

DOI: 10.31319/2519-2884.40.2022.18

УДК 664.2.032.1

І.Є. Соколовська, к.т.н., доцент, sokolovskaja7887@gmail.com

Р.О. Клімов, к.т.н., доцент, klroma@ukr.net

А.С. Морозовська, магістр, anyta.baykova@gmail.com

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

ДО ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ ТА ТРАЄКТОРІЇ РУХУ ЧАСТИНКИ В ПОТОЦІ ТЕПЛОНОСІЯ

В статті наводяться експериментальні дані, на підставі яких створена математична модель руху частинок у вихровому шарі при термообробці з урахуванням зміни їх розмірів. В роботі визначено особливості руху часток у вихровому апараті. Також отримана залежність, що дозволяє управляти тривалістю термічної обробки. Отримані в роботі математичні моделі можуть використовуватись в методиках розрахунків та проектування вихрових тепломасообмінних пристроїв.

Приведені в роботі рівняння відображають особливості термообробки частинок у вихровому апараті з врахуванням змінних їх розмірів та можуть доповнити існуючі методи проектування таких установок.

Ключові слова: моделювання руху; вихровий апарат; частинка матеріалу; модель; результати експерименту.

The article presents experimental data on the basis of which a mathematical model of particle motion in a vortex layer during heat treatment is created, taking into account changes in their sizes. The peculiarities of particle motion in the vortex apparatus are determined in the work. There is also a dependence that allows you to control the duration of heat treatment. The mathematical models obtained in this work can be used in methods of calculations and design of vortex heat and mass transfer devices.

The equations presented in this paper reflect the features of heat treatment of particles in the vortex apparatus taking into account their variable sizes and can complement the existing methods of designing such installations.

Keywords: motion modeling; vortex apparatus; material particle; model; experimental results.

Постановка проблеми

Сучасний рівень розвитку вихрових апаратів стимулює актуальність досліджень, спрямованих на більш глибоке вивчення процесів термообробки, вдосконалення конструкцій пристроїв та технології виготовлення окремих вузлів. Відсутність строгої сучасної теорії відчувається особливо гостро при проектуванні систем та пристроїв, в яких вихровий апарат є одним з вагомих агрегатів. В зв'язку з чим, першочерговим завданням на сьогодні залишається розробка теорії, яка дозволить отримати доволі надійний математичний опис процесів, які відбуваються в вихровій камері апарату.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

В багатьох галузях техніки використовують різні масообмінні пристрої для сушіння гранульованого матеріалу різноманітного призначення [1]. В цілому методики проектування таких апаратів відомі, і якщо технологічний процес реалізовується без будь-яких особливостей, то методи розрахунку себе виправдовують. У випадках, коли властивості матеріалу в процесі термообробки змінюються, традиційні методи розрахунку дають суттєві похибки. Тоді виникає необхідність математичного моделювання основних технологічних процесів.

Так на рис.1 приведена схема вихрової камери для термообробки дисперсного матеріалу. В гідродинаміці апарату, та відповідно в процесах обробки, необхідно виділити два основних етапи: попереднє підсушування частинок в плоскому струмені теплоносія та кінцева термообробка в вихровому шарі. Зупинимося більш детально на першому етапі технології.

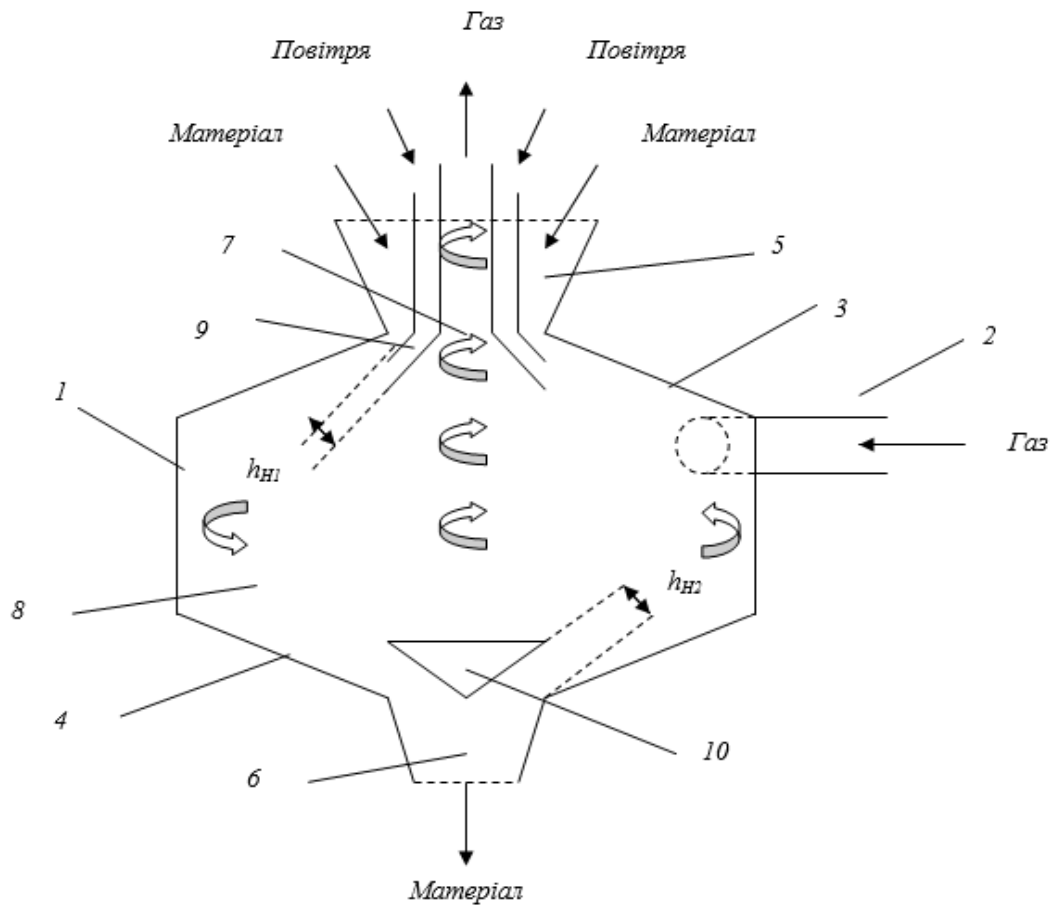


Рис. 1. Схема апарату: 1 — корпус; 2 — бічний вхідний патрубок для підводу газу; 3 — торцева верхня стінка; 4 — торцева нижня стінка; 5 — завантажувальний бункер; 6 — розвантажувальний бункер; 7 — воронка з патрубком, для відводу газу; 8 — робоча камера; 9 — патрубки для подачі повітря; 10 — регулятор

В процесі руху матеріалу вздовж стінок патрубка 9 внаслідок прискорення настільним струменем частинки отримують деяку початкову швидкість [2]. При цьому частинки меншої ваги будуть мати більшу швидкість, ніж ті, які більш важчі. Такий розподіл початкової швидкості частинок матеріалу представляється нам доцільним для зменшення виносу їх з камери з відхідними газами.

Формулювання мети дослідження

Мета дослідження — провести математичне моделювання основних технологічних процесів при термообробці в вихровому апараті гранульованого матеріалу, властивості якого змінюються під час термообробки.

Виклад основного матеріалу

1. Розглянемо рух одиночної частинки сферичної форми в потоці газу (рис. 2). Потрапляючи в потік газу, частинка рухається в ньому під дією сили тяжіння, сили, що виштовхує (сили Архімеда) та сили опору. Систему координат обираємо так, щоб вісь X була спрямована вздовж конусу, а вісь Y — перпендикулярно до його поверхні. При необхідності можливо розглядати тривимірний рух частинки, якщо вздовж конусу-розпилювача створюємо закручений струмінь.

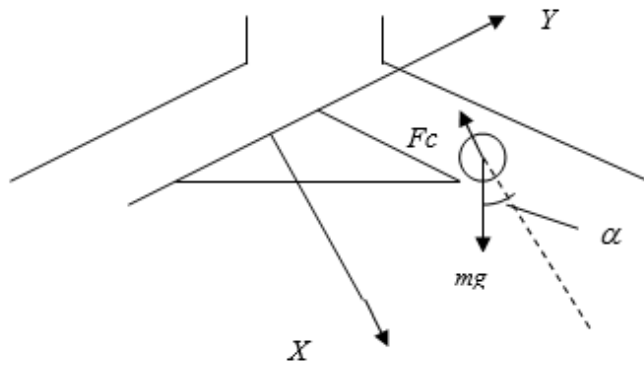


Рис. 2. Розрахункова схема

Рівняння рівноваги сил, діючих на частинку, в проєкціях на осі координат запишуться так

$$ma_x = c \frac{\rho(u - g_x)^2}{2} S + mg \cos \alpha, \quad (1)$$

$$ma_y = mg \sin \alpha.$$

де S — площа поперечного перетину частинки; m — маса частинки; u — швидкість потоку газу; ρ — густина газу.

Початкові умови для інтегрування рівнянь будуть наступні при $t = 0$, $x = y = 0$,

$$g_x = g_0 \cos \alpha, \quad g_y = g_0 \sin \alpha. \quad (2)$$

Задаючи, таким чином, початкові умови, ми розглядаємо частинку, яка максимальний час знаходиться в настільному струмені газу. В загальному випадку швидкість V_0 визначаємо як середньомасову

$$g_0 = \frac{4G_M}{\pi(D_T^2 - d_T^2)\rho_M},$$

де G_M — масова витрата матеріалу; ρ_M — насипна густина.

Перетворимо вихідні рівняння

$$a_x = \frac{3}{4} C_X \frac{\rho}{a\rho_T} (u - g_x)^2 + \left(1 - \frac{\rho}{\rho_T}\right) g \cos \alpha, \quad (3)$$

$$a_y = g \left(1 - \frac{\rho}{\rho_T}\right) \sin \alpha.$$

Друге рівняння можливо інтегрувати. Для інтегрування першого рівняння необхідно знати швидкість потоку та коефіцієнт опору частинки при її обтіканні, який, як відомо, залежить від її відносної швидкості. В початковий момент після потрапляння частинки в потік через велику відносну швидкість має місце турбулентний або перехідний режим обтікання з коефіцієнтом опору $C = \frac{64}{Re} = \frac{64\nu}{g_d}$, який змінюється в залежності від числа Рейнольдса, наприклад по формулі Клячко [3].

Для вирішення рівняння проведемо деякі спрощення

$$a_x = 18 \frac{\rho}{\rho_T} \frac{\nu}{a^2} (u - g_x) + \frac{1}{6} \sqrt[3]{\left(\frac{a}{\nu}\right)^2} (u - g_x)^{\frac{5}{3}}, \quad (4)$$

$$a_y = g \sin \alpha.$$

В загальному випадку швидкість потоку змінюється по y та x . Для порівняно невеликих відстаней можливо прийняти $u = u_{cp} = const$. У випадку чисельного рішення можна задати і більш точні закони розподілу швидкостей.

Приведемо рівняння до безрозмірного виду, обравши в якості характерних розмірів довжину конуса-розпилювача l , висоту $2h_H$ та час $t_K = \frac{l}{u}$. Тоді, виконавши перетворення та опускаючи рисочки над безрозмірними величинами, отримаємо

$$a_x = A_1(1 - \mathcal{G}_x) + A_2(1 - \mathcal{G}_x)^{\frac{5}{3}}, \quad (5)$$

$$a_y = A_3,$$

де $A_1 = \frac{18}{\text{Re}} \frac{\rho}{\rho_T} \frac{l}{a}$, $A_2 = \frac{1}{6} \text{Re}^{\frac{2}{3}}$, $A_3 = \frac{gl}{2h_H u} \sin \alpha$, $\text{Re} = \frac{ua}{\nu}$.

Початкові умови в безрозмірному вигляді запишуться так

при $t = 0$ $x = y = 0$; $\frac{dx}{dt} = \frac{\mathcal{G}_0}{u} \cos \alpha$, $\frac{dy}{dt} = \frac{\mathcal{G}_0}{u} \sin \alpha$. (6)

При турбулентному обтікання частинок коефіцієнт опору залежить тільки від їх форми і для кулі можливо прийняти $C_x \approx 0,44$. Тоді система рівнянь (3), перетворена до безрозмірного вигляду, запишеться так

$$a_x = A_4(1 - \mathcal{G}_x)^2 + A_5, a_y = A_3, \quad (7)$$

де $A_4 = \frac{3}{4} C_x \frac{\rho}{\rho_T} \frac{l}{a}$, $A_5 = \frac{gl}{u^2} \cos \alpha$.

Отримані відношення дозволяють приблизно визначити час руху частинки до моменту зіткнення з конусом-розпилювачем при $y = h_H$ та відповідну йому відстань x , яка для виключення зносу корпусу не повинна бути меншою за довжину напрямної l .

Для визначення координат частинки всередині камери закручування проінтегруємо систему (1).

Тоді

$$x = \frac{Cx}{m} \frac{\rho(u - \mathcal{G}_x)^2}{2} S \frac{t^2}{2} + g \cos \frac{t^2}{2}; \quad (8)$$

$$y = g \sin \alpha t^2.$$

2. Для попередньої сушки в плоскому струмені повітря з врахуванням теплофізичних та геометричних параметрів частинки, які змінюються.

З рівняння рівноваги сил (1), які діють на частинку, в проекціях на осі координат, задаючи $m = \text{const}$, $\rho_{\text{част}} = \text{var}$, $S = \text{var}$, $c = f(d)$:

$$\rho(\tau) \cdot \frac{4}{3} d^3(\tau) \frac{d^2 x}{d\tau^2} = \frac{c(\tau) \rho(\tau) [u(\tau) - \mathcal{G}_x]^2}{2} \pi d^2(\tau) + \rho(\tau) \frac{4}{3} d^3(\tau) \cdot g \cos \alpha. \quad (9)$$

Тоді друга похідна координати за часом

$$\frac{d^2 x}{d\tau^2} = \frac{3}{8} c(\tau) \pi [u(\tau) - \mathcal{G}_x]^2 \frac{1}{d(\tau)} + g \cos \alpha;$$

Зробимо заміну

$$k_1 = \frac{3}{8} c \pi [u(\tau) - \mathcal{G}_x]^2,$$

тоді

$$\frac{d^2 x}{d\tau^2} = \frac{k_1}{d(\tau)} + g \cos \alpha. \quad (10)$$

Перша похідна координати за часом

$$\frac{dx}{d\tau} = \mathcal{G}_{H.X.} + \int_0^\tau k_1 \frac{d\tau}{d(\tau)} + g \cos \alpha \tau.$$

Розглянемо випадок зміни діаметру частинки за степеневу залежністю $d = f(\tau)$:

$$d(\tau) = D + k_2 \tau^2; \quad (11)$$

тоді

$$\frac{dx}{d\tau} = \mathcal{G}_{H.X} + \frac{k_1}{k_2} \int_0^\tau \frac{d\tau}{\frac{D}{k_2} (1 + \tau^2)} + g \cos \alpha \cdot \tau;$$

$$\frac{dx}{d\tau} = \mathcal{G}_{H.X} + \frac{k_1}{k_2 \sqrt{\frac{D}{k_2}}} \operatorname{arctg} \frac{\tau}{\sqrt{\frac{D}{k_2}}} \Big|_0^\tau + g \cos \alpha \cdot \tau.$$

Приймаємо $\bar{D} = \frac{D}{k_2}$, тоді

$$\frac{dx}{d\tau} = \mathcal{G}_{H.X} + \frac{k_1}{\sqrt{Dk_2}} \operatorname{arctg} \frac{\tau}{\sqrt{\bar{D}}} + g \cos \alpha \cdot \tau.$$

Відповідно

$$x(\tau) = \mathcal{G}_{H.X} \cdot \tau + \int_0^\tau \frac{k_1}{\sqrt{Dk_2}} \operatorname{arctg} \frac{\tau}{\sqrt{\bar{D}}} d\tau + g \cos \alpha \frac{\tau^2}{2}. \quad (12)$$

Приймаємо

$$u = \operatorname{arctg} \frac{\tau}{\sqrt{\bar{D}}}; \quad dz = d\tau; \quad du = \frac{1}{\sqrt{\bar{D}}} \frac{d\tau}{1 + \frac{\tau^2}{\bar{D}}}; \quad z = \tau. \quad (13)$$

Тоді

$$x(\tau) = \mathcal{G}_{H.X} \cdot \tau + \frac{k_1 \tau}{\sqrt{Dk_2}} \operatorname{arctg} \frac{\tau}{\sqrt{\bar{D}}} - \frac{k_1}{\sqrt{Dk_2}} \int_0^\tau \frac{\sqrt{\bar{D}} \cdot \tau}{\bar{D} + \tau^2} d\tau + g \cos \alpha \frac{\tau^2}{2};$$

$$x(\tau) = \mathcal{G}_{H.X} \cdot \tau + \frac{k_1 \cdot \tau}{\sqrt{Dk_2}} \operatorname{arctg} \frac{\tau}{\sqrt{\bar{D}}} - \frac{k_1 \sqrt{\bar{D}}}{2\sqrt{Dk_2}} \ln|\bar{D} + \tau^2| \Big|_0^\tau + g \cos \alpha \frac{\tau^2}{2};$$

$$x(\tau) = \mathcal{G}_{H.X} \cdot \tau + \frac{k_1 \cdot \tau}{\sqrt{Dk_2}} \operatorname{arctg} \frac{\tau}{\sqrt{\bar{D}}} - \frac{k_1 \sqrt{\bar{D}}}{2\sqrt{Dk_2}} \ln(\bar{D} + \tau^2) + \frac{k_1 \sqrt{\bar{D}}}{2\sqrt{Dk_2}} \ln|\bar{D}| + g \cos \alpha \frac{\tau^2}{2}. \quad (14)$$

Початкові умови для інтегрування

$$\begin{cases} \frac{d^2 y}{d\tau^2} = g \sin \alpha; \\ \frac{dy(0)}{y(0)} = \mathcal{G}_{H.Y}; \\ y(0) = 0. \end{cases} \quad (15)$$

$$\frac{dy}{d\tau} = \mathcal{G}_{H.Y} + g \sin \alpha \cdot \tau = \mathcal{G};$$

$$y(\tau) = \mathcal{G}_{H.Y} \cdot \tau + g \sin \alpha \cdot \frac{\tau^2}{2}. \quad (16)$$

Якщо $k_1 = k_1(\tau) = \frac{3}{8}c(\tau)\pi[u(\tau) - \mathcal{G}_x]^2$; то

$$x(\tau) = \mathcal{G}_{H.X} \cdot \tau + \int_0^\tau \int_0^\tau \frac{k_1(\tau)}{d(\tau)} d\tau d\tau + g \cos \alpha \frac{\tau^2}{2}. \quad (17)$$

За запропонованими залежностями неважко розрахувати траєкторії руху частинок, швидкості (рис. 3) та розміру апарату.

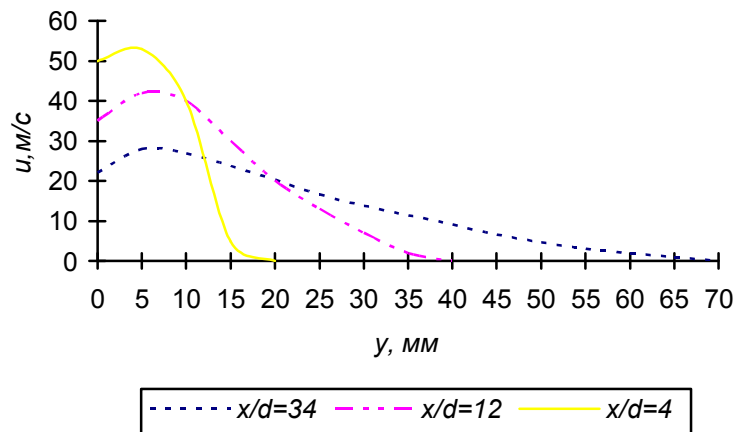


Рис. 3. Розподіл швидкостей в настільному струмені

Висновки

Отримані таким чином рівняння відображають вказані вище особливості термообробки частинок у вихровому апараті з врахуванням змінних їх розмірів та можуть доповнити існуючі методи проектування таких установок.

Список використаної літератури

1. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. Изд. 8-е, перераб. М.: Наука. 1971. 784 с.
2. Бай Ши-и, Турбулентное течение жидкостей и газов. М.: Изд. иностр. лит. 1962. 344 с.
3. Клячко Л.С. Уравнения движения пылевых частиц в пылеприёмных устройствах. Отопление и вентиляция. 1934. №4. С. 27–29.

TO DETERMINATION OF SPEED AND TRACTION OF PARTICLE MOVEMENT IN THE HEAT FLOW

Sokolovska I., Klimov R., Morozovska A.

Abstract

The article presents experimental data on the basis of which a mathematical model of particle motion in a vortex layer during heat treatment is created, taking into account changes in their sizes. The peculiarities of particle motion in the vortex apparatus are determined in the work. There is also a dependence that allows you to control the duration of heat treatment. Based on the results of research and modeling, you can design a device for drying dispersed particles.

The current level of development of vortex devices stimulates the relevance of research aimed at a deeper study of heat treatment processes, improving the design of devices and manufacturing technology of individual components. The lack of a strict modern theory is particularly acute in the

design of systems and devices in which the vortex apparatus is one of the important units. In this regard, the priority today is to develop a theory that will provide a fairly reliable mathematical description of the processes occurring in the vortex chamber of the device.

In many fields of technology use different mass transfer devices for drying granular material for various purposes. In general, the methods of designing such devices are known, and if the technological process is implemented without any features, the calculation methods justify themselves. In cases where the properties of the material in the heat treatment process change, traditional calculation methods give significant errors. Then there is a need for mathematical modeling of basic technological processes.

In the hydrodynamics of the apparatus presented in the work, and accordingly in the processing, it is necessary to distinguish two main stages: pre-drying of particles in a flat jet of coolant and the final heat treatment in the vortex layer. In this paper, we dwelled in more detail on the first stage of technology.

The equations presented in this paper reflect the features of heat treatment of particles in the vortex apparatus taking into account their variable sizes and can complement the existing methods of designing such installations.

The equations obtained in this way reflect the above-mentioned features of heat treatment of particles in a vortex apparatus taking into account their variable sizes and can supplement the existing methods of designing such installations.

References

- [1] Kasatkin, A.G. (1971). *Osnovnyye protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii*. [Basic processes and apparatuses of chemical technology]. Izd. 8-ye, pererab. M.: Nauka [in Russian].
- [2] Bay Shi-i, (1962). *Turbulentnoye techeniye zhidkostey i gazov*. [Turbulent flow of liquids and gases]. M.: Izd. inostr. lit. [in Russian].
- [3] Klyachko L.S. (1934). *Uravneniya dvizheniya pylevykh chastits v pylepriyomnykh ustroystvakh*. [Equations of motion of dust particles in dust receiving devices]. *Otopleniye i ventilyatsiya*. 4. 27–29. [in Russian].