

## МОДЕЛЬ ЗНЕВОДНЕННЯ СФЕРИЧНОЇ ГРАНУЛИ У ВИРОБНИЦТВІ ГУМІНОВО-МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРИВ

© Корінчук Д.М., Гевліч К.О., Воронін Л.Г., 2010

**Розроблена спрощена модель зневоднення плівки водного розчину на поверхні  
одиночної гранули під час гранулювання гуміново-мінеральних композитних добрив у  
псевдозрідженому шарі.**

**The simplified model of process of drying a water solution film on a surface of an  
individual granule is developed at graining gumin-mineral composit fertilizers in fluidized bed.**

**Вступ.** На сучасному етапі розвитку людства одним з основних вимог стає ресурсозберігаюче ставлення до природи. Сучасний екологічний стан в Україні зумовлює необхідність розроблення дієвих заходів щодо зниження шкідливих викидів, створення екологічно ощадних і безвідходних технологій, економії ресурсів.

Перероблення рідких стоків виробництва капролактаму та гумінових речовин вирішує проблеми утилізації відходів та виробництва добрив, застосування яких дає можливість збільшити врожайність і поліпшити якість продукції сільського господарства. Розробки та дослідження відповідної технології є особливо актуальними з огляду на те, що саме хімічний та сільськогосподарський комплекси є основними галузями народного господарства України.

За сучасних світових тенденцій до зростання споживання продукції різних галузей промисловості та екологічній ситуації актуальною є проблема раціонального використання в промисловому виробництві енергетичних та сировинних ресурсів з метою одержання максимальної кількості готового продукту заданої якості. Важливим етапом виконання цього завдання є створення адекватної математичної моделі процесу.

**Огляд існуючих моделей зневоднення сферичної гранули.** Моделювання зневоднення гранули передбачає аналіз розподілу тепла в матеріалі сферичної форми та в плівці рідини (теплообмін), що вкриває сферу, і випаровування плівки суміші (масообмін), що відбуваються одночасно.

Модель сушіння одиночної гранули в загальному випадку [1] пов'язана з розв'язанням доволі складної задачі руху двофазної газорідної суміші за наявності фазового переходу та одночасного переносу тепла в трифазній системі. Ця задача істотно нелінійна і тим більше ускладнюється необхідністю врахування кінетики фазового перетворення та міжфазового теплообміну, капілярних явищ, що спричиняють перетікання рідини в порах, а також явищ десорбції або переходу хімічно зв'язаної рідини у вільний стан. Існують намагання описання цього процесу в [2]. Однак ці моделі також містять велику кількість невідомих величин, що входять в нелінійне диференціальне рівняння, розв'язання яких можуть бути отримані лише в частинному випадку та мають громіздкий вигляд, що ускладнює їх практичне застосування.

Існують спрощені моделі, що враховують основні особливості гранулювання та дозволяють отримати результати, достатні для практичного застосування.

Моделі температурного розподілу під час гранулювання у псевдозрідженому шарі наведені в [3]. Автори припускають, що в перетині, де гранула перебуває у витаючому стані, температура постійна та приймають температуру на поверхні гранули постійною протягом усього процесу нагрівання. За цієї моделі визначають радіальний розподіл температури в будь-який момент часу. Але питання кінетики зневоднення залишається не вирішеним.

Для дослідження випаровування плівки рідини можна використати досвід моделювання випаровування і сушіння одиночних крапель. Це питання широко висвітлили автори [4], які

наводять моделі сушіння крапель на основі балансових рівнянь та рішень диференціальних рівнянь дифузії та теплопровідності.

У моделі сушіння сферичної частинки [5] допускається, що випаровування рідини відбувається переважно у вузькій зоні, що поширюється по мірі сушіння в глибину матеріалу.

Враховуючи в нашому випадку наявність процесів випаровування та кипіння, розв'язання задачі тепломасообміну на границі рідкої та газової фази в поєднанні з розв'язанням задачі нагрівання гранули та плівки рідини робить можливим визначення часу зневоднення та опис кінетики процесу.

### Модель зневоднення сферичної гранули у виробництві гуміново-мінеральних добрив.

Розглянемо зневоднення плівки водного розчину на поверхні одиначної гранули під час гранулювання гуміново-мінеральних композитів у псевдозрідженому шарі. Припустимо, що гранула має сферичну форму радіусом  $R_1$  і в початковий момент часу  $\tau_0$  нагріта до температури  $T_1$ ; гранула рівномірно вкрита шаром плівки товщиною  $\delta$  з температурою  $T_2$ ; температура навколишнього середовища постійна протягом усього часу зневоднення і становить  $T_3$ , рис. 1, а.

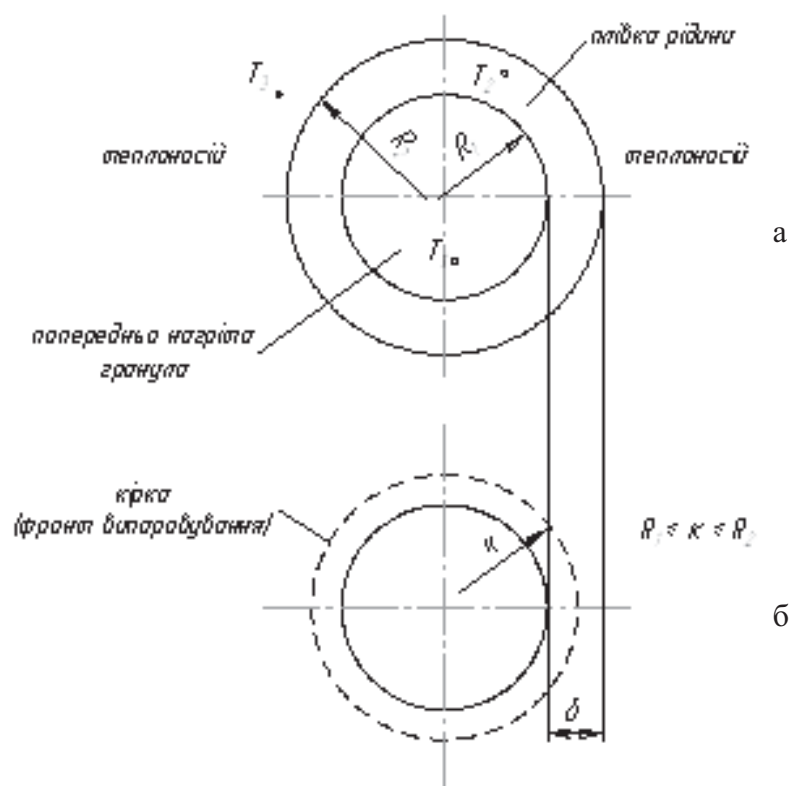


Рис. 1. Схема фізичної моделі зневоднення гранули:  
а – початковий момент часу; б – поточний момент часу

Вважаємо гранулу монолітним твердим тілом однакового складу по всьому об'ємі. Температура в будь-якій точці гранули є функцією часу  $\tau$  і радіуса  $r$ .

Рідина нагрівається та випаровується за рахунок теплоти, отриманої від попередньо нагрітої гранули та від теплоносія. У початковий момент температура гранули на межі  $R_1$  тверда фаза-рідина нижча за температуру теплоносія на межі  $R_2$  рідина-газ та знижується під час теплообміну. Тому для спрощення задачі тепломасообміном між гранулою та розчином можна знехтувати. Вважаємо, що підведення тепла здійснюється рівномірно по всій поверхні від навколишнього середовища.

У роботі [37] зазначено, що зона випару рухається в напрямку центра гранули, утворюючи зневоднену кірку. У нашому випадку вважаємо кірку паропроnikною, що не впливає на масообмін.

За аналогією з процесами, що пов'язані з рухом межі розділу фаз, можна припустити, що випаровується рідина переважно у вузькій зоні, яка розділяє ділянки, зайняті парою (кірка) та розчином. Ширина зони випару визначається характерним розміром пор кірки, капілярними силами, а також співвідношенням між теплом, що витрачається на нагрівання розчину, та теплом, що витрачається на випаровування. За зазначених вище умов ширина зони випару є значно меншою від характерного розміру гранули. Отже, цю зону можна замінити фронтом випаровування, а її товщиною знехтувати.

Вважаємо, що випар відбувається в межах товщини  $\delta$ , рис. 1, б. Під час заглиблення фронту випаровування існує дві області: суха (кірка) та волога (розчин). У сухій ділянці переміщується тільки пара, а вологість дорівнює нулю. А в вологій концентрація розчину залишається незмінною і дорівнює початковій.

З врахуванням зроблених припущень математична модель зневоднення плівки водного розчину на поверхні одиничної гранули формулюється так.

Розподіл температури в межах гранули та плівки описується рівнянням:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad (1)$$

з початковими умовами:

$$T|_{\tau=0} = T_1 \quad \text{при} \quad 0 \leq r \leq R_1, \quad (2)$$

$$T|_{\tau=0} = T_2 \quad \text{при} \quad R_1 \leq r \leq R_2. \quad (2)$$

з граничними умовами:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, \quad (4)$$

$$T|_{r=R_1-\varepsilon} = T|_{r=R_1+\varepsilon}, \quad (5)$$

$$\lambda_1 \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R_1} = \lambda_2 \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R_1}, \quad (6)$$

$$\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=\kappa} = a(T - T_3). \quad (7)$$

Рівняння балансу теплоти і вологи в межах фронту випаровування:

$$4\pi\kappa^2 \alpha_2 \Delta T = 4\pi\kappa^2 \frac{d\kappa}{d\tau} \rho(1-c)L, \quad (8)$$

$$R_1 \leq \kappa \leq R_2. \quad (9)$$

Систему рівнянь розв'язують за методом кінцевих різниць за явною схемою в програмному пакеті Delphi. Температура в точці, передуючій точці фронту випаровування, при русі фронту визначається інтерполяцією за неявною схемою. Результати вирішення математичної моделі для гранули діаметром 3 мм, попередньо нагрітої до температури 90 °С, для температури розчину та теплоносія 20 та 100 °С відповідно наведені на діаграмі, рис. 2.

Розрахунковий час сушіння становить 2,15 с, що збігається з результатами досліджень кафедри МХНВ НТУУ «КПІ».

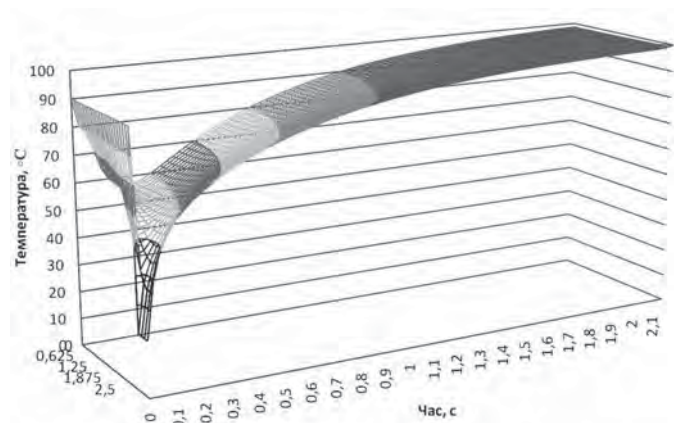


Рис. 2. Результати розв'язання математичної моделі

**Висновки.** Розроблена спрощена модель процесу зневоднення плівки водного розчину на поверхні одиначної гранули під час гранулювання гуміново-мінеральних композитів у псевдозрідженому шарі. Ця модель дає змогу з достатньою для інженерних розрахунків точністю визначити час зневоднення гранули, тобто нарощування одного шару в багат шаровій структурі композитів.

Результати можуть бути застосовані на стадіях проектування та відпрацювання режиму роботи гранулятора.

#### Перелік позначень

$\tau$  – час, с;  $T$  – температура, К;  
 $a$  – коефіцієнт температуропровідності,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  
 $r$  – поточний радіус, м;  
 $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності,  $\text{Дж}/\text{м}\cdot\text{с}\cdot\text{К}$ ;  
 $\varepsilon$  – нескінченно мала величина;  
 $\alpha$  – коефіцієнт теплопередачі,  $\text{Дж}/\text{кг}\cdot\text{м}^2$ ;  
 $\rho$  – густина води,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  
 $c$  – масова концентрація розчину,  $\text{кг}/\text{кг}$ ;  
 $L$  – питома теплота пароутворення,  $\text{Дж}/\text{кг}$ ;  
 $\kappa$  – радіус фронту випаровування, м.  
Індекси:  
1 – для гранули;  
2 – для плівки розчину;  
3 – для теплоносія.

1. Бабенко В.Е., Буевич Ю.А., Шепчук Н.М. Квазистационарный режим сушки сферической частицы // Теоретические основы химической технологии. – М.: Наука, 1975. – Т 9, № 2. – С. 274–277.
2. Новиков А.Н., Корниенко Б.Я. Исследование математической модели процесса гранулирования в псевдооживленном слое // Наукові вісті Нац. техн. університету України “Київський політехнічний інститут”. – К., 1999. – № 2 (6). – С. 136–139.
3. Склабінський В.І., Кочергін М.О. Створення гранул пористої структури аміачної селітри. вплив температури навколишнього середовища Хімічна промисловість України. – 2007. – № 3. – С. 22–24.
4. Долинський А.А., Малецькая К.Д., Шморгун В.В. Кинетика и технология сушки распылением. – К.:Наук. думка, 1987. – 224 с.
5. Коринчук Д.Н. Модель высокотемпературной сушки торфяных частиц и ее экспериментальное подтверждение // СЭТТ-2005. – М.: МЭИ, 2005. – Т. 2. – С. 225–229.