

УДК 66.047

Стаття присвячена теоретичним і експериментальним дослідженням кінетики і динаміки фільтраційного сушіння піритних недогарків і кеку глиноземистого. Наведені результати дослідження тепло- і масообміну під час фільтраційного сушіння досліджуваних матеріалів. Узагальнення отриманих результатів наведено у вигляді критеріальних рівнянь

Ключові слова: вологовміст, кек глиноземистий, піритні недогарки

Статья посвящена теоретическим и экспериментальным исследованиям кинетики и динамики фильтрационной сушки пиридных огарков и кека глиноземистого. Приведены результаты исследований тепло- и массообмена фильтрационной сушки исследуемых материалов. Обобщение полученных результатов приведено в виде критеріальных уравнений

Ключевые слова: влагосодержание, кек глиноземистый, пиридные огарки

The article is dedicated to theoretical and experimental investigations of kinetics and dynamics of filtration drying of pyrite cinders and aluminous cake. The results of heat and mass transfer during filtration drying of experimental materials are presented. The generalization of received results is presented in the form of criterial equations

Keywords: moisture content, aluminous cake, pyrite cinders

МАСОВІДДАЧА У ПЕРШОМУ ПЕРІОДІ ФІЛЬТРАЦІЙНОГО СУШІННЯ ДРІБНОДИСПЕРСНИХ МАТЕРІАЛІВ

Д. М. Симак

Асистент*

Контактний тел.: (032) 258-26-57

В. М. Атаманюк

Доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри

*Кафедра хімічної інженерії

Національний університет "Львівська політехніка"

пл. Св. Юра 9, м. Львів, 79013

Контактний тел.: (032) 258-26-57, 067-802-80-00

E-mail atananyuk@ukr.net

Вступ

Відомо, що в Україні щорічно утворюється понад 700 мільйонів тонн твердих відходів. Решта накопичується у відвалах, шламонакопичувачах, териконах, золовідвалах загальною площею понад 160 тис. га сільськогосподарських угідь. Відомо, що в багатьох випадках відходи є цінною сировиною, яку можна використати як вторинну сировину. Тому утилізація відходів має важливе значення для вирішення екологічних проблем, а також раціонального ресурсоспоживання. Однак, лише 10 – 12% з них застосовують як вторинні матеріальні ресурси, що безумовно є надзвичайно мало. Тому дослідження нових шляхів використання вторинних ресурсів у різних галузях промисловості є актуальною задачею.

Виробництво цементу належить до найбільш енергомістких галузей промисловості, що вимагає значних сировинних ресурсів. Відомо, що на виробництво однієї тонни цементу витрачається близько 1,6 тонни сировинних матеріалів, тому заміна деякої частини клінкеру на відходи промисловості дасть змогу зекономити значні матеріальні ресурси, враховуючи багатотоннажність виробництва цементу [1-4]. Крім цього, згідно з вимогами державного стандарту ДСТУ Б В.2.7-46-96 та міжнародного стандарту EN 197 цементу

ти загальнобудівельного призначення повинні містити не менше двох видів мінеральних додатків різної природи активності.

Об'єктами нашого дослідження були залізовмісні мінеральні відходи, такі як кек глиноземистий (відвал Миколаївського глиноземного заводу), мінеральний залізовмісний продукт (відвал Камиш-Бурунського залізнорудного комбінату, АР Крим), а також піритні недогарки, відходи виробництва сульфатної кислоти.

Вказані відходи виробництва можуть бути використані як складова цементного виробництва на ВАТ "Івано-Франківськцемент", ВАТ "Миколаївцемент" та інших підприємствах, що виробляють цемент в Україні, а також як складова мінеральних добрив тощо.

Вказані відходи зберігаються на відкритій місцевості у відвалах і їх вологість залежить від пори року, і лежить в межах 20 ÷ 30% в розрахунку на суху масу, тому щоби використати вказані мінеральні матеріали, як додаток до цементу, їх необхідно висушити до вологості 3,0%.

Одним із високоінтенсивних методів сушіння є фільтраційне, суть якого полягає у профільтовуванні теплового агенту крізь пористу структуру вологого матеріалу в напрямку "шар матеріалу – перфорована перегородка". Такий напрям руху теплового агенту

забезпечує стаціонарність шару вологого матеріалу за будь-якої швидкості фільтрування теплового агента, і, на відміну від інших методів сушіння дає змогу досягнути максимально можливих, економічно обґрунтованих, коефіцієнтів тепло- і масовіддачі, і, відповідно, високу інтенсивність сушіння.

Хімічні склади досліджуваних матеріалів, які наведені на рис. 1, визначалися у заводській лабораторії ВАТ “Івано-Франківськцемент”. Аналіз цих даних показує, що хімічні склади мінеральних додатків різняться між собою, однак для виробництва цементу, в першу чергу, має значення вміст заліза. За структурною будовою досліджуваних мінеральних продуктів характеризуються наявністю частинок неправильної, в основному округлої форми. Усереднений діаметр частинок досліджуваних матеріалів лежить в межах 40 – 60 мкм, що необхідно враховувати під час організації процесу сушіння.

Кінетика сушіння – це сукупність закономірностей, яка в тій чи іншій формі описує зміну вологості матеріалу на протязі процесу сушіння, тобто в часі, залежно від властивостей висушуваного матеріалу і параметрів теплового агента. Найбільш простий шлях дослідження кінетики сушіння – експериментальний.

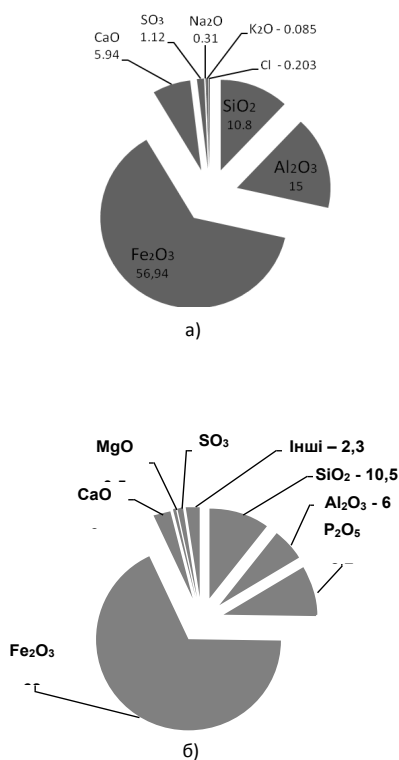


Рис. 1. Хімічний склад досліджуваних матеріалів (у відсотках на суху речовину): а) кеку глиноземистий; б) піритні недогарки

В конкретному процесі сушіння за фіксованих параметрів теплового агента визначають вологовміст висушуваного матеріалу через задані інтервали часу від початку процесу. Отримані таким чином дані використовують для побудови кінетичних кривих сушіння: “криві сушіння” (рис. 2). Тобто “крива сушіння” – це графічне відображення зміни біжучої

вологості матеріалу залежно від часу сушіння. Біжучий вологовміст, у свою чергу, залежить від форми зв'язку води із вологим матеріалом і від параметрів проведення процесу зневоднення, а саме від параметрів теплового агента (температури та перепаду тисків) та структурної будови шару. Експериментальні дослідження кінетики фільтраційного сушіння вказаних матеріалів проводили на установці та за методикою наведеною в [5].

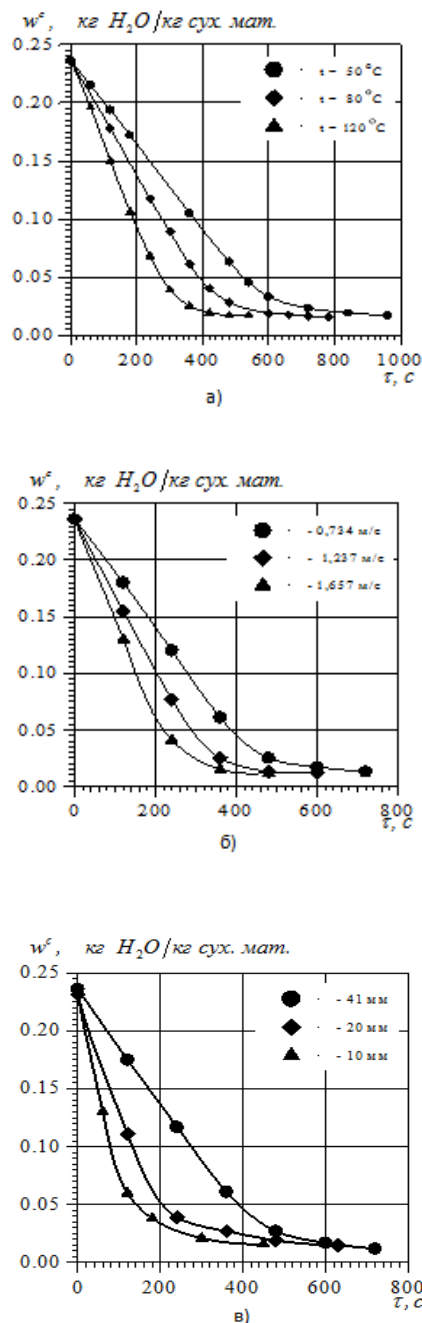


Рис. 2. Кінетика сушіння кеку-глиноземного: а) за різних температур теплового агента ($\Delta P=2 \cdot 10^4$ Па, $H=41$ мм); б) за різних фіктивних швидкостей фільтрування теплового агента ($t=80^\circ\text{C}$, $H=41$ мм); в) за різних висот шару дисперсного матеріалу ($T=80^\circ\text{C}$, $\Delta P=20$ кПа)

Оскільки одним із визначальних параметрів, який впливає на кінетику процесу, є температура теплового агенту, тому був досліджений її вплив у діапазоні зміни параметра від 50 до 120°C (рис. 2а). Як бачимо, зростання температури теплоносія у 2,4 рази приводить до інтенсифікації процесу в 1,8 рази, а швидкість сушіння зростає у 1,68 рази.

Вплив перепаду тисків досліджувався у області зміни цього параметру 4·10⁴, 6,87·10⁴, 9,8·10⁴ Па (що відповідає фіктивній швидкості фільтрування теплового агенту v₀=0,734 м/с, v₀=1,237 м/с, v₀=1,657 м/с) для фіксованої висоти шару матеріалу та температури теплового агенту (рис. 2б). Такі заходи вказують на незначну інтенсифікацію процесу, а саме: тривалість процесу скорочується у 1,5 рази; швидкість сушіння – у 1,88 рази.

Результати дослідження впливу висоти шару матеріалу на кінетику зображено на рис. 2в. Досліджували шар дисперсного матеріалу висотою від Н = 10 мм до Н = 41 мм. Встановлено, що зростання шару матеріалу у 4,1 рази призводить до зростання часу сушіння від 300 с до 720 с (у 2,4 рази).

Важливою характеристикою процесу фільтраційного сушіння є динаміка видалення вологи із шару, яка характеризує насичення вологою теплового агенту. Результати дослідження динаміки фільтраційного сушіння кеку глиноземистого наведені на рис. 3 і рис. 4.

Як бачимо з рис. 3, інтенсивність виношення вологи із шару вологого кеку глиноземистого з ростом температури і швидкості фільтрування теплового агенту (визначається перепадом тисків) зростає, що пояснюється в першому випадку ростом сушильного потенціалу, а другому – зростанням об'ємної витрати теплового агенту, який за постійного сушильного потенціалу виносить із шару більше вологи за однакового його насичення парами вологи.

Іншу картину спостерігаємо у випадку постійної швидкості фільтрування теплового агенту крізь змінну висоту шару рис. 4. Як бачимо з рис. 4 незалежно від висоти шару маємо однаково інтенсивність, яка визначається тангенсом кута нахилу прямолінійної частини кривої до осі абсцис.

У теорії сушіння експериментальні дані представляють у вигляді залежності $\frac{dw^c}{dt} = f(w^c)$, які дають

змогу встановити швидкість сушіння залежно від вологовмісту матеріалу та характер її зміни. Ця графічна залежність для різних температур (за однакової швидкості фільтрування теплового агенту і висоти шару) наведена на рис. 5 і рис. 6.

Швидкість сушіння вологого матеріалу визначає енергетичні затрати на процес та продуктивність сушильного обладнання. Тому важливо є встановити залежність швидкості сушіння від його середнього вологовмісту, з метою встановлення основних закономірностей фільтраційного сушіння. Як бачимо з рис. 5 і рис. 6, залежність $\frac{dw^c}{dt} = f(w^c)$ має аналогічний

характер, що й у випадку конвективного сушіння, однак механізм фільтраційного сушіння є відмінним, що вставлено у [6]. Тепловий агент профільтровуючись крізь вологий шар кеку глиноземистого омиває кожну частинку і вони висушуються у першому періоді,

тому що внутрішня волога в частинках відсутня, а випаровується лише волога з поверхні. Горизонтальна лінія на рис. 5 і рис. 6 означає, що тепловий агент повністю насичується вологою а швидкість сушіння залежить від зовнішніх параметрів процесу. Протягом цього етапу сушіння зона тепло- масообміну рухається в напрямку руху теплового агенту до перфорованої перегородки і в шарі дисперсного матеріалу одночасно можуть існувати сухий і вологий матеріал. Постійність швидкості сушіння в даному випадку пояснюється тим, що тепловий агент повністю насичений парами вологи. Як тільки зона масообміну сягає перфорованої перегородки поверхня масообміну зменшується і, відповідно, зменшується насичення теплового агенту парами вологи і, відповідно, швидкість сушіння. Швидкість сушіння є тим вищою, чим вища температура теплового агенту (рис. 5а), чим більша об'ємна витрата теплового агенту (рис. 5б) (зростає швидкість фільтрування теплового агенту і, відповідно, зростають коефіцієнти тепло- і масообміну). У випадку змінної висоти шару вологого матеріалу (рис. 6) з її ростом швидкість сушіння зменшується, це пояснюється тим, що вологовміст матеріалу визначали ваговим методом і за однакової кількості залишкової вологи в шарі маса сухого матеріалу є тим більшою чим вища висота шару.

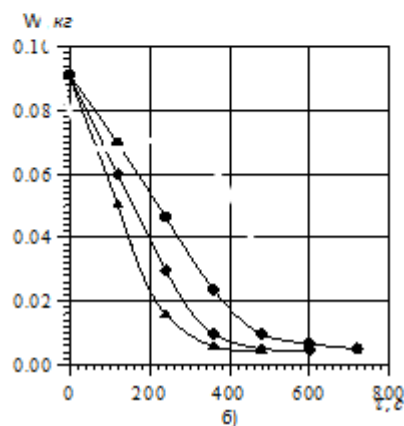
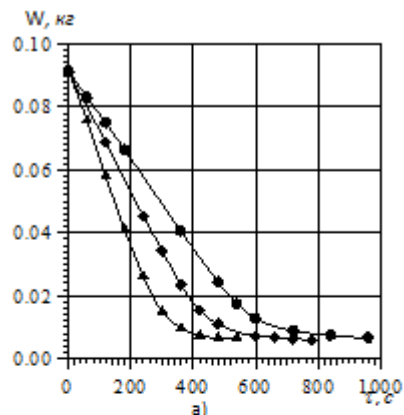


Рис. 3. Динаміка видалення вологи (позначення відповідають рис. 2): а) для температур 50, 80, 120°C; б) для фіктивної швидкості v₀=0,734 м/с, v₀=1,237 м/с, v₀=1,657 м/с

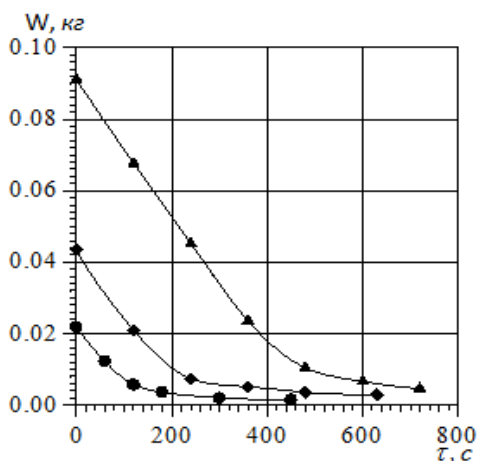


Рис. 4. Динаміка видалення вологи: для висот шару 10, 20, 41 мм (позначення відповідають рис. 2)

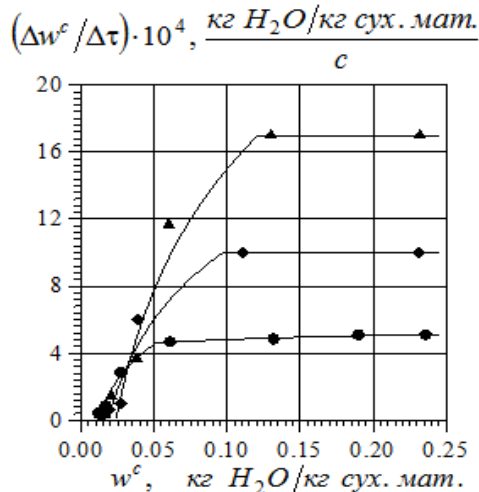


Рис. 6. Швидкість фільтраційного сушіння кеку глиноземного: для висот шару 10, 20, 41 мм (позначення відповідають рис. 2)

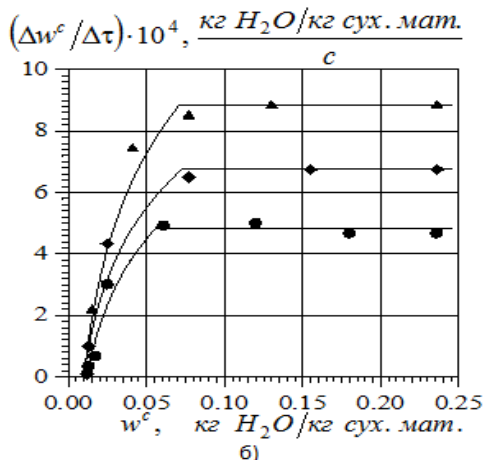
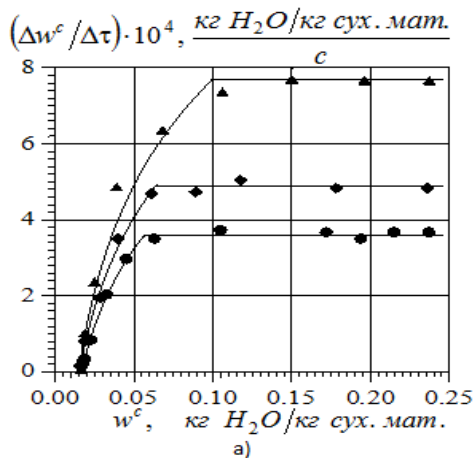


Рис. 5. Швидкість фільтраційного сушіння кеку глиноземного (позначення відповідають рис. 2): а) для температур 50, 80, 120°C; б) для фіктивної швидкості $v_0=0,734$ м/с, $v_0=1,237$ м/с, $v_0=1,657$ м/с

Тому використання фільтраційного сушіння для об'єктів, що характеризуються лише випаровуванням поверхневої вологи (так званий перший період сушіння), є найбільш сприятливим.

У проведених до цього часу дослідженнях [7-11] такий аналіз не виконувався за винятком дисертаційної роботи [12], але у якій також не звернуто увагу на зміну фізико-хімічних параметрів по висоті шару, перш за все температури. У виконаних до цього часу роботах зменшення швидкості сушіння пояснювалось наявністю внутрішньодифузійного перенесення вологи, і отже, зменшення швидкості сушіння. У наведених нами нижче даних чітко спостерігається зменшення швидкості сушіння, хоч другий період є відсутній. Цей факт пояснюється лише тим, що чим нижче опускається фронт сушіння, тим холоднішим стає тепловий агент і тим меншою є швидкість сушіння.

На рис. 7 представлено залежність вологовмісту матеріалу від часу сушіння та висоти шару $w^c = f(\tau, h)$. Представлена залежність є характерною для масообміну з шаром дисперсного матеріалу (наприклад, адсорбція, екстрагування з твердої фази). Початковий вологовміст становить значення w_n^c і це значення для видалення лише поверхневої вологи змінюється до рівноважного значення з сушильним агентом w_p^c (це значення практично наближується до нуля). Існують три етапи видалення вологи із шару дисперсного матеріалу. Перший етап триває в часі $\tau_1=0-\tau^*$, під час якого відбувається формування фронту зміни концентрацій на верхньому шарі дисперсного матеріалу ($h=0$) вологовміст зменшується від w_n^c до w_p^c , а на деякій висоті h_{min} він має початкове

значення w_n^c . На цій ділянці швидкість видалення во-

логи є постійною, тому що є достатньою, і кількість вологи і поверхня масообміну, що показали наші експериментальні дослідження наведені нижче. Наступний етап – паралельне перенесення фронту зміни концентрацій, що також забезпечує постійну швидкість сушіння, від часу τ^* до τ_3 . Після часу τ_3 зона сушіння скорочується, а процес наближається до рівноваги w_p^c .

Кожен процес, що наближається до стану рівноваги, триває деякий час. Отже, швидкість сушіння, що визначається відношенням $\frac{dw^c}{d\tau}$, стає все меншою.

Таким чином, лише після часу τ_3 швидкість буде падаючою.

Рис. 8 представляє зміну вологовмісту сушильного агенту x . Його значення зростає за рахунок випареної вологи від початкового x_0 до стану насичення $x_{нас}$. Як і в попередньому випадку відбувається формування фронту зміни концентрацій x на висоті h_{min} до часу τ^* . У подальшому фронт концентрацій паралельно переміщується до часу τ^{**} . Після цього часу тепловий агент не досягає стану насичення, тому що зменшується висота шару вологого матеріалу, і, відповідно, потік вологи з поверхні висушуваного матеріалу до теплового агенту.

Сушіння є теплообмінним процесом, тому є важливим дослідження зміни температури по висоті шару дисперсного матеріалу. Зміна температури сушильного агенту носить двоякий характер. Очевидно, що у зоні сушіння температура сушильного агента зменшується і її мінімальне значення може бути лише рівне температурі мокрого термометра t_{MT} . Тобто у початковий момент часу, коли проходить формування фронту перенесення концентрації вологи, температура зменшується від початкової t_n до температури мокрого термометра t_{MT} (що відповідає часу τ^*). В подальшому відбувається переміщення фронту концентрацій ($\tau > \tau^*$) і у верхніх шарах дисперсного матеріалу знаходиться шар цього матеріалу, що не має поверхневої вологи, а його температура рівна температурі мокрого термометра t_{MT} . Відбувається нагрів цих шарів ($t > t_{MT}$), що зменшує температуру теплового агенту на вході в шар дисперсного матеріалу, де існує поверхнева волога і проходить процес сушіння. Таким чином, чим нижче опускається фронт концентрацій вологи у матеріалі, тим з нижчою температурою теплового агенту він контактує. Але у всіх випадках, до нижньої границі паралельного переміщення фронту (до h_{min} у нижній частині шару), кінцева температура теплового агенту буде рівною температурі мокрого термометра t_{MT} . Лише після досягнення фронтом концентрацій верхньої границі нижнього значення h_{min} , температура на виході починає зростати ($t_{вих} > t_{MT}$).

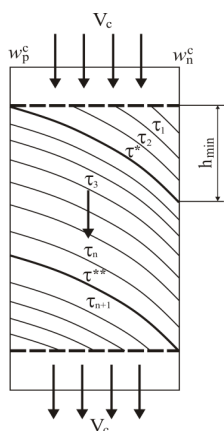


Рис. 7. Схема формування та переміщення фронту концентрації вологи в шарі дисперсного матеріалу під час фільтраційного сушіння

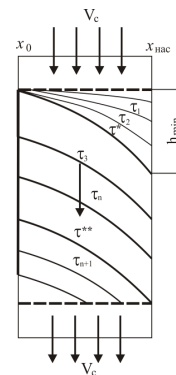


Рис. 8. Схема насичення теплового агенту вологою під час фільтраційного сушіння

На рис. 7 представлено зміну вологовмісту в часі без врахування зміни температури (квазістатичні умови, що є характерними, наприклад, для процесу ізотермічної адсорбції). У випадку фільтраційного сушіння цей фактор мусить бути врахований і, очевидно, по мірі переміщення фронту концентрацій вниз, його висота не буде сталою і рівною h_{min} , а стає все більшою $h_{фр} > h_{min}$, що, в свою чергу, викликає зменшення швидкості сушіння по висоті шару. Розрахункову залежність для визначення h_{min} наведено у [12] за умови, що температура в шарі вологого дисперсного матеріалу визначалася як середньоарифметичне між t_n і t_{MT} .

Звичайно зміна температури у шарі h_{min} не відбувається за лінійним законом. Це доказано в роботі [12] і ця зміна носить експоненціальний характер:

$$\frac{t_n - t}{t_n - t_{MT}} = \frac{1 - e^{-ah}}{1 - e^{-ah_{min}}} \quad (1)$$

де h - біжуча висота шару, м; $0 \leq h \leq h_{min}$;

$$a = \frac{\beta \cdot \sigma}{v} - \text{постійна величина, } \frac{1}{\text{м}};$$

β - коефіцієнт масовіддачі, м/с ;

v - дійсна швидкість теплового агента у шарі, м/с.

З метою визначення середньої температури теплоносія t скористаємось формулою для обчислення середньої величини ординати в означеному інтегралі [12]:

$$\bar{t} = \frac{\int_0^{h_{min}} t \cdot dh}{h_{min}} \quad (2)$$

Підстановка значення t з рівняння (1) у рівняння (2) дає змогу одержати диференціальне рівняння:

$$\bar{t} = \frac{1}{h_{min}} \int_0^{h_{min}} \left[t_n - \frac{t_n - t_{MT}}{1 - e^{-ah_{min}}} (1 - e^{-ah}) \right] dh \quad (3)$$

Після інтегрування та підстановки границь інтегрування, одержуємо

$$\bar{t} = t_n + \frac{1}{a \cdot h_{min}} (t_n - t_{MT}) - \frac{t_n - t_{MT}}{1 - e^{-ah_{min}}} \quad (4)$$

Звичайно дана залежність є значно складнішою, ніж визначення t як середньоарифметичного між $t_{п}$ і $t_{мт}$. Для визначення t необхідно знати $h_{мін}$, для визначення якого і знаходиться t . Враховуючи той факт, що значення $h_{мін}$, має незначні величини (4 – 10 мм), то розрахунок t як середньоарифметичну величину та за рівнянням (4) показав незначне відхилення, яке не перевищує 6%, тому можна рекомендувати для проектних розрахунків визначення t як середньоарифметичне значення.

В нашому випадку, сушіння окремих частинок в шарі дисперсного матеріалу відбувається у першому періоді. Інтенсивність цього процесу визначається коефіцієнтом масовіддачі β . З метою визначення цього коефіцієнту формували “короткий” шар, висота якого є меншою від висоти фронту формування концентрацій вологи $h_{мін}$, а поверхню масообміну F визначали, як поверхню усіх зерен твердого матеріалу, що формують “короткий” шар. Для даного випадку рівняння масовіддачі може бути записане

$$\frac{\Delta W}{\Delta t} = \beta \cdot F \cdot (x_{нас} - x) \cdot \rho \quad (5)$$

де рушійною силою є різниця вологовмісту теплового агента ($x_{нас} - x$);

ΔW - маса випареної вологи за певний проміжок часу Δt ;

ρ - густина теплового агента, кг/м³.

Визначений експериментально коефіцієнт масовіддачі β за умови постійності фізичних величин в основному визначається гідродинамікою, а експериментальні результати представляються критеріальною залежністю

$$Sh = A \cdot Re_e^m \cdot Sc^n \quad (6)$$

де $Sh = \frac{\beta \cdot d_e}{D}$ - число Шервуда;

$Re_e = \frac{v \cdot d_e \cdot \rho}{\mu}$ - число Рейнольдса;

$Sc = \frac{\nu}{D}$ - число Шмідта;

d_e - еквівалентний діаметр шару, м;

D - коефіцієнт молекулярної дифузії водяної пари у повітрі, м²/с;

μ , ν - відповідно, коефіцієнти динамічної і кінематичної в'язкості.

Визначивши коефіцієнт масовіддачі, є можливим прогнозувати динаміку сушіння у шарі дисперсного матеріалу. Математичне моделювання динаміки сушіння у шарі дисперсного матеріалу дозволяє прогнозувати час сушіння та на його основі роботу сушильної установки і її розміри. Час сушіння у шарі висотою H буде складатись для процесу, що протікає у першому періоді, з трьох величин (рис. 7): часу формування фронту концентрацій вологи τ^* , часу переміщення фронту від τ^* до τ^{**} та завершальної стадії від τ^{**} до висушування нижньої частини шару до стану рівноваги W_p^c .

Як було сказано, сушіння представляє собою тепломасообмінний процес, який з функціональної точки зору є процесом видалення вологи з твердого матеріалу, але це видалення визначається тепловими

явищами. У першу чергу, до них належить коефіцієнти тепловіддачі α від теплового агента до сухого матеріалу та до вологого матеріалу. Якщо на початку сушіння існує тепловіддача лише до вологого матеріалу, то після досягнення часу τ^* (часу формування фронту зміни концентрації вологи) буде мати місце і тепловіддача до сухого, і тепловіддача до вологого матеріалу. Значення коефіцієнта α визначається лише дослідним шляхом. Аналогічно, як у випадку визначення коефіцієнта масовіддачі β цей процес проводиться у «короткому» шарі, де теплообмін відбувається на всій висоті шару.

Коефіцієнт тепловіддачі α визначається згідно із законом Ньютона. Для вологого матеріалу цей закон записується:

$$\Delta Q_1 = \alpha_1 \cdot F \cdot (\bar{t} - t_{мт}) \Delta \tau_1 \quad (7)$$

Для сухої поверхні твердої фази:

$$\Delta Q_2 = \alpha_2 \cdot F \cdot (\bar{t} - t_s) \Delta \tau_2 \quad (8)$$

де ΔQ_1 , ΔQ_2 - кількість теплоти, що передається поверхні F твердої фази за час $\Delta \tau_1$ та $\Delta \tau_2$, відповідно, Дж;

α_1 , α_2 - коефіцієнти тепловіддачі до вологого та сухого матеріалу, $\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$;

\bar{t} - середня температура теплоносія, $^{\circ}C$;

$t_{мт}$ - температура мокрого термометра, що відповідає умовам сушіння у I періоді, $^{\circ}C$

t_s - температура поверхні висушеного матеріалу, $^{\circ}C$.

Дослідні дані щодо тепловіддачі представляються у виді критеріальних залежностей

$$Nu = f(Re, Pr) \quad (9)$$

де $Nu = \frac{\alpha \cdot d_e}{\lambda}$ - критерій Нуссельта;

$Pr = \frac{\nu}{a}$ - критерій Прандтля;

λ - коефіцієнт теплопровідності теплового агента, $\frac{Вт}{м \cdot К}$;

a - коефіцієнт температуропровідності, м²/с.

Результати експериментального визначення коефіцієнтів тепло- і масовіддачі наведені у таблиці 1 і на рис. 9.

Таблиця 1

Експериментальні значення коефіцієнтів масовіддачі β і тепловіддачі α

№ п/п	v , м/с	$\Delta W \cdot 10^3$, кг	t_k , $^{\circ}C$	\bar{t} , $^{\circ}C$	$\beta \cdot 10^2$, м/с	α , Вт/м ² ·К
1	1,835	1,05	59,0	69,5	1,40	17,63
		1,03	60,1	70,0	1,37	17,87
		1,068	58,0	69,0	1,424	17,39
2	3,08	1,43	63,0	71,5	1,9	22,77
		1,44	62,0	71,0	1,913	21,98
		1,445	62,1	71,0	1,92	21,98
3	4,14	1,80	64,0	72,0	2,4	28,36
		1,81	63,5	71,75	2,413	28,12
		1,82	63,0	71,5	2,43	27,94

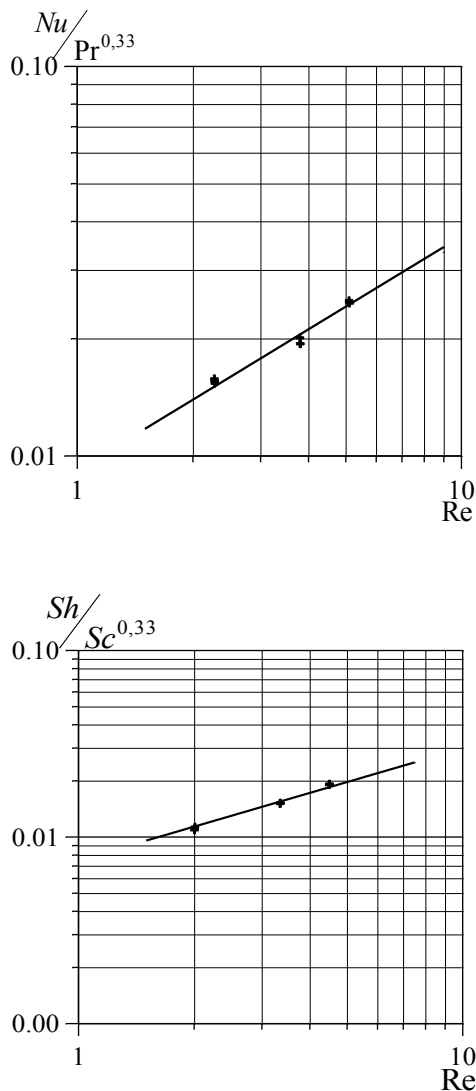


Рис. 9. Узагальнення тепло- і масообміну під час фільтраційного сушіння залізовмісних матеріалів

Математичне оброблення даних рис. 9 дало змогу встановити наступні критеріальні залежності:

– для масообміну:

$$\frac{Sh}{\sqrt[3]{Sc}} = 7,5 \cdot 10^{-3} \cdot Re_e^{0,6} \tag{10}$$

– для теплообміну з шаром вологого матеріалу:

$$\frac{Nu}{\sqrt[3]{Pr}} = 9,2 \cdot 10^{-3} \cdot Re_e^{0,6} \tag{11}$$

Одержані залежності можуть бути використані під час аналізу та розрахунку процесів сушіння, що протікають у першому періоді та характеризуються адсорбційно зв'язаною вологою.

Для визначення часу сушіння та формування фронту концентрацій вологи τ^* можна на основі залежності, яка одержана у [13].

$$1 - \frac{w^c}{w_n^c} = \frac{\tau}{\tau^*} \cdot e^{-\frac{\beta \sigma h}{v}} \tag{12}$$

де τ^* - час формування фронту, с;

w^c - біжучий вологовміст, що відповідає часу τ .

Час формування фронту буде визначатись із залежності [13]:

$$\tau^* = \frac{w_n^c \cdot (1 - \epsilon) \cdot \rho_s}{\beta \cdot \sigma \cdot (x_{нас} - x_n) \cdot \rho} \tag{13}$$

Дана залежність одержана для ізотермічних умов. Її справедливість підтверджується тим, що значення висоти шару h_{min} є незначним і цей шар контактує, у першу чергу, зі свіжим тепловим агентом з заданою температурою t_p . Свідченням ізотермічності служить той факт, що швидкість сушіння у початковий момент часу є лінійною (рис. 5 і рис. 6).

Перенесення зони висушування від часу τ^* до часу τ^{**} одержане у [13], на основі рішення задачі з рухомою границею переміщення $\frac{dh}{d\tau}$ фаз. Одержимо значення швидкості переміщення $\frac{dh}{d\tau}$:

$$\frac{dh}{d\tau} = \frac{v \cdot (x_{нас} - x_n) \cdot \rho}{w_n^c \cdot (1 - \epsilon) \cdot \rho_s} = \gamma = const \tag{14}$$

Залежність переміщення фронту l у часі τ дається залежністю:

$$h = \gamma \cdot (\tau - \tau^*) \tag{15}$$

Проведені нами дослідження показали, що температура у процесі висушування зменшується [5] і, відповідно, відбувається зменшення швидкості висушування. Це означає, що швидкість переміщення зони $\frac{dh}{d\tau}$ зі збільшенням висоти зони h буде зменшуватись,

і час сушіння зростати. Очевидно, що врахування цього фактору може бути проведеним на основі визначення температури у процесі висушування по висоті апарату та часі процесу. Цей метод є точним, але громіздким, тому можна запропонувати наближене зменшення величини швидкості переміщення, ввівши експоненту від висоти шару h . Наприклад,

$$\frac{dh}{d\tau} = \frac{v \cdot (x_{нас} - x_n) \cdot \rho}{w_n^c \cdot (1 - \epsilon) \cdot \rho_s} \cdot e^{-\eta h} \tag{16}$$

де η - коефіцієнт, що визначається на основі дослідних даних щодо швидкості сушіння.

Значення часу сушіння $\tau > \tau^{**}$ на нижній частині шару після τ^{**} до досягнення рівноваги $w^c = w_p^c$ може

бути обчислена за залежністю (13) з врахуванням того, що температура теплового агента у нижній частині буде значно нижчою, ніж у верхніх шарах матеріалу, де відбувається формування фронту.

Таким чином, загальний час сушіння τ_3 шару дисперсного матеріалу, для якого є характерним лише перший період сушіння, буде рівним:

$$\tau_3 = \tau^* + \tau^{**} + \tau^* = 2 \cdot \tau^* + \tau^{**} \tag{17}$$

Очевидно, що визначення температури теплового агента у зоні сушіння вимагає теоретичного та експе-

риментального дослідження цього параметра як на вологому, так і на сухому матеріалі.

У випадку формування фронту перенесення концентрацій вологи у час $\tau \leq \tau^*$ теплота віддається лише на випаровування вологи, а температура твердих частинок у зоні випаровування дорівнює температурі мокрого термометра. Відбувається на ділянці $h \leq h_{\min}$ лише зменшення температури теплового агента від початкової температури $t_{\text{п}}$ до температури мокрого термометра $t_{\text{мт}}$. Кількість цього тепла визначається з теплового балансу і вона визначає кількість вологи, що випаровується:

$$\frac{dW}{dt} \cdot r = v_0 \cdot S \cdot \rho \cdot c \cdot (t_{\text{п}} - t_{\text{мт}}) \quad (18)$$

де W - маса випареної вологи, кг;

r - питома теплота випаровування води, Дж/кг.

Вважаючи, що на короткій висоті h_{\min} середня температура теплоносія може бути прийнята як середньоарифметичне значення між $t_{\text{п}}$ і $t_{\text{мт}}$, можемо скористатись залежністю (1) для визначення температури теплового агента на будь-якій висоті h , яка лежить у границях $0 \leq h \leq h_{\min}$.

Після закінчення виділення вологи з поверхні твердого матеріалу ця частинка та, відповідно, весь шар починають нагріватись. Зростання температури окремо взятої твердої частинки кулястої форми може бути розрахована на основі рівняння теплопровідності з відповідними крайовими умовами:

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial \tau} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \\ T(r, \tau = 0) = T_0 \\ -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=R} = \alpha \cdot [T_c - T(R, \tau)] \\ \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=0} = 0 \end{cases} \quad (19)$$

Розв'язок цієї системи дає можливість визначити температуру у кожній точці тіла, а також середню тем-

пературу тіла \bar{T} , яка є важливим параметром для розрахунку теплових процесів [14]:

$$\frac{\bar{T} - T_0}{T_c - T_0} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cdot \exp(-\mu_n^2 \cdot Fo) \quad (20)$$

де T_c - температура середовища;

μ_n - корені характеристичного рівняння

$$\text{tg} \mu = -\frac{\mu}{Bi - 1}$$

B_n - коефіцієнт

$$B_n = \frac{6 \cdot Bi^2}{\mu_n^2 \cdot (\mu_n^2 + Bi^2 - Bi)}$$

$Bi = \frac{\alpha \cdot R}{\lambda_s}$ - критерій Біо;

$Fo = \frac{a \cdot \tau}{R^2}$ - критерій Фур'є;

λ_s - коефіцієнт теплопровідності, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$.

Даною залежністю (20) можливо скористатись лише за умови незмінності температури сушильного агента. У випадку сушіння у стаціонарному шарі дисперсного матеріалу температура теплового агента змінюється по висоті, причому характер цієї зміни трудно описати математично.

Висновки

Досліджена кінетика і динаміка фільтраційного сушіння кеку глиноземистого і піритних недогарків.

Визначені коефіцієнти тепло- і масообміну між тепловим агентом і частинками досліджуваних матеріалів. Узагальнення результатів тепло- і масообміну наведено у вигляді критеріальних рівнянь.

Встановлено, що температура теплового агенту по висоті шару змінюється, внаслідок нагрівання шару, що призводить до зменшення інтенсивності сушіння вологих частинок.

Література

1. Соболев Х.С. Использование промышленных отходов при производстве цементов – важный фактор энергосбережения и защиты доклина / Х.С. Соболев, В.М. Лугов'як, М.П. Петрук. [Текст] // Вісник ДУ „Львівська політехніка”. Проблеми економії енергії”. - 1999. - № 2. - С. 319-321.
2. Каушанский В.Е. Использование техногенных материалов для экономии энергосырьевых ресурсов в технологии цемента [Текст] / В.Е. Каушанский // II международное совещание по химии и технологии цемента. – Том 2. – М.: “П-Центр”, 2000. – С. 133-140.
3. Физико-механические свойства модифицированных цементов [Текст] / Г.З. Шаяхметов, Т.К. Султанбеков, А.П. Нелина, З.А. Естемесов // Цемент. – 2000. - № 1. – С. 25-26.
4. Ушеров-Маршак А.В. Совместимость цементов с химическими и минеральными добавками [Текст] / А.В. Ушеров-Маршак, М.С. Циак // Цемент. – 2002. - № 6. – С. 6-8.
5. Симак Д.М. Теплообмен при сушке дисперсных материалов, что протекает в первом периоде [Текст] / Д.М. Симак, В.М. Атаманюк // Восточно-Европейский журнал передовых технологий // Харьков: 1/9 (49) – 2011. С. 23-26.
6. Атаманюк В.М. Дисперсні матеріали. Механізм і кінетика фільтраційного сушіння [Текст] / В.М. Атаманюк // Хімічна промисловість України. К.: – 2007. – № 4, – С. 24-29.

7. Станіславчук О.В. Сушіння пастоподібних матеріалів у нерухомому шарі [Текст]: автореф. дис...канд. техн. наук: 05.17.08 / О.В. Станіславчук; [НУ Львівська політехніка]. – Львів, 2007. – 20с.
8. Римар Т.І. Сушіння глини у нерухомому шарі [Текст]: Автореф. дис...канд. техн. наук: 05.17.08. / Т.І. Римар; [НУ Львівська політехніка]. – Львів, 2008. – 19с.
9. Ханик Я.М. Сушіння біологічно-активних пастоподібних матеріалів. / Я.М. Ханик, О.В. Станіславчук, Л.З. Білецька, В.П. Дулеба [Текст] // Науковий вісник УДЛТУ: Збірник наукових праць. – Львів. -2002. Вип. 12.5. -С.126 – 129.
10. Станіславчук О.В. Термолабільні матеріали. Кінетика конвективного сушіння. / О.В. Станіславчук, Я.М. Ханик [Текст] // Хімічна промисловість України. -К.: -2005. -№2 (67). – С.36-38.
11. Римар Т.І. Масообмін під час сушіння капілярно-пористих колоїдних матеріалів у нерухомому шарі [Текст] / Т.І. Римар, Я.М. Ханик, І.О. Гузьова // ОНАХТ. Наукові праці. Вип. № 30. – Одеса: 2007. – С. 17 – 23.
12. Вища математика [Текст] : підручник для студ. вищ. навч. закладів: У 2 ч. /П.П. Овчинников, Ф.П. Яремчук, В.М. Михайленко; Пер. з рос. П.М. Юрченко. - 3-тє вид., виправ. - Київ : Техніка, 2003. - 600 с.
13. Атаманюк В.М. Гідродинаміка і тепломасообмін під час фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів [Текст]: Автореф. дис...докт. техн. наук: 05.17.08. / В.М. Атаманюк; [НУ Львівська політехніка]. – Львів, 2007. – 36с.
14. Лыков А.В. Теория сушки [Текст] / А.В. Лыков. –М.: Энергия. 1968. -472с.

Розглядається процес спалювання твердого палива в котлах з низькотемпературним киплячим шаром. Дано результати розрахунків режимних характеристик киплячого шару. Представлено результати комп'ютерного моделювання аеродинаміки потоку та розподілу твердих часток в топці

Ключові слова: котли, киплячий шар, аеродинаміка, моделювання

Рассматривается процесс сжигания твердого топлива в котлах с низкотемпературным кипящим слоем. Даны результаты расчетов режимных характеристик кипящего слоя. Представлены результаты компьютерного моделирования аэродинамики потока и распределение твердых частиц в топке.

Ключевые слова: котлы, кипящий слой, аэродинамика, моделирование

The paper considers the process of burning solid fuel in boilers with a low boiling layer. The results of calculations of the basic regime characteristics of the fluid bed are given. The results of aerodynamic simulation and the distribution of solid particles in firebox are presented.

Keywords: boilers, fluidized bed, aerodynamics, modeling

УДК 696.42

ДОСЛІДЖЕННЯ КОТЕЛЬНОЇ УСТАНОВКИ КИПЛЯЧОГО ШАРУ НА БАЗІ НАТУРНИХ ТА КОМП'ЮТЕРНИХ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

Л.М. Бугаєва

кандидат технічних наук, доцент*

Контактний тел.: (067) 315-73-74

E-mail: bugaeva_l@ukr.net

Д.О. Серебрянський

Кандидат технічних наук, науковий співробітник

Інститут технічної теплофізики НАН України

вул. Желябова, 2 а, Київ, Україна, 03057

Контактний тел.: (044) 453-28-91

E-mail: fordima@ukr.net

А.А. Дейкун

Студент

*Кафедра кібернетики хіміко-технологічних процесів
Національний технічний університет України «Київський

політехнічний інститут»

пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056

Контактний тел.: (044) 406-76-12

E-mail: artem@meta.ua