

неорганічні кислоти при цих самих концентраціях. Показано, що головною причиною зміни активності і селективності процесу під час додавання кислот і буферних сумішей є не зміна водного показника, а вплив продуктів, які утворюються під час їх додавання.

1 Пат.3911009 США, МКИ С 07 с 103/133. Process for the production of acrylamide| Yoshimura Їр.Опубл.7.10.1975. 8с. 2. Пат.4169107 США, МКИ С07с 103/133. Process for manufacturing an amide compound using aluminum nitrate promotev| Asano Shiro/ Он.25.0.1979.НКИ 260–561 Т. – 8 с. 3. Пат. 3776957 США. МКИ С07 с 103/00. Metod for removing copper from aqueous solutions of acrylamide| І.Д. Newkirk (США); Nalco Chemical Co/ -№ 253073. Заяв. 15.05.72. Опубл. 4.12.73. НКИ 260-561Т. – 4 с. 4. Мопривський Т.М., Мокрий Є.М., Хомко Н.Ю., Гідратація алифатичних нітрилів на мідних каталізаторах // ДНАН України. 1998. – №3. – С.146–149.

УДК 66.047

Д.М. Симак, Я.М. Ханик, О.В. Шуст
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра хімічної інженерії

ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОДИНАМІКИ ПІД ЧАС СУШІННЯ ПІРИТНИХ НЕДОГАРКІВ У НЕРУХОМОМУ ШАРІ

© Симак Д.М., Ханик Я.М., Шуст О.В., 2007

Йдеться про необхідність пошуку методів сушіння піритних недогарків, що дають можливість інтенсивно обезводнювати матеріал при низьких питомих енергозатратах. На основі результатів проведених досліджень наводяться залежності, які дають змогу прогнозувати зміну перепаду тисків від зміни швидкості теплоносія.

The article deals with necessity of searching methods of drying iron oxide, wich give possibility intensively to unwater material at little expenditures of energy. The obtained dependences based on the results of the carried experimental studies make it possible to prognosticate the overfall of the pressures depending on the change of the heatcarrier speed.

Вступ. Досліджувані нами піритні недогарки привертають до себе значний науковий інтерес. Це зумовлено їх широким використанням під час виробництва такого цінного будівельного матеріалу, як цемент. А наявність їх в останньому дозволяє істотно покращувати властивості готового продукту. Піритні недогарки – це композитний матеріал, що являє собою складну систему. Джерелом цього матеріалу слугують відходи виробництва чавуну. Отже, використання піритних недогарків не лише покращує якісні та кількісні характеристики цементу, а й одночасно забезпечує вирішення екологічної проблеми, пов'язаної із забрудненням навколишнього середовища відходами промисловості.

Однак, вологий матеріал неможливо дозувати та транспортувати в зону виготовлення цементу. А використання вказаних відходів можливе лише тоді, коли вони знаходяться у сухому стані.

Формулювання мети дослідження та результати проведених експериментів. Завданням нашого дослідження є пошук методів сушіння піритних недогарків для його інтенсивного обезводнення за низьких питомих енергозатрат.

Було проаналізовано різні методи сушіння. Як відомо, сушіння є складним теплофізичним технологічним процесом і часто лімітуючою стадією виробництва. Тільки в хімічній промисловості процесу сушіння підлягають більше 200000 різноманітних продуктів [1]. Щоб отримати сухий продукт високої якості, потрібний індивідуальний підхід до розроблення раціональних методів сушіння. Для цього необхідно глибоко вивчити механізм процесу з врахуванням природи матеріалу і створити агрегати, що характеризуються високою ефективністю.

Більше 20% від всіх затрат палива і електроенергії в хімічній промисловості витрачаються на процес сушіння [1]. Тому питання інтенсифікації процесу, зниження затрат на сушіння, а також створення компактних високопродуктивних агрегатів для зневоднення різноманітних матеріалів є актуальними і потребують свого вирішення.

Внаслідок сушіння здійснюється перенесення теплоти і маси, яке супроводжується структурно-механічними змінами зневодненої речовини [2] і характеризується значними енергетичними затратами і забрудненням навколишнього середовища.

На кінетику сушіння переважно впливає форма зв'язку вологи з матеріалом. Цю закономірність процесу вперше спостерігали в роботах П.Д. Лебедева [3], ці роботи засвідчили, що механізм переміщення вологи в матеріалі визначається формою її зв'язку, а кінетика сушіння характеризується двома періодами.

Якісний розвиток теорії сушіння описаний у фундаментальних працях А.В. Ликова [4–5]. Цей вчений вивчив основні закономірності механізму процесу тепломасоперенесення, а саме теорія поглиблення зони випаровування, явище термодифузії вологи, розроблені системи диференціальних рівнянь волого- і тепломасоперенесення в капілярно- пористих матеріалах [5].

Існує така класифікація сушильних процесів: конвективний, контактний, радіаційний, сублимаційний, сушіння з використанням струму високої частоти, фільтраційний.

Найвдалішою вважають класифікацію сушильних процесів, наведену А.С. Гінзбургом [6]:

- 1) за режимом роботи (процеси сушіння періодичні та безперервні);
- 2) за тиском в сушильній камері (сушарки, які працюють під надлишковим тиском, атмосферні і вакуумні сушарки);
- 3) за напрямом руху теплоносія (прямотечійні, протитечійні, перехреснотечійні);
- 4) за видом сушильного агенту (нагріте повітря, перегріта пара і рідкі середовища);
- 5) за методом переміщення сушильного агенту (природна та вимушена циркуляція).

За способом підведення енергії до висушуваного матеріалу розрізняють конвективне і кондуктивне сушіння, а також сушіння з використанням енергетичних полів: терморадіаційне, струмами високої частоти, в акустичному полі [7, 8, 9].

Найпоширенішим способом сушіння матеріалів є кондуктивний, кінетика та механізм тепло- і масообміну якого описані в праці [5].

Особливості сушіння в нерухомому шарі. Аналіз літературних джерел дозволяє зробити висновок, що найпридатнішим методом для сушіння досліджуваного матеріалу є сушіння у щільному шарі, коли тепловий агент рухається через зернистий шар в напрямку до перфорованої перегородки. Цей процес має переваги перед описаними існуючими методами. Процес тепломасообміну відбувається на внутрішній поверхні шару, яка в багато разів перевищує геометричну поверхню в разі сушіння конвективним методом. При сушінні в щільному шарі усувається можливість винесення дрібнодисперсної фази в навколишнє середовище, що має велике значення для захисту довкілля.

Першим етапом дослідження сушіння дрібнодисперсних матеріалів є вивчення гідродинаміки процесу.

Для проведення дослідження з гідродинаміки запропоновано експериментальну лабораторну установку, що зображена на рис. 1.

Установка працює так. Досліджуваний матеріал розміщується в контейнері 1 і за допомогою регулюючого вентиля 5 встановлюється відповідне розрідження в ресивері 2, яке фіксується вакуумметром 12. Повітря, нагріте до заданої температури в калорифері 8, за допомогою вентилятора 9 подається на досліджуваний матеріал у кількості, що переважає кількість повітря, яке просмоктується вакуум-насосом 7 (надлишок нагрітого повітря вільно виходить через зазор між дифузором калорифера і контейнера). Це зроблено з метою забезпечення рівномірності подачі теплоносія на площині об'єкта і виключає попадання в зону сушіння повітря із зовнішнього середовища. Теплоносій просмоктується через досліджуваний матеріал завдяки розрідженню, створюваному вакуум-насосом 7.

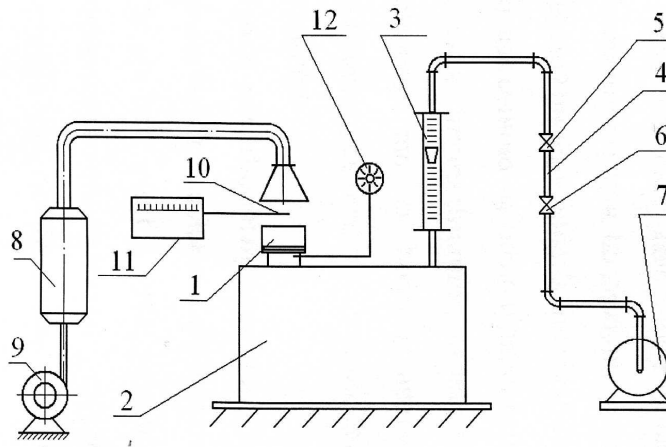


Рис. 1. Схема експериментальної установки: 1 – контейнер; 2 – ресивер; 3 – ротаметр; 4 – система трубопроводів; 5,6 – регулюючий і запірний вентиля; 7 – вакуумний насос; 8 – калорифер, 9 – вентилятор; 10 – термопара; 11 – потенціометр; 12 – вакуумметр

Для вимірювання витрат теплоносія використовується ротаметр 3 моделі РС-7, а перепаду тисків – вакуумметр 12. Ресивер 2 слугує для згладжування пульсацій повітряного потоку, створюваного водокільцевим вакуумним насосом 7 під час роботи.

На рис. 2 показані результати досліджень гідродинаміки. Під час досліджень вивчали зміну гідравлічного опору залежно від швидкості руху для різних висот шару.

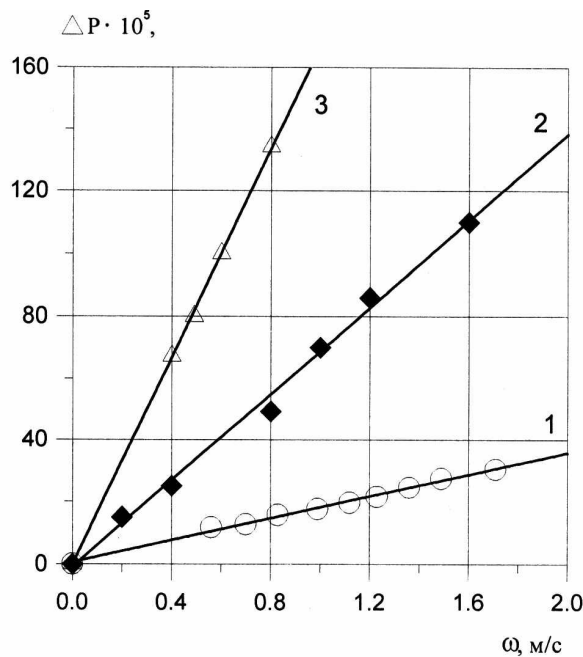


Рис. 2. Залежність гідравлічного опору від швидкості руху теплоносія для різних висот шару (1 – 10, 2 – 20, 3 – 31·10⁻³ м)

Як видно із рис.2 залежність гідравлічного опору від фіктивної швидкості має лінійний характер для всіх висот шару матеріалу. З цього випливає, що на гідравлічний опір впливає в'язкісна складова.

На практиці для визначення гідравлічного опору шару дисперсного матеріалу найчастіше застосовують відому формулу Дарсі-Вейсбаха [10]

$$\Delta P = \lambda \cdot \frac{H}{d_e} \cdot \frac{\rho \cdot \omega^2}{2}, \quad (1)$$

де λ – коефіцієнт опору; H – висота шару, м; d_e – еквівалентний діаметр, м; ρ – густина середовища, $\frac{кг}{м^3}$; ω – дійсна швидкість руху середовища, $\frac{м}{с}$.

У технічній літературі [10] запропоновано залежності для визначення коефіцієнта опору $\lambda(\lambda = f(Re))$. Усі ці залежності отримані узагальненням експериментальних даних, для різних матеріалів. У загальному випадку значення λ можна виразити у вигляді [10]:

$$\lambda = \frac{A}{Re} + B, \quad (2)$$

де A, B – коефіцієнти, які визначають експериментально; Re – критерій Рейнольдса, який розраховують за відомою формулою

$$Re = \frac{\omega \cdot d_e \cdot \rho}{\mu}, \quad (3)$$

де μ – коефіцієнт динамічного тертя, $Па \cdot с$.

Підставивши у рівняння (1) рівняння (2) та (3), отримаємо

$$\Delta P = \left(\frac{A}{Re} + B \right) \cdot \frac{H}{d_e} \cdot \frac{\rho \cdot \omega^2}{2} = \left(A \cdot \frac{\mu}{\omega \cdot d_e \cdot \rho} + B \right) \cdot \frac{H}{d_e} \cdot \frac{\rho \cdot \omega^2}{2}. \quad (4)$$

Експериментально визначити дійсну швидкість руху газу у шарі зернистого матеріалу є неможливо. У різних точках шару дисперсного матеріалу вона буде різною і залежатиме від діаметра каналу, по якому рухається потік. Тому на практиці користуються фіктивною швидкістю (швидкістю потоку, віднесеному до всього перерізу), яку позначають ω_0 . Співвідношення між дійсною швидкістю ω та фіктивною швидкістю ω_0 має вигляд [10]

$$\omega = \frac{\omega_0}{\varepsilon}, \quad (5)$$

де ε – частка порожнечі в одиниці об'єму шару матеріалу, $\frac{м^3}{м^3}$.

Підставивши у формулу (4) у формулу (5), отримаємо

$$\Delta P = \left(A \cdot \frac{\mu \cdot \varepsilon}{\omega_0 \cdot d_e \cdot \rho} + B \right) \cdot \frac{H}{d_e} \cdot \frac{\rho \cdot \omega_0^2}{2 \cdot \varepsilon^2}. \quad (6)$$

Для спрощення виразу подамо еквівалентний діаметр у вигляді залежності [10]

$$d_e = \frac{4 \cdot \varepsilon}{a}, \quad (7)$$

де a – питома поверхня шару, $\frac{м^2}{м^3}$.

Тоді формулу (6) можна подати у вигляді

$$\Delta P = \left(A \cdot \frac{\mu \cdot \varepsilon \cdot a}{\omega_0 \cdot 4 \cdot \varepsilon \cdot \rho} + B \right) \cdot \frac{H \cdot a}{4 \cdot \varepsilon} \cdot \frac{\rho \cdot \omega_0^2}{2 \cdot \varepsilon^2} = \left(A \cdot \frac{\mu \cdot a}{\omega_0 \cdot 4 \cdot \rho} + B \right) \cdot \frac{H \cdot a \cdot \rho \cdot \omega_0^2}{8 \cdot \varepsilon^2} \quad (8)$$

або

$$\Delta P = A \cdot \frac{\mu \cdot a^2}{32 \cdot \varepsilon^3} \cdot H \cdot \omega_0 + B \cdot \frac{a \cdot \rho}{8 \cdot \varepsilon^3} \cdot H \cdot \omega_0^2.$$

Внаслідок проведених перетворень отримали модифіковане двочленне рівняння Ергана. Для знаходження невідомих A^* і B^* , розділимо ліву і праву частину рівняння (8) на $H \cdot \omega_0$ і в результаті отримаємо рівняння прямої лінії

$$\frac{\Delta P}{H \cdot \omega_0} = A \cdot \frac{\mu \cdot a^2}{32 \cdot \varepsilon^3} + B \cdot \frac{a \cdot \rho}{8 \cdot \varepsilon^3} \cdot \omega_0. \quad (9)$$

Перша складова цього рівняння є постійною величиною (для конкретних умов проведення експерименту), у другій складовій змінною величиною є тільки фіктивна швидкість. Подавши експериментальні дослідження, зображені на рис. 3, у координатах $\frac{\Delta P}{H \cdot \omega_0} = f(\omega_0)$, можна визначити невідомі коефіцієнти A^* і B^* . Однак, як випливає із отриманих результатів (рис. 3) величина $B = 0$.

Відрізок, який відтинає пряма лінія на осі ординат дорівнює складовій $A^* = A \cdot \frac{\mu \cdot a^2}{32 \cdot \epsilon^3}$ рівняння (9). Для прогнозування гідродинаміки процесу проведено узагальнення результатів, згідно з якими рівняння матиме вигляд

$$\Delta P = 17,9 \cdot 10^7 \cdot H^2 \cdot \omega_0 \quad (10)$$

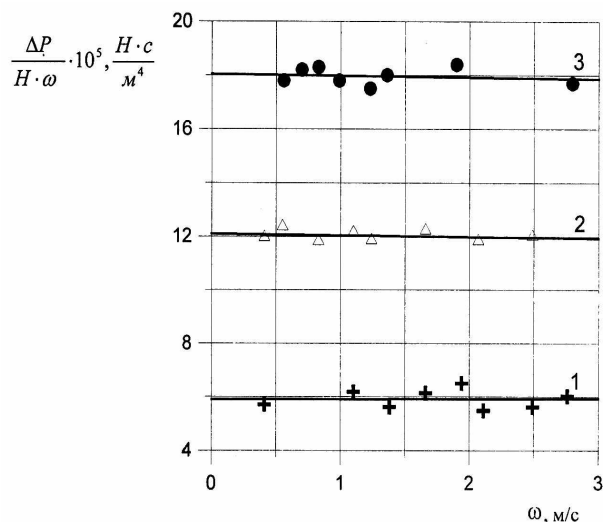


Рис. 3. Узагальнення результатів гідродинаміки сухих відходів за різної висоти шару

Висновки. На основі результатів досліджень гідродинаміки піритних недогарків у нерухомому шарі і узагальнення результатів (рис. 3) отримуємо залежність, яка дозволяє прогнозувати зміну гідравлічного опору

$$\Delta P = 17,9 \cdot 10^7 \cdot H^2 \cdot \omega_0 \quad (10)$$

Результати з вивчення гідродинаміки під час руху повітря через шар сухого матеріалу дозволяють дати оцінку фільтраційному процесу з погляду його енергетики, правильно розрахувати зміну гідравлічного опору матеріалу під час сушіння і разом з результатами з кінетики сушіння зробити висновок про його інтенсивність, ефективність, доцільність застосування, а також прогнозування перебігу його в часі.

1. Сажин Б.С. Основы техники сушки. – М.: Химия, 1984 – 320 с. 2. Лебедев П.Д. Теплообменные, сушильные и холодильные установки. – М.: Энергия, 1972. – 320 с. 3. Лыков А.В. Теплообмен: Справочник. – М.: Энергия, 1972 – 479 с. 4. Лыков А.В., Михайлов Ю.А. Теория тепло- и массопереноса. – Л.: Госэнергоиздат, 1963 – 535 с. 5. Лыков А.В. и др. Сопряженные задачи конвективного теплообмена. – Минск: Изд-во БГУ, 1971 – 346 с. 6. Гинзбург А.С. Расчет и проектирование сушильных установок пищевой промышленности. – М.: Агропромиздат, 1985 – 336 с. 7. Муштаев В.И. и др. Теория и расчет сушильных процессов. – М.: Химия, 1984 – 230 с. 8. Ханик Я.М., Білецька Л.З., Кіндзера Д.П. Шляхи інтенсифікації фільтраційного сушіння // Тез. доп. X міжнар. конф. “Вдосконалення процесів та апаратів хімічних та харчових виробництв” (ICSE – 99). – Львів – 1999 – С. 60–61. 9. Чернявский А.И., Топчий В.И. Оптимизация процессов сушки картона и охлаждение целлюлозы фильтрационным способом. // Тез. докл. Всесоюз. техн. семинара “Оптимизация процессов сушки”. – Харьков, 1983 – 168 с. 10. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 1971. – 784 с.