врахуванням продуктивності промислових вентиляторів та виходячи із того, що в промислових установках загальна площа зони сушіння може становити 4–6 м^2.

Зміну маси вологого матеріалу через певні інтервали часу визначали ваговим методом. Експерименти продовжували до досягнення сталої маси зразка.

1.3.2. Методика дослідження процесу теплообміну між тепловим агентом і стаціонарними шарами шлаку та вугільного концентрату

Дослідження процесу теплообміну між тепловим агентом і стаціонарними шарами шлаку та вугільного концентрату, спрямовані на визначення коефіцієнтів тепловіддачі, проводили у «короткому шарі» для забезпечення однакової температури на поверхні всіх частинок матеріалів. Дослідження проводили окремо для кожного матеріалу. Для проведення досліджень в контейнері (рис. 1.2) формували шар досліджуваного матеріалу висотою $H=10\cdot10^{-3}$м. Дослідження полягали у вимірюванні температур теплового агенту над та під шаром досліджуваного матеріалу протягом певного часу.

Температура нагрівання теплового агенту в калорифері 10 контролювалась за допомогою електронного терморегулятора РТ-100 і підтримувалась в межах 353±0,5К для шлаку та в межах 318±0,5К для вугільного концентрату. Дослідження проводили за фіктивних швидкостей руху теплового агенту 0,63 – 2,02 м/с для шлаку та 0,6 – 2,59 м/с для вугільного концентрату, які обрано з огляду на швидкоплинність нагрівання частинок матеріалів.

Для вимірювання температури сушильного агенту на вході в стаціонарний шар та виході з нього використовували термопари, три з яких

були встановлені на відстані 0,2 м від стаціонарних шарів на вході сушильного агенту, а три - на відстані 0,2 м від перфорованого дна контейнера. Термопари встановлювали під кутом 120^0 одна до одної на відстані 0,1; 0,2 та 0,3 м від центру контейнера. Температури автоматично реєструвались за допомогою восьмиканального терморегулятора РТ 8-1000 з виводом інформації на персональний комп'ютер у файл даних.

Через певний час, температура сушильного агенту на виході з шару матеріалу наближається до температури на вході, що свідчить про сповільнення процесу теплопередачі. Таким чином, дослідження припиняли, після стабілізації температури на виході з стаціонарних шарів. За результатами трьох досліджень, визначали усереднені значення температур теплового агенту на виході із шарів шлаку та вугільного концентрату.

РОЗДІЛ 2. ФІЛЬТРАЦІЙНЕ СУШІННЯ СИРОВИННИХ КОМПОНЕНТІВ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ЛЕГКИХ НАПОВНЮВАЧІВ

2.1. Результати експериментальних досліджень кінетики фільтраційного сушіння шлаку та вугільного концентрату

Результати експериментальних досліджень впливу швидкості руху теплового агенту на зміну вологовмісту шарів шлаку та вугільного концентрату в часі під час реалізації процесу фільтраційного сушіння представлені у вигляді графічних залежностей на рис. 2.1 та 2.2, відповідно.

Як видно з рис. 2.1, вологовміст шлаку в результаті сушіння змінюється від 0,28 до 0,01 кг H_2O/кг сух. мат. Аналіз рис. 2.1 показує, що збільшення швидкості теплового агенту від 0,63 до 2,02м/с, дає змогу скоротити час сушіння (Таблиця 2.1).

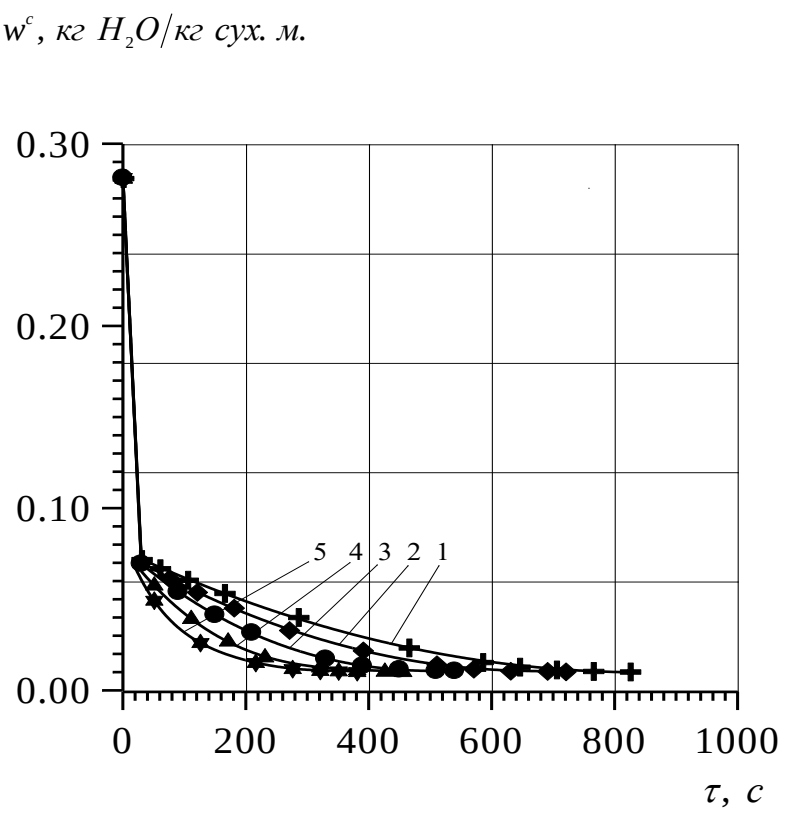

Рис. 2.1. Зміна вологовмісту стаціонарного шару шлаку в часі (H=120·10^{-3} м; T=353K): 1 – $\upsilon_0 = 0{,}63$ $м/с$; 2 – $\upsilon_0 = 0{,}98$ $м/с$; 3 – $\upsilon_0 = 1{,}33$ $м/с$; 4 – $\upsilon_0 = 1{,}67$ $м/с$; 5 – $\upsilon_0 = 2{,}02$ $м/с$

Таблиця. 2.1

Залежність часу сушіння шлаку від фіктивної швидкості руху теплового агенту

Фіктивна швидкість υ_0, м/с	0,63	0,98	1,33	1,67	2,02
Тривалість процесу, τ, c	830	760	580	450	380

Таким чином, збільшення швидкості руху теплового агенту втричі дає змогу скоротити час сушіння у 2,2 рази.

На рис. 2.2 наведені результати досліджень зміни вологовмісту вугільного концентрату в часі за різних швидкостей руху теплового агенту. Загалом, вологовміст вугільного концентрату в результаті сушіння змінюється від 0,66 до 0,01 кг H_2O/кг сух. мат. Залежність тривалості сушіння вугільного концентрату від швидкостей руху теплового агенту представлено у Таблиці 2.2.

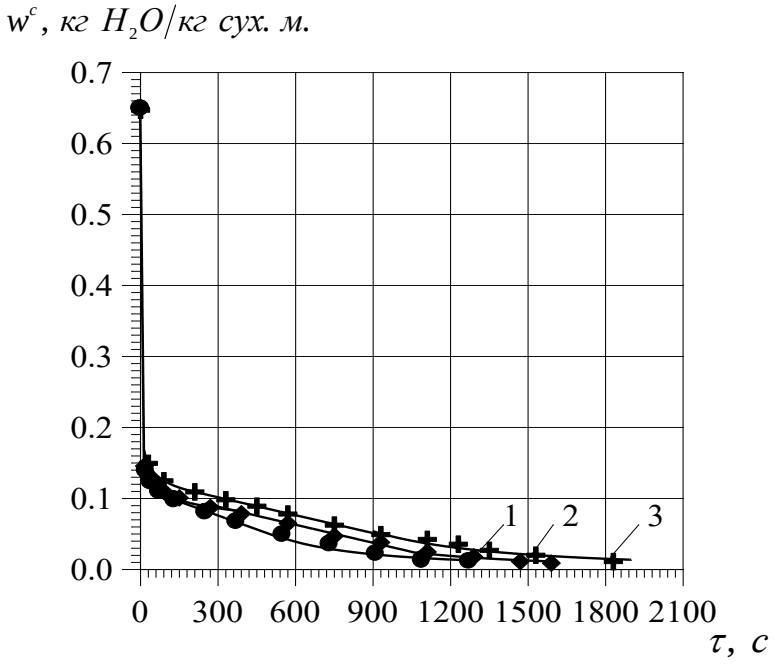

Рис. 2.2. Зміна вологовмісту стаціонарного шару вугільного концентрату в часі (H=75·10^{-3} м; T=318 К): 1 – $\upsilon_0 = 2{,}12$ м/с; 2 – $\upsilon_0 = 1{,}72$ м/с; 3 – $\upsilon_0 = 0{,}78$ м/с.

Таблиця 2.2

Залежність часу сушіння вугільного концентрату
від від фіктивної швидкості руху теплового агенту

Фіктивна швидкість υ_0, м/с	0,78	1,72	2,12
Тривалість процесу, τ, с	1860	1590	1275

Таким чином, зростання швидкостей руху теплового агенту в 2,7 рази приводить до зменшення часу сушіння в 1,46 рази.

Як видно з представлених графічних залежностей, для обидвох матеріалів є наявним період механічного витіснення та винесення вологи з стаціонарних шарів останніх (прямолінійна ділянка на рис. 2.1 та рис. 2.2), що забезпечуватиме зменшення енергозатрат на реалізацію процесів сушіння. У вказаний період рухомим тепловим агентом видаляється волога, яка втримується частинками шлаку та вугілля та міститься у проміжках між частинками. Результати досліджень кінетики сушіння шлаку та вугільного концентрату дадуть змогу науково обґрунтовано обрати оптимальні параметри теплового агенту для реалізації сушіння вказаних матеріалів.

2.2. Результати експериментальних досліджень процесу теплообміну між тепловим агентом і стаціонарним шаром досліджуваного матеріалу

Результати експериментальних досліджень процесу теплообміну представлені у вигляді графічних залежностей зміни температури теплового агенту на виході із шару шлаку (рис. 2.3) та на виході із шару вугільного концентрату (рис. 2.4).

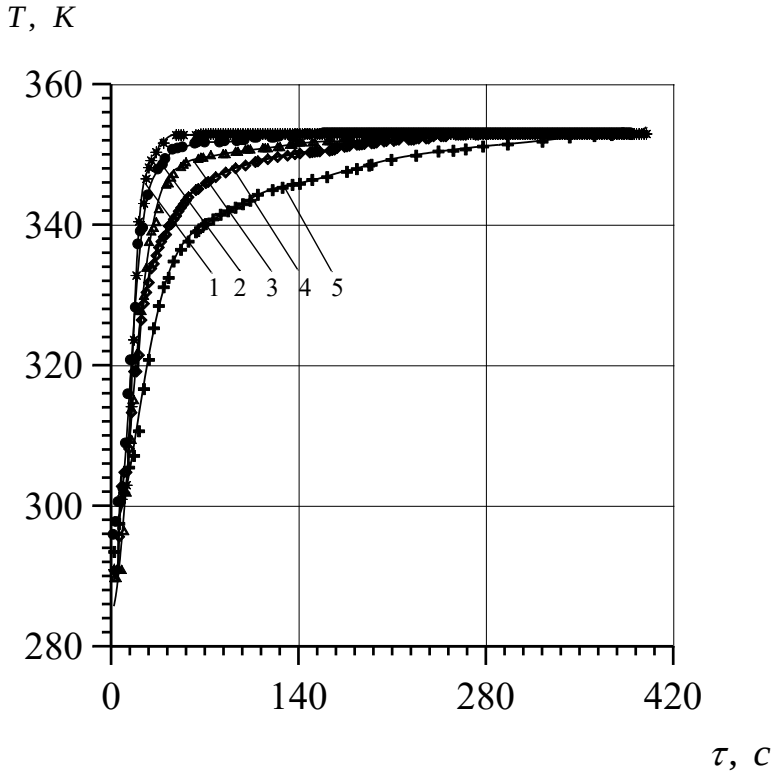

Рис. 2.3. Зміна температури теплового агенту на виході із шару шлаку (Н = 0,010 м): 1 – $\upsilon_0 = 2{,}02$ $м/с$; 2 – $\upsilon_0 = 1{,}67$ $м/с$; 3 – $\upsilon_0 = 1{,}33$ $м/с$; 4 – $\upsilon_0 = 0{,}98$ $м/с$; 5 – $\upsilon_0 = 0{,}63$ $м/с$

Шляхом профільтровування теплового агенту крізь шар матеріалу, забезпечується внесення в його об’єм теплоти, яка спричиняє нагрівання частинок. На початку процесу теплообміну, практично вся теплота, що вноситься в шар тепловим агентом залишається в ньому, тому тепловий агент на виході з шару характеризується низькими значеннями температур. В ході процесу теплообміну, частинки матеріалу поступово нагріваються і потенціал теплового агенту починає використовуватися неповністю, про що свідчить

зростання температури останнього на виході з шару. В кінці процесу теплообміну температура теплового агенту на виході з шару наближається до його температури на вході.

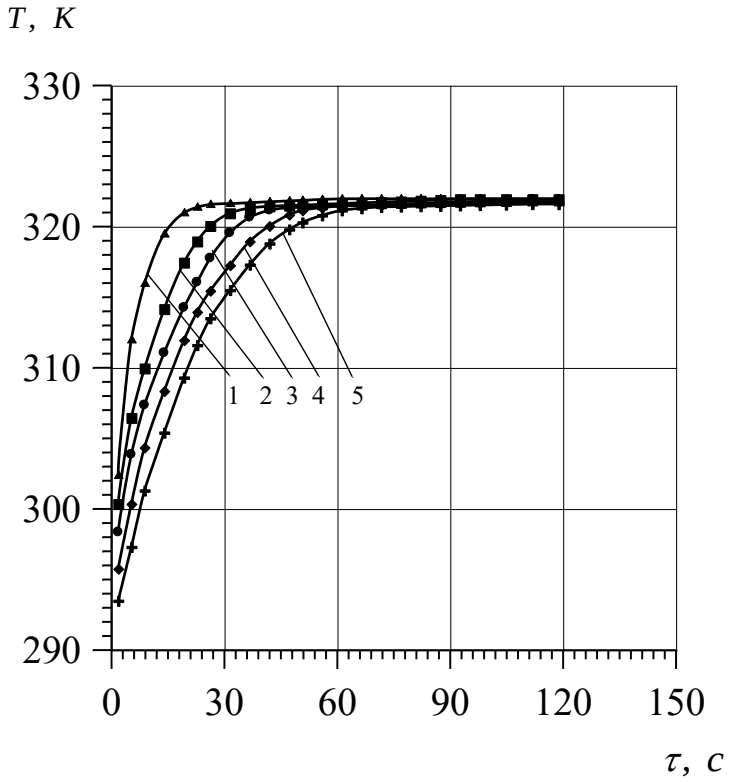

Рис. 2.4. Зміна температури теплового агенту на виході із шару вугільного концентрату (Н = 0,010 м): 1 – $\upsilon_0 = 2{,}7\ м/с$; 2 – $\upsilon_0 = 2{,}19\ м/с$; 3 – $\upsilon_0 = 1{,}67\ м/с$; 4 – $\upsilon_0 = 1{,}14\ м/с$; 5 – $\upsilon_0 = 0{,}59\ м/с$

Виходячи з вищесказаного, на кривих, отриманих за різних швидкостей профільтровування теплового агенту крізь шар шлаку (рис. 2.3) та вугільного концентрату (рис. 2.4), можна виділити дві ділянки. Вертикальна ділянка відображає поступове зростання температури теплового агенту на виході з шару, який прогрівається. Чим більше прогрівається шар, тим менше тепла залишається в ньому і, відповідно, температура теплового агенту на виході з шару зростає. Горизонтальна ділянка характеризує постійність температури теплового агенту на виході з шару матеріалу, після його прогрівання.

За збільшення швидкості руху теплового агенту, збільшується кількість тепла, яка вноситься в стаціонарний шар матеріалу протягом певного часового інтервалу, що приводить до інтенсифікації процесу теплообміну. На

інтенсифікацію теплообміну вказує зменшення часу, необхідного для стабілізації температури теплового агенту на виході із шару шлаку (рис. 3.3) та вугільного концентрату (рис. 2.4).

Результати досліджень, представлені на рис. 2.3. та рис. 2.4, використані для розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі $\alpha_{експ}$ від теплового агенту до частин шлаку та вугільного концентрату. Розрахунок коефіцієнтів тепловіддачі для обох матеріалів проводили згідно залежності [14]:

$$\alpha_{експ} = \frac{\Delta Q}{F \cdot \left(\bar{t} - \overline{T}_{п.}\right) \cdot \Delta\tau} . \qquad (2.1)$$

де F – поверхня теплообміну, сформовано з частинок матеріалу, м^2;

$\Delta\tau$ – час проведення теплообмінного процесу (дані з рис. 3 та рис. 4), с;

$\bar{t}$ – середньоарифметичне значення температури теплового агенту (розраховане з врахуванням значень температури на вході в шар та на виході згідно із замірами, наведеними на рис. 3.3 та рис. 3.4), К;

$\overline{T_{п.}}$ – середнє значення температури поверхні частин матеріалу, К.

ΔQ − кількість теплоти, затраченої на нагрівання шару, *Дж*.

Для використання залежності (2.1), за рівнянням теплового балансу визначено кількість теплоти ΔQ, Дж, що затрачається на нагрівання шару матеріалу [14]:

$$\Delta Q = m \cdot c_s \cdot \left(\overline{T} - T_0\right) \qquad (2.2)$$

де m – маса матеріалу, кг;

c_s – теплоємність матеріалу, Дж/кг·К;

$\overline{T}$ – середня температура поверхні частин всередині шару, К;

T_0 –початкова температура частинок матеріалу, К.

Для використання залежності (2.1), необхідно визначити середнє значення температури поверхні частинок матеріалів $\overline{T}_п$, яке є більшим від середнього значення температури поверхні частинок матеріалів $\overline{T}$. Враховуючи те, що тепловий агент фільтрується крізь шари шлаку та

вугільного концентрату, що характеризуються високою порізністю, прийнято ряд допущень:

- частинки омиваються тепловим агентом з усіх сторін рівномірно;
- температура теплового агенту є однаковою з усіх сторін частинок;
- розподіл температурного поля по об'єму частинки має параболічний характер.

З врахуванням допущень, середнє значення температури поверхні частинок $\overline{T}_n$ визначали згідно залежності [15]:

$$\overline{T}_n = t - \left(t - T_0 \cdot e^{-\mu_1^2 \cdot Fo}\right) \cdot \left(1 - \frac{r}{R}\right) \cdot e^{-\mu_1^2 \cdot Fo} \qquad (2.3)$$

де t – температура теплового агенту, К;

$R,\ r$ – середні радіуси частинок матеріалів і біжучий радіус, відповідно $(0 < r \le R)$, м;

μ_n – корінь характеристичного рівняння;

Fo – число Фур'є.

За встановленого режиму теплообміну, значення критерію Фур'є $Fo > 3$. В такому разі, можна обмежитись застосуванням першого кореня характеристичного рівняння μ_1 залежності (2.3).

Приймаючи до уваги усі визначені параметри, згідно залежності (2.1) розраховані значення коефіцієнтів тепловіддачі $\alpha_{експ}$ від теплового агенту до частинок шлаку та вугільного концентрату. Залежність коефіцієнту тепловіддачі $\alpha_{експ}$ від дійсної швидкості руху теплового агенту крізь шар шлаку та вугільного концентрату, представлені у вигляді графічних залежностей на рис. 2.5. та рис. 2.6, відповідно.

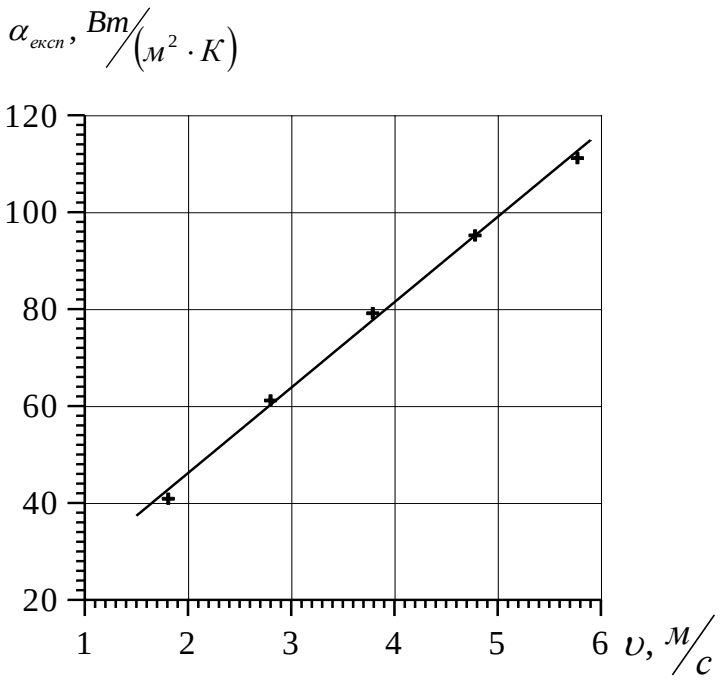

Рис. 2.5. Залежність коефіцієнту тепловіддачі $\alpha_{експ}$ від дійсної швидкості руху теплового агенту крізь шар шлаку

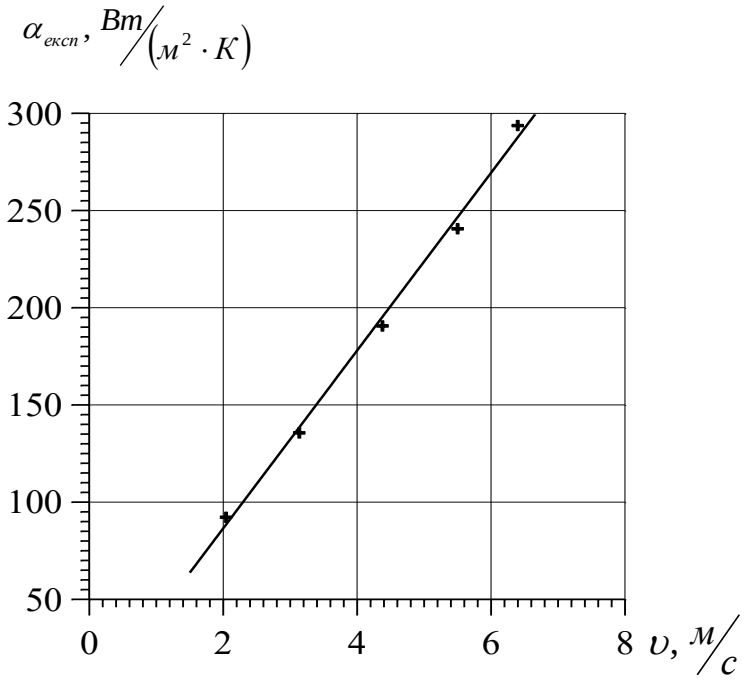

Рис. 2.6. Залежність коефіцієнту тепловіддачі $\alpha_{експ}$ від дійсної швидкості руху теплового агенту крізь шар вугільного концентрату

Необхідно зазначити, що тепловий агент, в ході процесу теплообміну, рухається крізь стаціонарний шар матеріалу по криволінійних каналах, утворених проміжками між частинами, які мають змінний переріз, що спричиняє зміну швидкості теплового агенту і як наслідок – зміну коефіцієнта

тепловіддачі. Враховуючи складність гідродинамічної картини руху теплового агенту крізь шар шлаку та вугільного концентрату, значення коефіцієнтів тепловіддачі $\alpha_{експ}$ є усередненими по шару.

2.3. Схема установки фільтраційного сушіння промислового типу та практичне застосування результатів досліджень

Для реалізації процесів сушіння шлаку та вугільного концентрату фільтраційним методом, розроблена схема установки фільтраційного сушіння [19], представлена на рис. 2.7.

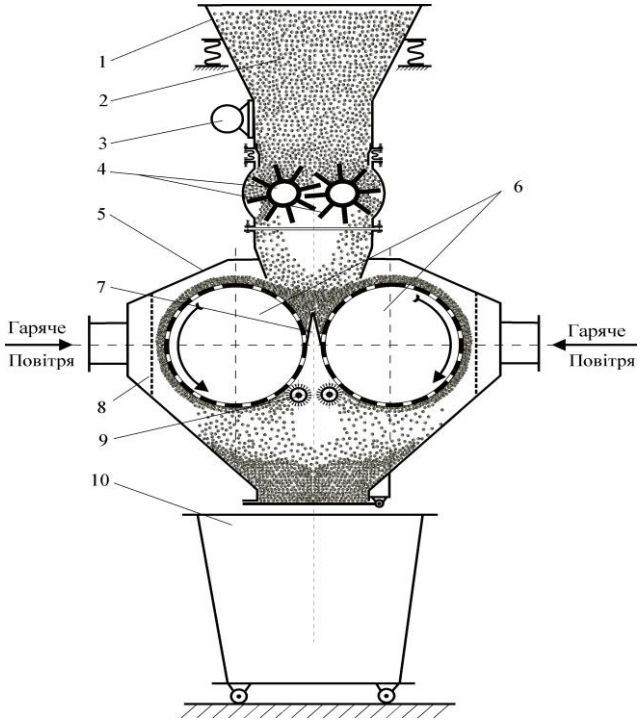

Рис. 2.7. Принципова схема установки фільтраційного сушіння: 1 – бункер, 2 – матеріал, 3 – вібратор, 4 – дозатор, 5 – сушильна камера, 6 – перфорований барабан, 7 – перегородка, 8 – сітка, 9 – щітка, 10 – контейнер.

Принцип роботи установки. Включаються вібратор 3, подача гарячого повітря, вакуум-лінія, обертання барабанів 6 і щіток 9. Вологий матеріал поступає у бункер 1 і за допомогою дозаторів 4 подається у сушильну камеру 5 на два перфорованих барабани 6, які обертаються у протилежні сторони і між якими встановлена перегородка 7. Перегородка 7 служить для формування

рівномірного шару зернистого матеріалу. За рахунок розрідження вологий матеріал притискується до перфорованої поверхні барабану і обертається разом з ним у напрямку зображеному на рис. 2.7. Гаряче повітря поступає у сушильну камеру через щільну металеву сітку 8, яка виключає попадання дрібнодисперсної фракції до системи нагріву і подачі теплоносія. Перфорований барабан через патрубок під'єднується до високопродуктивного вентилятора високого тиску, який створює необхідне розрідження. За допомогою регулювання продуктивності відцентрових вентиляторів, у перфорованому барабані можна встановлювати різну степінь розрідження. Теплоносій під дією перепаду тисків профільтровується крізь шар вологого матеріалу і висушує його. Сухий матеріал вивантажується у контейнер 10.

Розраховані значення коефіцієнтів тепловіддачі від теплового агенту до частин шлаку $\alpha_{експ} = 40 \div 112 Вт/м^2 \cdot К$ та вугільного концентрату $\alpha_{експ} = 92{,}5 \div 294 Вт/м^2$ дають змогу прогнозувати час сушіння шлаку та вугільного концентрату в установці промислового типу (рис. 2.7), для чого залежність (2.1) представлена у вигляді:

$$\Delta\tau = \frac{\Delta Q}{\alpha_{експ} \cdot F \cdot \left(\bar{t} - \bar{T}_{п.}\right)} \tag{2.4}$$

Для використання залежності (2.4), необхідним є визначення кількості теплоти, затраченої на нагрівання шару, яку можна розрахувати [16]:

$$\Delta Q = L_{с.г.} \cdot (I_1 - I_0) \cdot \Delta\tau \tag{2.5}$$

де $I_0; I_1$ - питомі ентальпії атмосферного повітря та сушильного агенту на вході в сушарку, кДж/кг сухого повітря (значення отримані за I – x діаграмою).

Витрата сухого теплового агенту розраховується за рівнянням [16]:

$$L_{с.г.} = W/(x_2 - x_1) \tag{2.6}$$

де W – витрата вологи, що видаляється з матеріалу, кг/с; x_1 та x_2 – вологовміст теплового агенту на вході в сушарку та вологовміст

відпрацьованого теплового агенту на виході з сушарки, кг/кг (значення отримані за I – x діаграмою).

Розрахувавши час сушіння матеріалу за залежністю (2.4), що рівний часу перебування матеріалу в зоні сушіння промислової установки, можна розрахувати її продуктивність:

$$G = \frac{H \cdot L \cdot b \cdot \rho}{\Delta \tau} \qquad (2.7)$$

де, H – висота шару вологого матеріалу, розміщеного на перфорованому барабані, м; L – довжина зони сушіння перфорованого барабану, м; b – ширина барабану, м; ρ – густина матеріалу, кг/м^3.

2.4. Отримання лабораторних зразків легких наповнювачів

Як уже відзначалося, хімічний склад сировинних матеріалів і їх кількісне співвідношення значно впливатиме на структуру і властивості утворювальних наповнювачів. Для використання шлаку Бурштинської ТЕС в складі шихти для формування зразків наповнювачів, було встановлено його хімічний склад (визначений у заводській лабораторії цеху утилізації відходів виробництва Бурштинської ТЕС), який представлено у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3

Хімічний склад шлаку

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O
50,7%	21,3%	20,6%	0,8%	2,9%	1,2%	0,3%	0,7%	1,5%

Хімічний склад шлаку показав можливість його використання в якості компоненту шихти для виробництва пористих заповнювачів після вилежування (3–6 місяців) для стабілізація складу (гаситься вільний оксид кальцію), що сприятиме підвищенню міцності наповнювачів. Таким чином, для збереження формувальної здатності зразків наповнювачів, частина глинистої сировини була замінена шлаком. В якості додатків, що забезпечуватиме формування

пористості зразка наповнювача в результаті його вигорання за високих температур, використано тирсу та вугільний концентрат.

Для формування сировинної суміші (шихти), попередньо висушені шлак, вугільний концентрат, глину та тирсу зважували і змішували у рекомендованих співвідношеннях у лабораторному змішувачі. Для аналізу міцнісних характеристик був виготовлений експериментальний зразок розміром 15х15х15см. Зразок піддавали термообробці за температури 1200^0С протягом 30хв у муфельній печі лабораторного типу.

Для випробовування наповнювача щодо його міцнісних та теплофізичних характеристик, зразок було передано ТзОВ «ЄВРО ТЕХ ЕКСПЕРТ БУД». У лабораторії встановлено характеристики запропонованого наповнювача, засвідчені актом проведення експериментальних досліджень наповнювача для виготовлення легких бетонів [18]:

густина зразка становить ρ_0= 230 кг/м^3

питома теплоємність c_0 = 0,82 кДж/(кг·К)

теплопровідність λ_0 = 0,067 Вт/(м·К)

Границя міцності на стиск становила 27,7 МПа.

Встановлено що запропонований наповнювач для легких бетонів, в основному відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.6-189:2013 «Методи вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель» і його можна рекомендувати для використання під час виготовлення легких бетонів**.**

РОЗДІЛ 3. ТЕХНОЛОГІЧНА СХЕМА ВИРОБНИЦТВА ЛЕГКИХ НАПОВНЮВАЧІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ШЛАКУ ТА ВУГІЛЬНОГО КОНЦЕНТРАТУ

На основі проведеного огляду літератури щодо технологій виробництва пористих наповнювачів, запропоновано технологічну схему виробництва останніх з використанням шлаку та вугільного концентрату та застосуванням агломерації, як методу теплової обробки та спікання шихти для отримання

готового продукту, яка представлена на рис. 3.1 (виконана в AutoCAD). Виробництво пористих наповнювачів згідно технологічної схеми, дасть змогу залучити техногенні відходи у виробничий процес та розширити асортимент легких наповнювачів. Схема відображає багатостадійність виробництва.

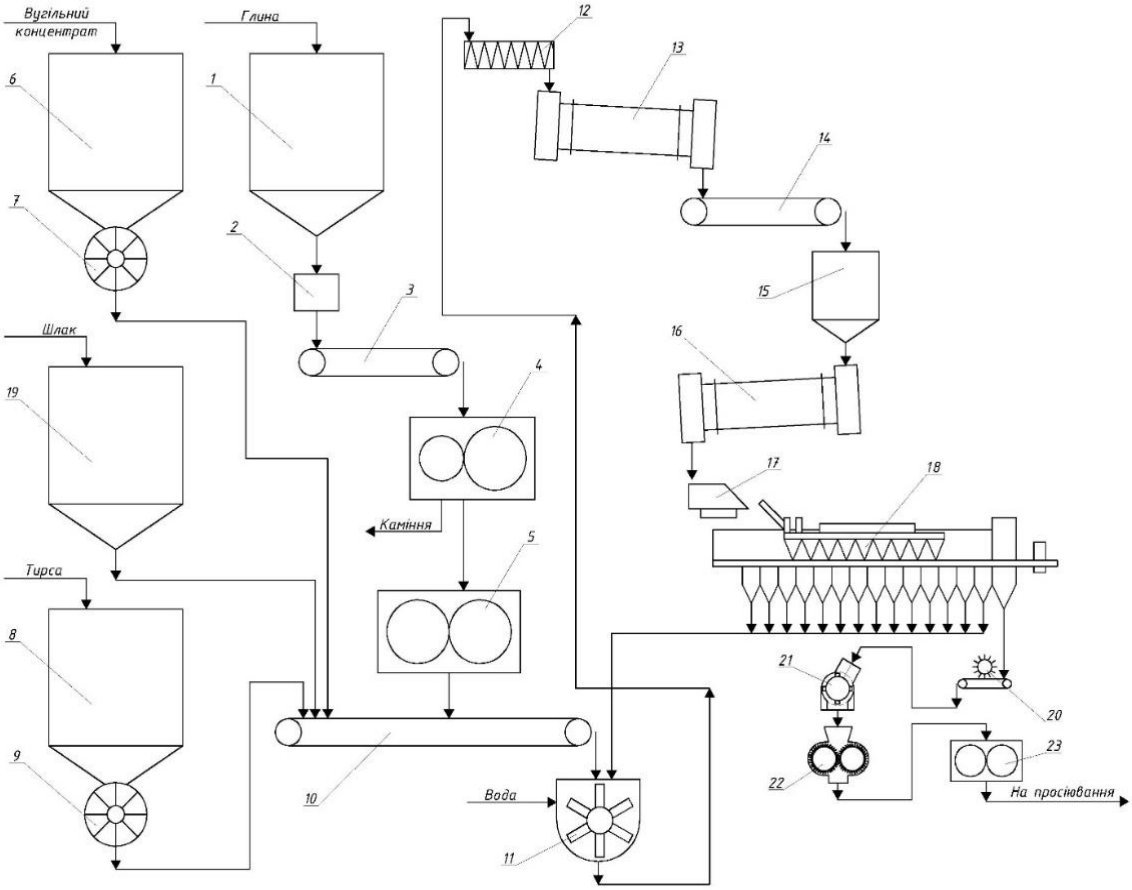

Рис. 3.1. Технологічна схема виробництва пористого наповнювача: 1, 6, 8, 19 – бункери сировинних компонентів; 2 – ящиковий живильник; 3, 10, 14 – стрічкові транспортери; 4 – каменевидільні вальці; 5 – вальці тонкого помелу; 7, 9 – секторні дозатори; 11 – одновальний змішувач; 12 – шнековий транспортер; 13 – гранулятор барабанний; 15 – бункер гранул; (6 – барабанний живильник; 17 – укладач; 18 – агломераційна машина; 20 – коржелам; 21 – роторна дробарка; 22 – валково-зубчаста дробарка; 23 – валкова дробарка.

Підготування компонентів шихти та змішування. Вугільний концентрат, тирса та шлак з бункерів 6, 8 та 19 подають через дозатори 7 на стрічковий транспортер 10. Глина з приймального бункера 1 поступає у

ящиковий живильник 2 та транспортером 3 подається у каменевіддільні вальці 4, у яких проводиться подрібнення сировини та одночасне виділення кам'янистих включень, після чого подається на вальці тонкого розмелювання 5 та на стрічковий транспортер 10. За допомогою стрічкового транспортеру 10 всі компоненти подаються в лопатевий змішувач 11, в якому, за необхідності, здійнюється дозволоження шихти водою.

Гранулювання шихти. За допомогою шнекового транспортеру 12 із змішувача 11 шихта подається в гранулятор барабаннного типу 13. Гранулоутворення в відбувається шляхом перекочування частин шихти по внутрішній поверхні барабана.

Агломерація. З гранулятора барабанного 13 гранульована шихта подається на транспортер 14. Гранульована шихта збирається в бункері 15 зі сторони місця завантаження агломераційної машини. Під бункером 15 знаходиться барабанний живильник 16 та укладач 17 для укладання шихти в палети на верхню гілку агломераційної машини 18. В агломераційній машині 18 реалізується підсушування та спікання гранул (20-40 хв). «Запалювання» гранул) здійснюється за допомогою горна на рідкому чи газоподібному паливі. Гази просмоктуються крізь шар шихти під дією вакууму, що створюється димотягами. Вугілля та тирса з гранул вигоряють, в результаті чого відбувається формування пористості продукту. Волога з гранул випаровується; частинки матеріалу спікаються між собою у безперервну стрічку; відбувається «спучування» продукту через процеси спричинені тиском газу всередині.

Подрібнення та розсів продукту. Спечений корж подається на приймальний стіл для розколювання за допомогою коржеламу 20. Шматки продукту спрямовуються в дробарки для первинного та вторинного дроблення: в роторну дробарку 21 для подрібнення до розмірів 120-150 мм; далі валково-зубчастою дробаркою 22 подрібнюються до розмір 40-60 мм; валковою дробаркою 23 реалізується подрібнення до розмір кусків 40-5 мм. Отриманий легкий наповнювач класифікується на фракції і зберігається в силосах або на складах.

ВИСНОВКИ

Запропонований метод утилізації шлаку та вугільного концентрату, отриманого шляхом збагачення 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 шляхом застосування енергоефективного методу фільтраційного сушіння, що позитивним чином вплине на собівартість продукції.

Результати досліджень кінетики фільтраційного сушіння шлаку та вугільного концентрату підтвердили доцільність застосування фільтраційного методу сушіння для вказаних матеріалів, як енергоефективного, що пояснюється наявністю періоду механічного витіснення та винесення вологи з стаціонарних шарів останніх та дають змогу науково обґрунтовано обрати оптимальні параметри теплового агенту для реалізаціїї процесу.

Отримані, внаслідок узагальнення результатів теплообміну, значення коефіцієнтів тепловіддачі від теплового агенту до частин шлаку $\alpha = 40 \div 112 \, {}^{Вт}\!/_{(м^2 \cdot К)}$ та вугільного концентрату $\alpha = 92{,}5 \div 294 \, {}^{Вт}\!/_{(м^2 \cdot К)}$ дають змогу прогнозувати час сушіння шлаку та вугільного концентрату в установці промислового типу, а також розрахувати її продуктивність.

Виробництво пористих наповнювачів з використанням в складі шихти шлаку та вугільного концентрату згідно запропонованої технологічної схеми дасть змогу залучити техногенні відходи у виробничий процес та розширити асортимент наповнювачів виготовлення легких бетонів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ЛІТЕРАТУРИ

1. Братута Е.Г. Пористі теплоізоляційні матеріали: Монографія / Е.Г. Братута, А.М. Павленко, А.В. Кошлак, О.В. Круглякова. – Х.: ТОВ «ЕДЕНА», 2010. – 107с.

2. Кривенко П.В., К. К. Пушкарьова К.К., Кочевих М.О. Заповнювачі для бетону. – К. : ФАДА, ЛТД, 2001. – 399с.

3. Герич О.С., Ракицький В.Л., Собченко В.В. Застосування пористих заповнювачів для бетону // Вісник Національного технічного університету України „Київський політехнічний інститут” Серія „Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження”. – 2012, № 1(9), С. 36 – 40.

4. Энтин З.Б., Нефедова Л.С., Стржалковская Н.В. Золы ТЭС – сырье для цемента и бетона //Цемент и его применение. –2012, № 2, С. 40 – 46.

5. Челядин Л.І. Техногенні відходи та їх перетворення у будівельні матеріали. Науковий вісник НЛТУ України. – 2013, Вип. 23.17, С. 85 – 90.

6. Челядин Л.І. Екологічні та хіміко-технологічні аспекти утилізації та модифікації техногенних матеріалів // Вопросы химии и химической технологи. – 2000, № 1, С. 250 – 252.

7. Павленко А.М., Чейлытко А.А. Создание основы для нового теплоизоляционного материала. Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2009, №39, С. 13 – 16.

8. https://re-solutions.com.ua/yak-zarobyty-na-promyslovyh-vidhodah/

9. Хлопицкий А.А., Макарченко Н.П. Перспективы утилизации золошлаковых отходов тепловых электростанций // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. – 2013, № 1 (1).

10. Хлопицький О.О. Стан, проблеми та перспективи переробки золошлакових відходів теплоелектростанцій України. Scientific Journal «ScienceRise» №4/2(4), 2014.

11. Дунаевская Н.И. К вопросу о комплексном использовании шламов, сухих отходов углеобогащения, высокозольного и бурого угля в энергетике. URL: http://esco.co.ua/journal/2012_5/ art225.pdf.

12. Полулях А.Д., Зозуля О.А., Полулях Д.А., Перерва А.Ю. Перспективы применения мокрой винтовой сепарации для обогащения первичного угольного шлама на ЦОФ "Червоноградская". Збагачення корисних копалин. – 2010, Вип. 40(81), С. 71–77.

13. Абашина К.О. Конспект лекцій з навчальної дисципліни «Утилізація промислових відходів» нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О.М. Бекетова.–Харків : ХНУМГ ім.О.М. Бекетова, 2016. –58с.

14. Атаманюк В.М., Гумницький Я.М. Наукові основи фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів. Видавництво «Львівська політехніка», Львів, 2013, 276с.

15. Лыков А.В. Теория теплопроводности. Издательство «Высшая школа», Москва, 1967, 300с.

16. Процеси та апарати хімічних технологій: Навч. Посібник з курсового проектування / А.І. Дубинін, Р.І. Гаврилів, І.О. Гузьова; За ред. А.І. Дубиніна. Львів Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2010, 434с.

17. *Теплообмін.* Виробництво легких наповнювачів з використанням шлаку ТЕС. The III-rd International Science Conference «Using the latest technologies», February 26 – 27, 2021, Groningen, Netherlands., pp. 103-105.

18. *Теплообмін.* ТзОВ «ЄВРО ТЕХ ЕКСПЕРТ БУД». Акт проведення експериментальних досліджень наповнювача для виготовлення легких бетонів/

19. Деклараційний патент на винахід №60587 А Україна F26B3/06. Установка фільтраційного сушіння сипких матеріалів. /Атаманюк В.М., Ханик Я.М., *Теплообмін*, Дулеба В.П./ Опубл. 15.10.2003. Бюл. №10.

АНОТАЦІЯ

Актуальність роботи зумовлена необхідністю дослідження та впровадження раціональних методів утилізації шлаків ТЕС та ТЕЦ, а також вугільних шламів, кількість утворення та нагромадження яких неупинно зростає.

Перспективним напрямом утилізації шлаків ТЕС та вугільного концентрату, отриманого шляхом збагачення первинного вугільного шламу, є залучення останніх у виробничий процес отримання легких пористих наповнювачів, що дасть змогу розширити сировинну базу для їх одержання, суттєво зменшивши при цьому кількість викопного вугілля, як компоненту шихти та глинистої сировини. Однак, зважаючи на те, що шлаки та вугільний концентрат, являють собою гідросуміші, вони можуть застосовуватись в якості компонентів шихти лише після сушіння до регламентованого вологовмісту. Внаслідок низької ефективності використання теплової енергії в барабанних сушарках, енергетичні затрати на процес сушіння є в декілька разів більшими, ніж це потрібно на перетворення вологи в пару, окрім цього, під час їх сушіння у барабанних сушарках за температур теплового агенту більше 300^0С пилоподібна фракція останніх здатна до само загорання, що спричиняє виробничі небезпеки.

Реалізація сушіння вугільного концентрату та шлаків фільтраційним методом дає можливість: покращити виробничу безпеку та екологічність виробництва, оскільки запропонований метод дає змогу використати низькотемпературний тепловий агент та зменшити викиди твердої фази з відхідним тепловим агентом; інтенсифікувати процеси масо- та теплопередачі, шляхом збільшення швидкості руху теплового агенту та температури до науково обґрунтованих меж і таким чином зменшити тривалість сушіння, зважаючи на вищі значення коефіцієнтів тепло- та масовіддачі; зменшити енергозатрати на реалізацію процесу, оскільки значна кількість вологи з вказаних матеріалів буде витіснятися та виноситися рухомим тепловим

агентом. Таким чином, теоретичне і експериментальне дослідження процесу фільтраційного сушіння сировинних матеріалів виробництва легких наповнювачів є актуальним науково-практичним завданням.

Для розробки науково обґрунтованих режимів фільтраційного сушіння шлаку та вугільного концентрату, як складових шихти для виробництва легких наповнювачів, необхідним є проведення досліджень кінетики процесу. Фільтраційне сушіння є складним тепло- та масообмінним процесом, який відбувається між частинками матеріалів та сушильним агентом під час його профільтровування крізь стаціонарний пористий шар. Тому, експериментальний метод дослідження є найбільш достовірним для визначення коефіцієнтів тепловіддачі від сушильного агенту до частинок стаціонарного шару. Отримані значення дадуть змогу розрахувати час сушіння шлаку та вугільного концентрату в установці промислового типу та її продуктивність.

Метою роботи є дослідження основних закономірностей кінетики та теплообміну фільтраційного сушіння вугільного концентрату та шлаку ТЕС за різних швидкостей руху теплового агенту для зниження енергозатрат на реалізацію процесу та розрахунку тривалості сушіння вказаних матеріалів в установці промислового типу та її продуктивності.

Завдання. Для досягнення поставленої мети необхідно розв’язати такі завдання:

- дослідити кінетику фільтраційного сушіння шлаку та вугільного концентрату за різних швидкостей руху теплового агенту;
- встановити основні закономірності теплообміну між тепловим агентом та стаціонарним шаром шлаку та вугільного концентрату;
- розрахувати коефіцієнти тепловіддачі від теплового агенту до шарів шлаку та вугільного концентрату за різних швидкостей руху теплового агенту;
- запропонувати залежності для розрахунку тривалості фільтраційного сушіння вказаних матеріалів в установці промислового типу, а також її продуктивності;
- розробити технологічну схему виробництва легких наповнювачів з використанням техногенної сировини.

Використані методики дослідження. У роботі використовували методи фізичного та математичного моделювання процесу фільтраційного сушіння. Для визначення гранулометричного складу полідисперсних сумішей шлаку та вугільного концентрату використовували ситовий аналіз, для визначення пористості стаціонарних шарів застосовували пікнометричний метод. Для опрацювання та узагальнення результатів експериментальних досліджень використовували комп'ютерну техніку та пакети прикладних програм, а саме: Excel, Graf4Win, Corel Draw, MathCAD, AutoCAD.

Загальна характеристика роботи. Робота складається із вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел літератури. Роботу викладено на 26 сторінках основного тексту, які містять 9 рисунків та 3 таблиці.

За результатами досліджень автором опубліковано тези міжнародної конференції [17], результати впроваджено на ТзОВ «ЄВРО ТЕХ ЕКСПЕРТ БУД» (акт проведення експериментальних досліджень наповнювача для виготовлення легких бетонів [18]). Особистий вклад автора становить 85%.