

**МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВИДАЛЕННЯ ВОЛОГИ ІЗ ГРАНУЛИ
З МЕТОЮ УТВОРЕННЯ ПОРИСТОЇ СТРУКТУРИ**

М.О. Кочергін, В.І. Склабінський
Сумський державний університет, м. Суми

Упровадження в промисловість пристроїв з виробництва різних продуктів у вигляді гранул пористої структури стримується через відсутність математичного опису процесу утворення пор, що призводить до невизначеності при розробці умов проведення процесу гранулоутворення, термодинамічних і гідродинамічних параметрів устаткування.

Різними дослідниками проводилися спроби на основі експериментальних даних одержати математичні вираження, які дозволяли б робити необхідні розрахунки. Але отримані емпіричні формули не розкривають фізичної картини процесів, які проходять у гранулі й мають обмежені області застосування [1].

Останнім часом з'явилися способи одержання пористих гранул зі звичайного гранульованого продукту [2,3,4,5]. Процеси проходять у вихровому потоці газу, що значно інтенсифікує тепло- й масообмінні процеси. З іншого боку, наявність такої складної взаємодії розвиненого тривимірного газового потоку із гранульованим продуктом приводить до необхідності додаткового як теоретичного, так і експериментального вивчення таких фізичних явищ:

- руху вихрового газового потоку в робочій камері вихрового гранулятора, що має форму, відмінну від циліндричної [2,3];
- взаємодії гранул з вихровим потоком газу, опис їхнього руху при зміні маси гранул під час утворення пористості;
- вплив термодинамічних характеристик потоку газу на процеси, які проходять у гранулі й приводять до утворення пор;
- вплив фізико-хімічного складу гранул, їхнього вологовмісту на механізм пороутворення й ін.

З метою опису взаємодії термодинамічних параметрів потоку газу на зволожену гранулу була розроблена фізична модель, в основу якої покладені такі припущення:

- температура на поверхні гранули постійна;
 - волога, що всередині гранули, переходить у пароподібний стан при повідомленні елементарному об'єму dV , який перебуває всередині гранули і має масу dm , кількість тепла $dQ_k = i dW$ (де i - питома теплота паротворення, W - маса вологи в елементарному обсязі dV). При цьому до виділеної маси вологи вже підведене тепло кількістю $dQ_k = C(t_k - t_n)dm$ (де C - теплоємність; t_k і t_n - температура кипіння й початкова температура, при якій починається процес обробки гранули);
 - пороутворення починається послідовно від верхнього шару. Фронт пороутворення рухається уздовж радіуса гранули до її центра, являючи собою сферичну поверхню;
 - насичення вологою відбувається за лінійним законом від максимуму в поверхневих шарах гранули до нуля в центрі;
 - парка волога безперешкодно віддаляється із гранули через утворені пори в попередніх шарах речовини, з якого складається гранула.
 - обсяг утворених у гранулі пор дорівнює обсягу вилученої вологи.
- Схема впливу газового потоку на краплю наведена на рис. 1.

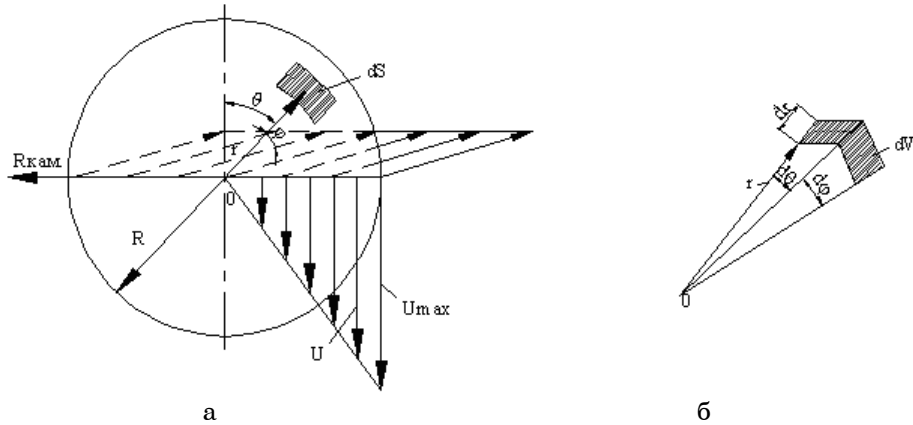


Рисунок 1. Схема впливу газового потоку.
 а) схема розміщення сферичних координат щодо гранули;
 б) до визначення величини елемента dV обсягу всередині гранули

Величина елементарного обсягу всередині гранули дорівнює (рис. 16)

$$dV = dS \cdot dr,$$

де величина dS у сферичній системі координат дорівнює [6]

$$dS = r^2 \sin \theta d\theta d\phi.$$

Тоді $dV = r^2 \sin \theta d\theta d\phi dr$, маса речовини, що перебуває в обсязі dV , дорівнює

$$dm = \rho r^2 \sin \theta d\theta d\phi dr,$$

а кількість тепла, який необхідно підвести до маси речовини dm , дорівнює

$$dQ = dQ_H + dQ_K = c(t_K - t_H)dm + rdm = \rho [c(t_K - t_H) + ui] r^2 \sin \theta d\theta d\phi dr, \quad (1)$$

де i – питома теплота пароутворення.

Таким чином, можна визначити загальну кількість тепла, яке необхідно передати гранулі шляхом інтегрування рівняння (1).

$$Q = 2\rho [c(t_K - t_H) + ui] \int_0^R \int_0^\pi \int_0^\pi r^2 \sin \theta d\theta d\phi dr. \quad (2)$$

Якщо теплоємність залежить від вологості матеріалу гранули, тоді в рівнянні (2) необхідно враховувати $C = f(r)$ й $\rho = f(r)$.

Виходячи із припущення про лінійний закон зміни вологості гранули уздовж її радіуса, можна записати

$$U = U_{\max} / R \times r; \quad \rho = \rho_{ГР} - (\rho_{ГР} - \rho_K) r / R,$$

де U і U_{\max} – поточна й максимальна вологість матеріалу гранули на її поверхні; $\rho_K - \rho_{ГР}$ - відповідно щільність матеріалу, насиченого вологою на поверхні, й щільність матеріалу гранули; r – поточне значення радіуса гранули.

Або з урахуванням, що $\rho_K = \frac{\rho_B \rho_{ГР}}{\rho_B + (\rho_{ГР} - \rho_B) U_{\max}}$;

$$\rho = \rho_{ГР} - (\rho_{ГР} - \frac{\rho_B \rho_{ГР}}{\rho_B + (\rho_{ГР} - \rho_B) U_{\max}}) r / R. \quad (5)$$

У свою чергу, теплоємність C є величиною, що також залежить від вологості матеріалу,

$$C = C_{ГР}(1 - U) + C_B U = C_{ГР}(1 - \frac{r U_{\max}}{R}) + \frac{C_B r U_{\max}}{R}, \quad (6)$$

де $C_{ГР}$ - теплоємність матеріалу гранули, C_B - теплоємність води. З огляду на малі розміри гранули можна взяти C_B уздовж радіуса як величину постійну при середній температурі між $t_H - t_K$.

Тоді формула (2) набере вигляду:

$$Q = 2 \int_0^R \int_0^\pi \int_0^\pi [\rho_{ГР} - (\rho_{ГР} - \frac{\rho_B \rho_{ГР}}{\rho_B + (\rho_{ГР} - \rho_B) U_{\max}}) r / R] \times \quad (7)$$

$$\times [(C_{ГР}(1 - r U_{\max} / R) + C_B r U_{\max} / R)(t_K - t_H) + i r U_{\max} / R] r^2 \sin \theta d\theta d\varphi dr.$$

Або, якщо позначити $\Delta t = t_K - t_H$, -

$$Q = 2 \int \int \int [\rho_{ГР} - (\rho_{ГР} - \frac{\rho_B \rho_{ГР}}{\rho_B + (\rho_{ГР} - \rho_B) U_{\max}}) r / R] \times \quad (8)$$

$$\times [\frac{C_{ГР} R - r U_{\max} C_{ГР} + C_B r U_{\max}}{R} \Delta t] + i r U_{\max} / R] r^2 \sin \theta d\theta d\varphi dr.$$

Переписавши у вигляді, зручному для інтегрування, й інтегруючи за φ , θ і r , одержуємо

$$\int_0^\pi \int_0^\pi \int_0^R 2(\rho_{ГР} - (\rho_{ГР} - \rho_B \rho_{ГР} / (\rho_B + (\rho_{ГР} - \rho_B) U_{\max})) r / R) \times$$

$$\times (\frac{C_{ГР} R - r U_{\max} C_{ГР} + C_B r U_{\max}}{R})(t_K - t_H) + i r U_{\max} / R] r^2 \sin(\varphi) dr d\varphi d\theta. \quad (9)$$

де ρ_B й $\rho_{ГР}$ - відповідно щільність води й щільність матеріалу гранули; $C_{ГР}$ і C_B - відповідно теплоємність матеріалу гранули й води при середній температурі; U_{\max} - максимальна вологості на поверхні гранули; $(t_K - t_H)$ - різниця температур між кипінням і початком нагрівання гранули; i - питома теплота пароутворення; R - радіус краплі.

Таким чином, після інтегрування одержуємо таке вираження для визначення кількості тепла $Q_{ГР}$, підведеного до однієї гранули:

$$Q_{ГР} = \frac{1}{15(\rho_B + U_{\max}\rho_{ГР} - U_{\max}\rho_B)} (\rho_{ГР}R^3(3U_{\max}^2\rho_{ГР}C_{ГР}(t_K - t_H) - 3U_{\max}^2\rho_{ГР}(t_K - t_H)C_B - 3U_{\max}^2\rho_{ГР}i - 3U_{\max}^2C_{ГР}(t_K - t_H)\rho_B + 3U_{\max}^2(t_K - t_H)C_B\rho_B + 3U_{\max}^2i\rho_B - 15(t_K - t_H)C_BU_{\max}\rho_B - 15iU_{\max}\rho_B - 5C_{ГР}(t_K - t_H)U_{\max}\rho_{ГР} - 20C_{ГР}(t_K - t_H)\rho_B + 20C_{ГР}(t_K - t_H)U_{\max}\rho_B)\pi). \quad (10)$$

Отримане рівняння (10) дозволяє визначити кількість тепла, необхідного для видалення вологи із гранули з утворенням пористої структури.

Припускаючи, що для всієї маси гранул, що перебувають у робочій області вихрової камери, характерний діаметр $dk = 2R$, можна визначити їхню кількість

$$N = \frac{3M}{4\pi\rho_K R^3}. \quad (11)$$

Тоді загальна кількість тепла, підведеного до всієї маси гранул, що перебувають у робочій області вихрової камери, дорівнює

$$Q_0 = N \cdot Q_{ГР}. \quad (12)$$

Як правило, основним завданням виробництва пористих гранул є забезпечення заданої величини порозності "E".

$$E = (V_{ГР} - V_M) / V_{ГР}, \quad (13)$$

де $V_{ГР}$ й V_M - відповідно обсяги гранули й матеріалу, з якого складається гранула.

Якщо виходити із припущення, що обсяг пор, які утворені вихідними із краплі парами вологи, порівняні з величиною об'єму, що займає волога в краплі при величині волого вмісту, що дорівнює "U", то об'єм матеріалу гранули дорівнює

$$V_M = V_{ГР}(1 - U_0), \quad (14)$$

де U_0 - об'ємна частка вологоємності у гранулі.

Тоді

$$E \approx U_0. \quad (15)$$

І, задаючи значення U_0 , за яким можна визначити вологовміст і, відповідно, із припущення про лінійний закон насичення вологою гранули уздовж радіуса $U_{\max} = 2U_0$ можна використовувати вираження (10) для визначення $Q_{ГР}$.

З іншого боку, диференціальне рівняння теплопровідності у сферичній системі координат при симетричному завданні має вигляд [6]

$$\frac{\partial T(r, \tau)}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r} \right). \quad (16)$$

де T – температура; r – радіус; τ – час; a – коефіцієнт теплопровідності.

Розв'язанням цього рівняння буде таке вираження:

$$T(r, \tau) = \frac{(C_3 e^{(aC_1\tau)} C_1 \sinh(\sqrt{C_1} r)) + (C_3 e^{(aC_1\tau)} \cdot C_2 \cosh(\sqrt{C_1} r))}{r}. \quad (17)$$

Задаючись граничними й початковими умовами, можна одержати при трьох різних значеннях y і відповідних їм значеннях x і z розв'язання системи рівнянь. Вигляд цього розв'язання громіздкий і тому в даній роботі не наводиться.

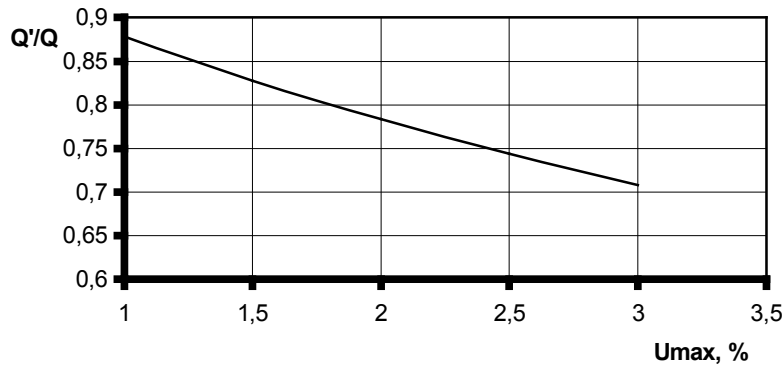


Рисунок 2 – Відносна величина витрати тепла залежно від вологовмісту на поверхні гранули

На рисунку 2 наведено приклад розрахунку залежності витрат тепла, де значення Q' – це кількість тепла, що має підводитися до суцільної гранули за відсутності вологи.

Таким чином, знаючи тривалість нагрівання гранул до необхідної температури (17) і кількості тепла, яке необхідно підвести до оброблюваних гранул (10), (12), можна зробити розрахунок гідродинаміки вихрової робочої камери й калорифера для підігріву повітря.

SUMMARY

In article the developed physical model which describes interaction of thermodynamic parameters of a stream of gas on the humidified granule is described. Thus, it is possible to settle an invoice hydrodynamics of the vortical working chamber and a heater for heating of air.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Олевский В.М. Технология аммиачной селитры. М.: Химия, 1978. - 311 с.
2. Пат. №46560А UA, МКІ В01J2/16. Спосіб гранулювання розплавів, розчинів і суспензій і пристрій для його здійснення / О.В. Парьохін, В.І. Склабінський. – Бюл. №5, 15.05.2002.
3. Пат. №39024А UA, МКІ В01J2/16. Спосіб гранулювання розплавів, розчинів і суспензій і пристрій для його здійснення / О.В. Парьохін, В.І. Склабінський. – Бюл. №4, 15.05.2001.

4. Пат. №69624 UA, МКІ В01J2/16. Спосіб гранулювання розплавів, розчинів і суспензій і пристрій для його здійснення / В.І. Склабінський, В.М. Маренок, М.О. Кочергін. – 2004.
5. Пат. №2232628 RU, МПК В01J2/16. Способ гранулирования жидкого материала и устройство для его осуществления / Калужников В.В., Склабинский В.И., Кочергин А.Н., Модестов В.Б., Кочергин Н.А., Чернышов А.Н. – 2004.
6. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. – 599 с.

Кочергін М.О., аспірант, СумДУ, м. Суми;
Склабінський В.І., доктор тех. наук, професор,
СумДУ, м. Суми

Надійшла до редакції 26 листопада 2007 р.