

Кінетика теплообміну під час капсулювання мінеральних гранул суспензією курячого посліду в апараті киплячого шару

Р. О. Острога¹⁾, М. П. Юхименко²⁾, С. М. Яхненко³⁾, Джаваїд Аділ⁴⁾

^{1), 2)} Сумський державний університет, вул. Римського-Корсакова, 2, Суми, Україна, 40007

Article info:

Paper received:

11 March 2015

The final version of the paper received:

04 May 2015

Paper accepted online:

05 November 2015

Correspondent Author's Address:

¹⁾ ruslan-ostroga@yandex.ru

²⁾ yunp@ukr.net

Роботу присвячено теоретичним та експериментальним дослідженням процесу покриття гранул мінеральних добрив органічною суспензією у вигляді рідкого курячого посліду. Зазначено перспективність використання як матеріалу капсульної оболонки суспензії курячого посліду, внаслідок чого запобігається його потрапляння в необробленому вигляді в навколишнє середовище, а завдяки органічному походженню – не забруднюються ґрунт та довкілля. Викладено методику дослідження теплообміну процесу капсулювання. На підставі одержаних експериментальних значень проведено розрахунок коефіцієнта тепловіддачі від теплового агента (повітря) до поверхні твердих частинок під час випаровування суспензії. Експериментально і теоретично досліджено кінетику теплообміну під час покриття мінеральних гранул суспензією курячого посліду та визначено умови конвективного теплообміну в киплячому шарі. Одержано критеріальне рівняння для визначення коефіцієнта тепловіддачі від теплового агента до поверхні частинок під час випаровування органічної суспензії.

Ключові слова: капсулювання, апарат киплячого шару, суспензія, коефіцієнт тепловіддачі, кінетика теплообміну.

1. ВСТУП

Відходи тваринного походження мають вигляд дуже зволжених суспензій [1]. Органічна суспензія містить багато колоїдних частинок, які створюють в'язку структуру. Для мінімізації витрат найбільш оптимальною технологією нанесення органічних оболонок є капсулювання в апаратах киплячого шару.

Особливістю використання як капсульної оболонки курячого посліду є нанесення на поверхню мінеральної гранули не розчину, як це відбувається під час гранулювання мінеральних добрив, а суспензії. У такому разі механізм укрупнення гранул неоднозначний і істотно залежить від специфіки використовуваної суміші та температурного режиму процесу капсулювання.

Теплообмінний процес під час капсулювання в апаратах киплячого шару відрізняється від сушіння тим, що на поверхню зважених гранул постійно подається суміш рідини та дрібних (10–20 мкм) органічних частинок. Інтенсивність теплообміну функціонально залежить від швидкості й температури повітря, розмірів частинок та їх фізико-хімічних властивостей.

2. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД І ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Перша спроба аналізу контакту гранул з краплями розчину належить В. Ф. Волкову. Він розраховував процес випаровування плівки розчину, що

повністю охоплює гранулу, за умови суміщеного підведення тепла – конвекцією від псевдозріджувального агента до поверхні гранули й теплопровідністю крізь її товщу шляхом розв'язання спрощеної задачі теплообміну сфери із середовищем сталої температури. Одержаний результат має вигляд критеріальної залежності [2]:

$$Nu_{ЕФ} = A \cdot \frac{2 \cdot \lambda_T}{\lambda_r} \cdot \frac{T_R - T_{R+\Delta}}{T_{ПШ} - T_{R+\Delta}} \cdot Bi + B \cdot Nu_{Несм}, \quad (1)$$

де λ_T , λ_r – теплопровідність твердого матеріалу та газу відповідно; T_R , $T_{R+\Delta}$, $T_{ПШ}$ – температура поверхні гранули, плівки та шару відповідно; $Nu_{ЕФ}$, $Nu_{Несм}$ – значення критерію Нуссельта: ефективне та розраховане за рівнянням Нестеренка; Bi – критерій Біо; A , B – емпіричні константи.

У разі, якщо теплопровідністю всередині частинок знехтувати не можна, процес теплоперенесення в об'ємі твердої кулястої частинки за умови, коли частки містять певну кількість вологи, запишеться у вигляді системи [3]:

$$\begin{cases} \frac{\partial t}{\partial \tau} = a_r \cdot \left[\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \right] + \frac{\varepsilon^* \cdot r_c}{c_r} \cdot \frac{\partial U}{\partial \tau} \\ \frac{\partial U}{\partial \tau} = k \cdot \left[\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial U}{\partial r} \right] + k \cdot \sigma^* \cdot \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \right), \quad (2) \end{cases}$$

де t – поточна температура частинки, $^{\circ}\text{C}$; U – вологовміст матеріалу; τ – час, с ; aT – коефіцієнт теплопровідності твердої частинки, $\text{м}^2/\text{с}$; r – поточний радіус частинки, м ; ε^* – критерій фазового перетворення; r_c – питома теплота випаровування, $\text{Дж}/\text{кг}$; c_T – питома теплоємність твердої частинки, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$; k – коефіцієнт потенціалопровідності; σ^* – термоградієнтний коефіцієнт перенесення вологи.

Кінетика процесу сушіння твердих сферичних частинок, що описується системою диференціальних рівнянь (2), є сполученою задачею тепломасопереносу. Під час грануляції рідка фаза наноситься на поверхню гранул тонкою плівкою. Маючи достатню інтенсивність процесу сушіння, припускаємо, що випаровування вологи відбувається з поверхневого шару гранул, а отже, критерій фазового перетворення, градієнт вологовмісту і зміна вологовмісту в часі всередині гранули близькі до нуля.

Таким чином, диференціальне рівняння масоперенесення всередині гранули втрачає сенс, а диференціальне рівняння теплоперенесення, ускладнене фазовим переходом, за умови, що критерій фазового перетворення прямує до нуля, перетворюється в диференціальне рівняння нестационарної теплопровідності [3]. Для розв'язання останнього необхідно визначити значення встановлених констант, що, у свою чергу, залежать від величини критерію Bi :

$$Bi = \frac{\alpha \cdot R}{\lambda_T}, \quad (3)$$

де α – поверхневий коефіцієнт тепловіддачі, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{K})$; R – радіус частинки, м ; λ_T – коефіцієнт теплопровідності, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{K})$.

Для визначення величини коефіцієнта тепловіддачі α необхідно встановити явний вигляд функції $Nu = f(Re, Pr)$.

3. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОБМІННОГО ПРОЦЕСУ ПІД ЧАС КАПСУЛЮВАННЯ У КИПЛЯЧОМУ ШАРІ

Дослідження теплообміну процесу капсулювання мінеральних гранул суспензією курячого посліду проводилися на спеціально створеній лабораторній установці (рис. 1), основним апаратом якої є апарат киплячого шару.

Як вихідний продукт використовувалося гранульоване мінеральне добриво – карбамід. Вимірювання температури в зернистому шарі здійснювалося за допомогою самописного потенціометра типу КСП-4 (точність вимірювання $\pm 0,5$ $^{\circ}\text{C}$). Датчики терморпар виконані у вигляді термометричних трубок діаметром 2 мм і довжиною 60 мм, на кінцях яких знаходиться спай із хромелевого та копелевого дротів діаметром 0,1 мм. Теплоємність цієї терморпари дуже мала, що дозволяє проводити вимірювання за ум змінних температур упродовж досліду. В кожному досліді також вимірювалися початкова та кінцева температури сушильного агента.

Оскільки в експериментальних умовах цієї роботи критерій Біо знаходиться в межах $0,15 < Bi < 0,3$ і згідно з рекомендаціями [4] задачу теплоперенесен-

ня потрібно вважати зовнішньою, тобто коли температура частинки за об'ємом однакова і весь термічний опір зосереджений з зовні частинки.

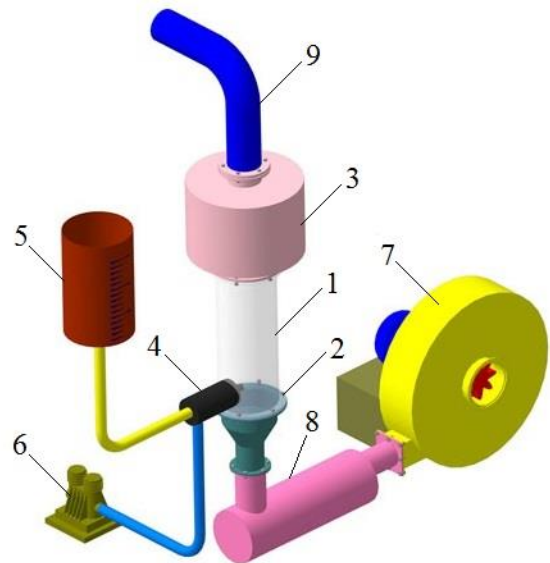


Рис. 1. Схема експериментальної установки для капсулювання мінеральних гранул: 1 – продуктова камера; 2 – газорозподільна решітка; 3 – кришка апарата; 4 – пневматична форсунка; 5 – мірний бачок; 6 – компресор; 7 – газодувка; 8 – калорифер; 9 – гофра

На підставі одержаних експериментальних значень проводили розрахунок коефіцієнта тепловіддачі α від теплового агента до поверхні частинки під час випаровування суспензії за рівнянням тепловіддачі:

$$\alpha = \frac{Q}{F \cdot (t_H - t_T)}, \quad (4)$$

де Q – теплота, що передається через поверхню теплообміну, Вт ; F – поверхня теплообміну, м^2 ; t_H – температура навколишнього середовища, $^{\circ}\text{C}$; t_T – температура поверхні твердих частинки, $^{\circ}\text{C}$.

Кількість теплоти Q , що залишається в шарі матеріалу, визначається за рівнянням:

$$Q = G_{II} \cdot c_{II} \cdot (t_{II1} - t_{II2}), \quad (5)$$

де G_{II} – масова витрата повітря, $\text{кг}/\text{с}$; c_{II} – теплоємність повітря, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$; t_{II1} – температура повітря під газорозподільною решіткою, $^{\circ}\text{C}$; t_{II2} – температура повітря на виході з робочої зони апарата, $^{\circ}\text{C}$.

Складну для визначення величину поверхні теплообміну гранул визначали як питому поверхню частинки, що припадає на масу шару:

$$F = \frac{6}{\rho_{ГР} \cdot D}, \quad (6)$$

де $\rho_{ГР}$ – щільність гранул, $\text{кг}/\text{м}^3$; D – середньозважений діаметр частинки, м .

Згідно з вищевикладеним та враховуючи, що температура шару вимірювалася відкритими спаями

термопар, що фіксували проміжне значення між температурами твердих частинок і сушильного агента, розраховані значення коефіцієнтів тепловіддачі є не істинними, а «ефективними». Дослідні дані подавали у вигляді рівняння конвективного теплообміну:

$$Nu = A \cdot Re^n \cdot Pr^m. \quad (7)$$

Оскільки абсолютні значення швидкостей твердих частинок малі порівняно зі швидкістю сушильного агента, а співвідношення між швидкістю газового потоку у вільному перерізі апарата й швидкістю потоку в шарі між частинками змінюється як за перетином, так і за висотою шару, й сильно залежить від гідродинамічного режиму зважування твердої фази, то під час визначення критерію Рейнольдса враховували усереднену швидкість сушильного агента. Для вимірювання швидкості повітря застосовувався крильчастий механічний анемометр АСО-3 (точність вимірювання $\pm 0,1$ м/с), що встановлювався у вільному перерізі під газорозподільною решіткою апарата.

Для розрахунку температури суспензії на поверхні частинок одержана така залежність:

$$t_c = \frac{G_{II} \cdot c_{II} \cdot (t_{II1} - t_{II2}) - G_{аунс} \cdot r}{G_c \cdot c_c} + t_{c0}. \quad (8)$$

Якщо припустити, що температура поверхні твердих частинок t_{II} дорівнює температурі суспензії на їх поверхні t_c , то маємо змогу побудувати залежність усередненого коефіцієнта тепловіддачі a від дійсної швидкості псевдозріджувального повітря w (рис. 2).

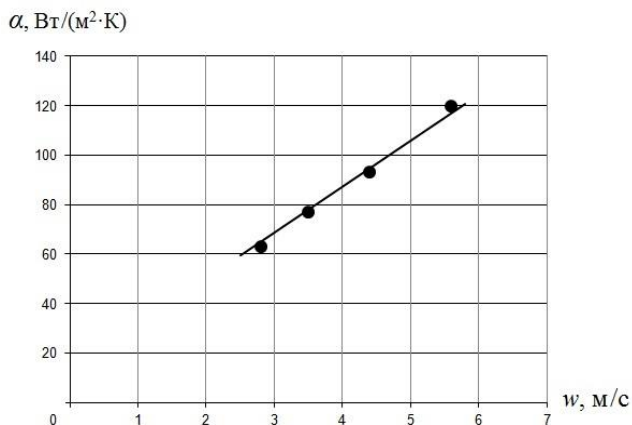


Рис. 2. Залежність коефіцієнта тепловіддачі від швидкості псевдозріджувального повітря під час покриття гранул карбаміду суспензією курячого посліду

Kinetics of heat exchange with the capsulation of mineral granules suspension of chicken manure in a fluidized bed apparatus

R. O. Ostroha¹⁾, M. P. Yukhymenko²⁾, S. M. Yahnenko³⁾, Adeel Javid⁴⁾

^{1), 2)} Sumy State University, 2, Rimsky Korsakov Str., 40007, Sumy, Ukraine

The purpose of this work is to study the basic laws of heat exchange process of capsulated organic substance of mineral fertilizer of prolonged action. This paper is devoted to theoretical and experimental researches of process of mineral fertilizer granules covering with organic suspension in the form of liquid

У нашому випадку, оскільки фізичні параметри повітря змінюються у вузькому діапазоні, коефіцієнт $m = 0,33$.

Невідомі коефіцієнти «A» та «n» визначаємо шляхом подання експериментальних значень у системі координат із логарифмічним масштабом шкал (рис. 3).

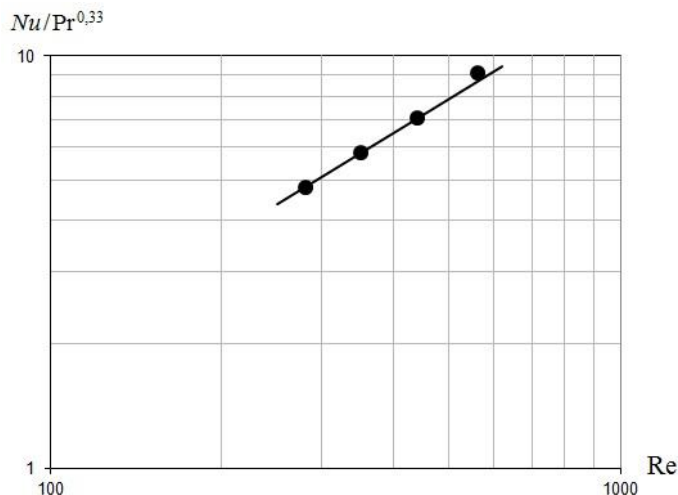


Рис. 3. Залежність $\frac{Nu}{Pr^{0.33}} = f(Re)$

Підставивши значення визначених коефіцієнтів у рівняння (7), одержимо:

$$Nu = 0,04 \cdot Re^{0,85} \cdot Pr^{0,33}. \quad (9)$$

ВИСНОВОК

За допомогою одержаного критеріального рівняння для визначення коефіцієнта тепловіддачі від теплового агента до поверхні частинок під час випаровування органічної суспензії маємо можливість прогнозувати умови конвективного теплообміну в киплячому шарі та встановити характерні температурні режими процесу капсулювання мінеральних гранул суспензією курячого посліду.

poultry manure. Working temperature range was detected, when solid competent layer of dry poultry manure was formed on particle surface, that promoted complete organic encapsulation of mineral granules. Particles aggregation kinetics in fluidized bed was investigated. Thereby it was found that granules enlargement by organic substance with working conditions was characterized by proportional and surface (normal) growth – without formation of new granulation organic centers. It allowed to enlarge all granules to market size. The prospects of using capsule shell as a material of chicken manure suspension is shown, which prevents it from entering the raw form into the environment, and due to the organic origin of material is not contaminated soil. Detailed methodology of heat exchange research in the capsulation mineral granules of organic suspension is presented. Based on these experimental values carried out calculation of convective heat transfer coefficient of thermal agent (air) to the surface of the solid particles in the evaporation of the suspension. Experimentally and theoretically studied the kinetics of heat exchange during the coating of mineral granules suspension of chicken manure and the terms of convective heat transfer in fluidized bed. The resulting research, the criterial dependence makes it possible to predict heat transfer coefficient for the process of coating urea granules of chicken manure suspension. Mathematic model of process of mineral fertilizer granules covering with organic suspension was developed. Theoretic calculations were confirmed by results of experimental researches (inaccuracy did not exceed 8,4 %); it means that this mathematic model can be used for calculation of investigated process. Engineering analysis methods of encapsulation process were developed on the basis of received theoretical dependencies.

Key words: capsulation, fluidized bed apparatus, suspension, heat transfer coefficient, heat transfer kinetics.

Кинетика теплообмена при капсулировании минеральных гранул суспензией куриного помета в аппарате кипящего слоя

Р. А. Острога¹⁾, Н. П. Юхименко²⁾, С. М. Яхненко³⁾, Джаваид Адил⁴⁾

1), 2), 3), 4) Сумский государственный университет, ул. Римского-Корсакова, 2, Сумы, Украина, 40007

Работа посвящена теоретическим и экспериментальным исследованиям процесса покрытия гранул минеральных удобрений органической взвесью в виде жидкого куриного помета. Указано перспективность использования в качестве материала капсульной оболочки суспензии куриного помета, в результате чего предотвращается его попадания в необработанном виде в окружающую среду, а благодаря органическому происхождению – не загрязняется почва и окружающей среды. Изложена методика исследования теплообмена процесса капсулирования. На основании полученных экспериментальных значений проведен расчет коэффициента теплоотдачи от теплового агента (воздуха) к поверхности твердых частиц при испарении суспензии. Экспериментально и теоретически исследована кинетика теплообмена при покрытии минеральных гранул суспензией куриного помета и определены условия конвективного теплообмена в кипящем слое. Получены критериальные уравнения для определения коэффициента теплоотдачи от теплового агента к поверхности частиц при испарении органической суспензии.

Ключевые слова: капсулирование, аппарат кипящего слоя, суспензия, коэффициент теплоотдачи, кинетика теплообмена.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Мартиненко В. М. Органічні добрива в землеробстві Сумщини / В. М. Мартиненко, В. В. Голоха, В. П. Іванов. – Суми: Мрія, 2006. – 23 с.
2. Волков В. Ф. Тепломассоперенос при грануляции и сушке растворов в псевдооживленном слое / В. Ф. Волков, И. И. Шишко, Л. В. Хохлова // В сб.: Тепло- и массоперенос. – 1968. – Т. 5. – С. 248–251.
3. Апарати завислого шару. Теоретичні основи і розрахунок / [М. П. Юхименко, С. В. Вакал, М. П. Кононенко, А. П. Філонов]. – Суми: Собор, 2003. – 304 с.
4. Юхименко Н. П. Межфазный теплообмен и разграничение стадий теплопереноса при охлаждении зернистых материалов во взвешенном слое / Н. П. Юхименко // Вісник Сумського державного університету. Серія: Технічні науки. – 2007. – № 2. – С. 52–56.

REFERENCES

1. Martynenko V. M., Holoha V. V., Ivanov V. P. (2006). Orhanichni dobryva v zemlerobstvi Sumschyni. Sumy. Mriya. 23 p. [in Ukrainian].
2. Volkov V. F., Shishko I. I., Khokhlova L. V. (1968). Teplo- i massopereenos. Vol. 5, Pp. 248–251 [in Russian].
3. Yukhymenko M. P., Vakal S. V., Kononenko M. P., Filonov A. P. (2003). Aparaty zavisloho sharu. Teoretychni osnovy i rozrahunok. Sumy. Sobor. 304 p. [in Ukrainian].
4. Yukhymenko M. P. (2007). Visnik Sumskohoho derzhavnoho universitetu. Vol. 2. Pp. 52–56 [in Russian].