

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА СУШКИ

- Инструкция по эксплуатации. – MLW, 1981. – 20 с.
5. Реофизика и реодинамика текучих систем / Под ред. Лыкова А.В., Шульмана З.П. – Минск: Изд. „Наука и техника”, 1970. – 172 с.
6. Белкин И.М. Ротационные приборы. Измерение вязкости и физико-механических характеристик материалов. – М.: Машиностроение, 1967. – 272 с.
7. Лыков А.В., Берковский Б.М. Тепло и массообмен в неньютоновских жидкостях. Законы переноса в неньютоновских жидкостях. – М.: Энергия, 1968. – С. 5–14.
8. Кутателадзе С.С., Хабахпашева Е.М., Лемберский В.Б. Некоторые вопросы гидродинамики и теплообмена структурно-вязких сред. Законы переноса в неньютоновских жидкостях. – М.: Энергия, 1968. – С. 5–14.

Получено 15.01.2009 г.

УДК 66.047

Атаманюк В.М., Гумницький Я.М.

Національний університет «Львівська політехніка»

ВНУТРІШНЬОДИFUZІЙНЕ МАСОПЕРЕНЕСЕННЯ ПІД ЧАС СУШІННЯ КАМ'ЯНОГО ВУГІЛЛЯ

Запропоновано фізичну модель розподілу вологи в одинарній частинці під час її сушіння у другому періоді. Математично описано процес внутрішньодифузійного масо перенесення та визначено вплив зовнішньої гідродинаміки на величину масового потоку.

Предложена физическая модель распределения влаги в одиночной частице при её сушке во втором периоде. Математически описан процесс внутривязузионного массопереноса и определено влияние внешней гидродинамики на величину массового потока влаги.

We propose a physical model of moisture distribution in an individual particle during its drying at the second period. We give a mathematical description of process of intra diffusion mass transfer and determine formal influence of external hydrodynamics on the value of mass moisture flux

D_w – коефіцієнт внутрішньої дифузії;
 d – діаметр частинки;
 j_w – масовий потік вологи;
 r_0 – радіус на границі розподілу фаз;
 r – поточний радіус;
 R – радіус частинки;
 t – температура теплового агента;
 T – температура частинки вугілля;
 v – швидкість теплового агента;
 w – вологовміст матеріалу;
 x – вологовміст теплового агента;

α – коефіцієнт тепловіддачі, кут нахилу прямої до осі абсцис;
 ε – пористість;
 η – коефіцієнт, що характеризує ступінь досконалості процесу;
 μ – динамічний коефіцієнт в'язкості;
 ρ – густина повітря, води;
 τ – час;
 $Fo = \frac{D_w \tau}{R^2}$ – число Фур'є;

$$Re = \frac{v d \rho}{\mu} \text{ – число Рейнольдса;}$$

$$\varphi_0 = \frac{r_0}{R}, \varphi = \frac{r}{R} \text{ – безрозмірний радіус.}$$

Ідекси верхні:

s – маса сухого матеріалу;

$*$ – температура теплового агента.

Ідекси нижні:

0 – початкове значення;

1 – поверхня частинки;

s – тверда частинка;

v – вода;

$кр$ – критичний;

$нас$ – стан насичення;

t – тепловий агент.

Вступ

Значні запаси кам'яного вугілля в Україні зумовили його широке використання в енергетиці, хімічній і коксохімічній промисловості. Методи видобування, збагачення та зберігання вугілля на відкритих майданчиках обумовлюють його вологість в межах 18...28% залежно від його гранулометричного складу. Для використання вугілля як палива або сировини хімічної промисловості його необхідно висушити до вологості менше 10% у розрахунку на суху масу. Відомо, що під час сушіння найважче видалити внутрішню вологу. Це пов'язано з тим, що у внутрішньому вологоперенесенні бере участь близько п'ятнадцяти різних за своїм механізмом елементарних видів перенесення маси і теплоти [1, 2], тому теоретичний аналіз сушіння дисперсних матеріалів у другому періоді починають із дослідження процесів, які відбуваються в окремій частинці правильної форми. Більшість авторів для оцінки інтенсивності вологопровідності в окремій частинці найчастіше використовують кулясту модель [3, 4]. Ще однією проблемою в дослідженнях внутрішнього вологоперенесення є те, що границя масообміну під час сушіння є рухомою, тому з метою спрощення розв'язку нестационарний процес тепломасообміну змінюють на квазістационарний.

Теоретична частина

Предметом дослідження є сушіння у другому періоді одинарної частинки кулястої форми із значенням внутрішньої пористості ε_v , пори якої заповнені водою. Зовнішня поверхня твердої частинки омивається тепловим агентом, температура і вологовміст якого є постійними в часі. Для створення математичної моделі приймаємо, що всі пори є кінетично рівноцінні, тверде тіло є ізотропним в дифузійному відношенні. Крім того, вважаємо, що кінетичні коефіцієнти відповідають середньому значенню температури частинки.

Розглянемо механізм внутрішнього вологоперенесення. У кожній порі процес переходу вологи у пароподібний стан відбувається на вільній поверхні вологи, створюючи біля цієї поверхні тиск насиченої пари. Внаслідок цього виникає градієнт вологовмісту всередині пори, що призводить до виникнення потоку вологи у пароподібному стані від границі розділу фаз “вода (конденсована волога) – пара” до зовнішньої поверхні частинки з подальшим переходом шляхом конвективної дифузії до теплового агента.

На рис. 1 зображено частинку кулястої форми радіуса R з наявними порами (для прикладу вибрано дві). Зображена схема ілюструє стан матеріалу під час другого періоду в момент часу τ . Волога у сконденсованому стані знаходиться на радіусі r_0 , що є границею розподілу двох фаз. Над поверхнею рідини знаходиться пара у стані насичення з вологовмістом $x_{нас}$. На поточному радіусі r вологовміст складатиме величину x . На поверхні частинки значення вологовмісту відповідають значенням у тепловому агенті $x(R) = x_1$. В міру висушування границя розділу фаз пересувається у глибину частинки, а її середній вологовміст зменшується.

Запропонована модель є аналогічною до процесів екстрагування з твердої фази твердих включень, які монолітно заповнюють пори інертного матеріалу [5], однак процес внутрішньодифузійного перенесення під час фільтраційного сушіння є значно складнішим, тому що в нашому випадку крім зміни кількості вологи у порах, змінюється ще й температура твердої частинки. Аналогічний підхід до моделювання процесу сушіння твердих частинок в другому періоді розглянуто у [6]. Складність ма-

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА СУШКИ

тематичної моделі також полягає в тому, що розглядається система з рухомою границею фаз, що значно ускладнює аналітичний розв'язок, тому скористаємось наближеним методом з використанням інтегральних співвідношень, адекватність яких перевіримо експериментально.

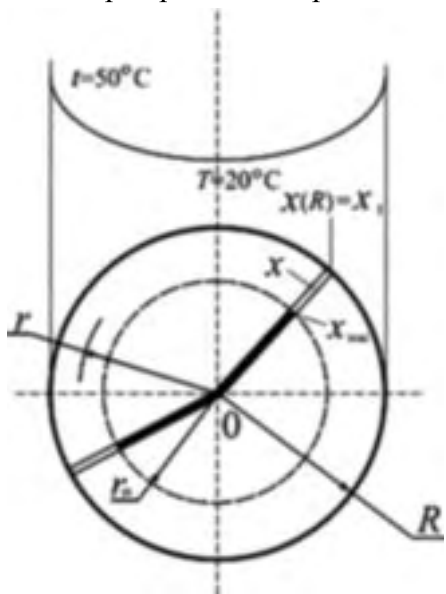


Рис. 1. Схема розподілення вологи і температури всередині твердої частинки під час другого періоду сушіння в момент часу τ .

Інтегральне співвідношення для нашого випадку, що базується на балансовому рівнянні, у певний момент часу τ може бути записане:

$$-\frac{d}{d\tau} \left(\varepsilon_b \frac{4}{3} \pi r_0^3 \rho_b + \int_{r_0}^R \varepsilon_b \rho x 4 \pi r^2 dr \right) = \varepsilon_b D_w 4 \pi R^2 \rho \left(\frac{\partial x}{\partial r} \right)_{r=R} + \varepsilon_b 4 \pi r_0^2 x_1 \rho \frac{d r_0}{d \tau} \quad (1)$$

Перший член лівої частини рівняння являє собою масу води, що знаходиться у частинці на відстані $0 - r_0$, а другий член – масу вологи, що знаходиться у порах на відстані $r_0 - R$ у пароповітряній суміші. Перший член правої частини рівняння відповідає потоку вологи з поверхні твердої частини, у якому значення $\varepsilon_b D_w$ є коефіцієнтом вологопровідності, і є аналогом коефіцієнта теплопровідності у законі Фур'є [5]. Другий член рівняння відповідає потоку вологи,

який вноситься з тепловим агентом у пори частинки за рахунок переміщення границі розділу фаз у глибину частинки (стефанівський потік, який є характерним для процесів, що протікають на границі зі зміною агрегатного стану [7]).

Рівняння (1) доповнимо крайовими умовами:

$$\begin{cases} x(r = r_0, \tau) = x_{\text{нас}} \\ x(r = R, \tau) = x_1 \end{cases} \quad (2)$$

Враховуючи, що процес сушіння у другому періоді протікає повільно, можемо прийняти його як квазістаціонарний. У цьому випадку розв'язок диференціального рівняння дасть змогу визначити характер розподілення вологовмісту у порах твердої частинки під час другого періоду сушіння для області $r_0 - R$. Дане диференціальне рівняння для частинок кулястої форми має вигляд:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left[\rho \frac{\partial (r x)}{\partial r} \right] = 0 \quad (3)$$

Інтеграл рівняння (3) визначає лише розподіл вологовмісту теплового агента x в середині капілярів, вільних від рідкої фази, і відповідає крайовим умовам (2):

$$\frac{x_{\text{нас}} - x}{x_{\text{нас}} - x_1} = \frac{1 - \frac{r_0}{r}}{1 - \frac{r_0}{R}} \quad (4)$$

Визначивши із рівняння (4) градієнт вологовмісту $\frac{\partial x}{\partial r}$ і підставивши це значення у рівняння

(1), а також ввівши безрозмірні параметри – безрозмірний радіус φ і безрозмірний час – число Фур'є Fo , після необхідних перетворень, отримаємо:

$$-m \int_1^{\varphi_0} (\varphi - \varphi^2) d\varphi - \frac{1}{6} \int_1^{\varphi_0} \left(\frac{1}{\varphi} + 1 - 2\varphi \right) d\varphi = \int_0^{\tau} dFo, \quad (5)$$

де
$$m = \frac{\rho_g - \rho(x_{нас} - x_1)}{\rho(x_{нас} - x_1)}$$

Інтеграл рівняння (5) встановлює залежність між границею розділу фаз та часом сушіння:

$$m \left(\frac{1}{6} - \frac{\varphi_0^2}{2} + \frac{\varphi_0^3}{3} \right) - \frac{1}{6} (\ln \varphi_0 + \varphi_0 - \varphi_0^2) = Fo. \quad (6)$$

Зв'язок між φ_0 та вологовмістом твердої частинки w^c визначається залежністю:

$$\varphi_0 = \sqrt[3]{\frac{w^c}{w_{кр}^c}}. \quad (7)$$

Експериментальна частина

Об'єктом дослідження вибрано кам'яне вугілля, сушіння якого представляє актуальну проблему для вугільнозбагачувальних фабрик. Кам'яне вугілля являє собою тверде тіло, пронизане системою пор і тріщин, з розмірами від $3 \cdot 10^{-9}$ м до $1 \cdot 10^{-3}$ м [8]. Внутрішня пористість вугілля складає 4...8% від об'єму. На долю мікро і перехідних пор припадає 95% всієї внутрішньої поверхні і 80% внутрішнього вільного об'єму. Внаслідок видобування, збагачення і зберігання на відкритих майданчиках пори вугілля заповнюються вологою, яку перед його використанням у будь-якому технологічному процесі необхідно висушити.

На рис.2 наведено результати експериментальних досліджень сушіння одинарної частинки кулястої форми, виготовленої із цільного куска кам'яного вугілля марки Ж. Частинка розміщувалась у контейнері сушильної установки, через яку проходило нагріте до заданої температури повітря, що створювало умови рівності температури на поверхні частинки та теплового агента.

Враховуючи, що температура сушильного агента становить $t = 50^\circ\text{C}$, а температура частинки $T = 20^\circ\text{C}$, можемо припустити, що фізичні параметри речовин, які приймають участь у масообміні всередині частинки змінюються незначно. Передбачається, що границя розподілу фаз переміщається у процесі сушіння і темпера-

тура на цій границі залишається незмінною і рівною температурі мокрого термометра.

Для умов сушіння у другому періоді вираз (6) може бути спрощений. З цією метою проаналізуємо параметр m . Перш за все відзначимо, що густина води є значно більшою, ніж густина газової фази та значень вологовмісту. Наприклад, для одного із дослідів $x_{нас} = 0,019$ кг $\text{H}_2\text{O}/\text{кг}$ сух.м., вологовміст теплового агента $x_1 = 0,0072$ кг $\text{H}_2\text{O}/\text{кг}$ сух.м., густина теплового агента $\rho = 1,205$ кг/м³, а води $\rho_v = 1000$ кг/м³. Тоді $\rho(x_{нас} - x_1) = 0,0142$, а це означає, що $\rho_v = 1000 \gg \rho(x_{нас} - x_1) = 0,0142$.

Тому рівняння (6) можна записати у вигляді:

$$\left(\frac{1}{6} - \frac{\varphi_0^2}{2} + \frac{\varphi_0^3}{3} \right) = \frac{Fo}{m}. \quad (8)$$

З метою визначення комплексу змінних у процесі сушіння величин, що пропорційні густині масового потоку представимо експериментальні результати, наведені на рис. 2, у вигляді

$$\left(\frac{1}{6} - \frac{\varphi_0^2}{2} + \frac{\varphi_0^3}{3} \right) = f(\tau), \quad (\text{рис. 3}).$$

w_c , кг $\text{H}_2\text{O}/\text{кг}$ сух. м.

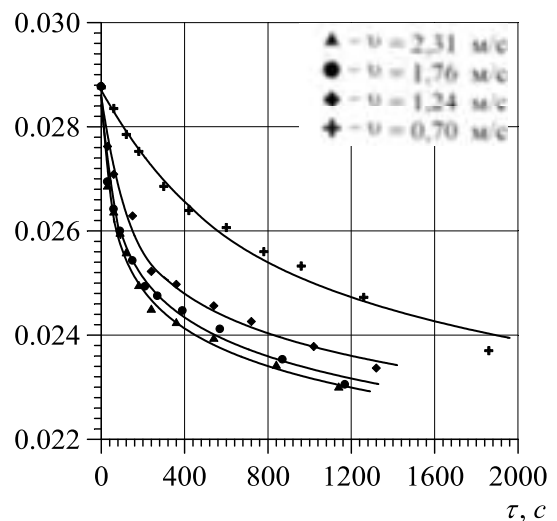


Рис. 2. Кінетика сушіння одинарної частинки вугілля за температури сушильного агента $t = 50^\circ\text{C}$.

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА СУШКИ

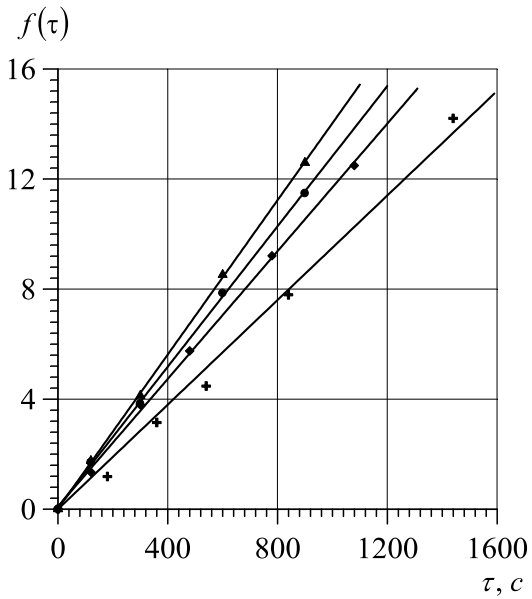


Рис. 3. Залежність $f(\tau)$ (Позначення відповідають рис. 2).

Одержані прямолінійні залежності свідчать про адекватність запропонованої моделі реальним результатам. Вище було показано, що у параметра m величина чисельника може бути прийнятою ρ_b , тобто

$$m = \frac{\rho_b}{\rho (x_{нас} - x_1)} \tag{9}$$

Величини ρ і $x_{нас}$ залежать від температури, тому, записавши

$$tg \alpha = \frac{l}{\rho_b R^2} D_w \rho (x_{нас} - x_1) \tag{10}$$

з графічної залежності знаходимо комплекс $D_w \rho (x_{нас} - x_1)$, який є пропорційним до густини масового потоку вологи. Його значення наведено у таблиці залежно від швидкості омивання частинки.

Табл. Залежність комплексу $D_w \rho (x_{нас} - x_1)$ від швидкості v омивання одинарної частинки тепловим агентом

$v, \text{ м/с}$	0,70	1,24	1,76	2,31
$D_w \rho (x_{нас} - x_1) \cdot 10^8, \text{ м}^2/\text{с}$	6,86	8,38	9,21	10,1

Наведені на рис. 3 залежності вказують на зростання швидкості масоперенесення всередині твердої частинки зі збільшенням швидкості обтікання частинки тепловим агентом. Це пояснюється тим, що при збільшенні швидкості теплового агента зростає коефіцієнт тепловіддачі α [9]. Умови теплообміну на границі тепловий агент – тверда частинка відповідають граничній умові третього роду, згідно з якою

$$-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=R} = \alpha \cdot (t_1 - T_r)$$

Це означає, що частинка швидше прогривається і на масоперенесення накладається температурний фактор, у першу чергу на коефіцієнт внутрішньої дифузії і на тиск насиченої пари на границі рідина – газопарова суміш.

Для підтвердження сказаного проводився наступний експеримент. В центр кулястої частинки вугілля поміщалась термopара і проводились заміри зміни температури частинки під час її сушіння за тих самих, що і в попередньому експерименті швидкостей омивання твердої частинки тепловим агентом (рис. 4).

Аналіз рис. 4 показує, що зростання швидкості омивання частинки від $v = 0,70 \text{ м/с}$ до $v = 1,24 \text{ м/с}$ (приблизно у 1,8 раз) призводить до скорочення часу її прогрівання з $\tau = 1140 \text{ с}$ до $\tau = 780 \text{ с}$ (приблизно в 1,5 рази), однак подальше збільшення швидкості до $v = 2,31 \text{ м/с}$ (приблизно у 3,3 рази) призводить до скорочення часу до $\tau = 390 \text{ с}$ (приблизно в 2,9 рази). Як бачимо, інтенсивність нагрівання з ростом швидкості зростає нелінійно, що пояснюється обмеженням швидкості відведення теплоти в середину частинки шляхом теплопровідності.

Очевидно, що максимальний потік вологи для умов проведення процесу сушіння можливий при значеннях температури всередині частинки, що відповідають температурі теплового агента $\bar{T} = t_1$, а коефіцієнт дифузії у порах відповідає коефіцієнту дифузії вологи у вільному об'ємі при цій же температурі.

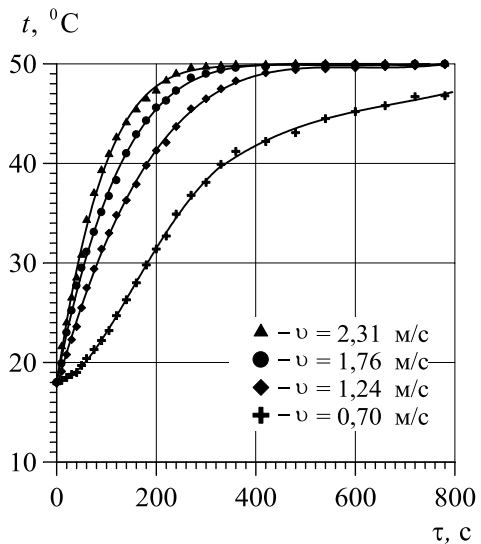


Рис. 4. Залежність зміни температури в центрі вологої частинки в часі від швидкості омивання зовнішньої поверхні тепловим агентом.

За цих умов максимальна густина масового потоку вологи може бути оцінена

$$j_{w \max} \sim D_w^* \rho^* (x_{\text{нас}}^* - x_1) \quad (11)$$

Дійсні значення j_w оцінюються виразом

$$j_w \sim D_w \rho (x_{\text{нас}} - x_1) \quad (12)$$

Відношення (12) до (11) характеризує ступінь досягнення максимуму потоку (ступінь досконалості процесу):

$$\eta = \frac{j_w}{j_{w \max}} = \frac{D_w \rho (x_{\text{нас}} - x_1)}{D_w^* \rho^* (x_{\text{нас}}^* - x_1)} \quad (13)$$

причому $0 < \eta \leq 1$.

Як впливає із експериментальних досліджень, на параметр η впливає зовнішня гідродинаміка, тому величину η оцінювали в залежності від числа Рейнольдса:

$$\eta = 2,7 \cdot 10^{-2} \text{Re}^{0,32} \quad (14)$$

Висновки

1. Аналітично описано внутрішньодифузійний процес сушіння, який базується на наявності границі розділу фаз вода – водяна пара.
2. Експериментально досліджено зміну температурного поля вологої частинки вугілля

у залежності від числа Рейнольдса, що оцінює зовнішню гідродинаміку.

3. Визначено ступінь досягнення максимуму потоку вологи η та подано його залежність від числа Рейнольдса.

ЛІТЕРАТУРА

1. Фролов В.Ф. Макрокинетический анализ сушки дисперсных материалов. Труды второй международной научно-практической конференции “Современные энергосберегающие технологии (Сушка и тепловые процессы) СЭТТ–2002” Москва–2002. –Т. 2, –С. 7 – 17.
2. Білей П.В. Теоретичні основи теплової обробки і сушіння деревини. –Коломия: Вік, 2005. – 364с.
3. Никитенко Н.И., Снежкин Ю.Ф., Сорокова Н.Н. Кинетика и динамика теплопереноса при сушке слоя диспергированного коллоидного капиллярно-пористого материала // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. Одеса: 2006. Вип. 28. – Т.2 – С.140–146.
4. Романков П.Г., Фролов В.Ф. Массообменные процессы химической технологии (системы с дисперсной твердой фазой). –Л.: Химия, 1990. – 384 с.
5. Аксельруд Г.А. Массообмен в системе твердое тело – жидкость. –Львов: Издательство Львовского университета, 1970. –186 с.
6. Хейфец Л.И., Неймарк А.В. Многофазные процессы в пористых средах. –М.: Химия, 1982. –320 с.
7. Лыков А.В. Теплообмен. Справочник. – М.: Энергия, 1971. –560 с.
8. Касаточкин В.И., Ларина Н.К. Строение и свойства природных углей. –М.: Недра, 1975. –159 с.
9. Атаманюк В.М. Зовнішній теплообмін під час фільтраційного сушіння // Промышленная теплотехника. –К.: –2006, –Т. 28, –№5. – С.47–54.

Отримано 18.06.2007 р