

ОЦІНКА ФАКТОРІВ СИЛОВОГО ВПЛИВУ ТА ВИЗНАЧЕННЯ УМОВ РІВНОВАГИ ДИСПЕРСНОЇ ФАЗИ В МАЛОГАБАРИТНИХ В АПАРАТАХ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ГРАНУЛ З ОСОБЛИВИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

Кочергін М.О., Артюхов А.Є., Склабінський В.І., Осіпов В.А.

Аннотация

Предложен метод определения условий равновесия капли в вихревом газовом потоке. Разработана комплексная методика определения гидродинамических и термодинамических параметров создания гранул пористой структуры. Результаты исследований позволяют определить оптимальные условия проведения процесса и спроектировать малогабаритные конструкции вихревых аппаратов.

Анотація

Запропоновано метод визначення умов рівноваги краплі у вихровому газовому потоці. Розроблено комплексну методіку визначення гідродинамічних і термодинамічних параметрів створення гранул пористої структури. Результати досліджень дозволяють визначити оптимальні умови проведення процесу і спроектувати малогабаритні конструкції вихрових апаратів.

Summary

The method of terms drop equilibrium determination in a vortical gas stream is offered. The complex method of hydrodynamic and thermodynamics parameters determination of porous structure granules creation of is developed. The results of researches allow defining the optimum terms of process conducting and project small constructions of vortical vehicles.

Останні десятиріччя в сільському господарстві широко використовують мінеральні добрива та добрива пролонгованої дії. Широке застосування знайшла гранульована пориста аміачна селітра, що також використовується в гірничодобувній промисловості. Основним способом отримання пористих гранул аміачної селітри є баштовий спосіб з додаванням пороутворюючих домішок. Він потребує висококонцентрованого плаву і відрізняється громіздкістю основного технологічного обладнання. Крім того, в процесі одержання гранул за цим способом на стадії до упарювання та гранулювання утворюються аерозолі, які мають у своєму складі зазначені добавки, що призводить до забруднення навколишнього середовища. Будівництво такого виробництва вимагає великих капітальних витрат, до того ж майже неможливо впливати на структуру й об'єм пор у гранулі.

Для впровадження у промисловість нових способів організації потоків та конструкцій грануляторів з удосконаленою гідродинамікою [1-5], що забезпечують збільшення монодисперсності гранул, які формуються у вихровому зваженому шарі, актуальним і необхідним є вирішення питання створення їх методики інженерного розрахунку. Ця методика повинна враховувати гідродинамічні та термодинамічні параметри формування пористого шару, а також визначити ступінь впливу на рух дисперсної фази набору сил і умови рівноваги її рівноваги в вихровому газовому потоці. Запропонований математичний апарат повинен дозволити керування процесом пороутворення при зміні гідродинамічних та термодинамічних характеристик ведення процесу (час перебування, характер розподілу дисперсної фази робочому просторі пристрою, інтенсивність видалення вологи і т.п.) в малогабаритних апаратах вихрового типу з високоінтенсивною гідродинамікою.

Об'єкт дослідження – малогабаритні вихрові апарати для отримання гранул з особливими властивостями.

Предмет дослідження – гідродинамічні і термодинамічні умови створення гранул пористої структури.

Мета роботи - визначення умов рівноваги краплі у вихровому газовому потоці, аналіз ступеня впливу силових факторів на рух і рівновагу краплі, враховуючи зміну маси і, в деяких випадках, об'єму краплі [6] під час сушіння та пороутворення.

Раціональний підбір гідродинамічних характеристик суцільної фази дозволить «підвісити» краплю в газовому потоці і зменшити швидкість її падіння. При відомому значенні часу кристалізації який визначається розмірами краплі і термодинамічними умовами протікання процесу, представляється можливим зменшення вертикальної складової переміщення краплі за рахунок збільшення часу її перебування в об'ємі апарату.

При протіканні процесу сушіння і пороутворення в малогабаритних вихрових апаратах обов'язковою умовою є відсутність деформації краплі у польоті і процесу вторинного дроблення краплі [7]. Ці умови будуть забезпечені в тому випадку, якщо сила аеродинамічної дії суцільної фази на краплю буде менше тиску, який створюється в краплі за рахунок сили поверхневого натягу.

Таким чином, для створення алгоритму управління польотом краплі у вихровому газовому потоці в малогабаритних апаратах зі змінним перерізом робочої камери необхідною умовою є перевірка одночасного виконання умов зменшення падіння краплі за рахунок розгляду рівноваги сил тяжіння та аеродинамічної дії газового потоку, і відсутності деформації краплі за рахунок розгляду рівноваги сил тяжіння та поверхневого натягу.

Потік суцільної фази, у випадку, що розглядається, моделюється системою рівнянь Нав'є-Стокса і рівнянням нерозривності потоку [8], віддає частину моменту кількості руху дисперсній фазі. За результатами вирішення вищезазначених рівнянь визначаються складові повної швидкості руху газового потоку у робочому просторі малогабаритного апарата з інтенсивною гідродинамікою.

У загальному випадку, сила, що діє на краплю (гранулу) з боку газового потоку уздовж вертикальної осі апарата дорівнює

$$F = \int_S dF, \quad (1)$$

де S - площа поперечного перерізу краплі.

Величина dF дорівнює

$$dF = \psi \cdot \frac{\rho_a V_z^2}{2} dS, \quad (2)$$

де ψ - коефіцієнт опору; dS - елементарна площа, до осьового напрямку руху потоку.

Беручи до уваги припущення, що гранула являє собою тіло сферичної форми з радіусом R , для випадку, коли $V_z = f(r) = const$,

$$F = \int_{S'} dF = \psi \cdot \frac{\rho_a V_z^2}{2} \cdot \pi R^2. \quad (3)$$

З огляду на значні радіальні розміри робочої області гранулятора

$$V_z = \frac{Q}{\pi \cdot R_E^2}, \quad (4)$$

де Q – об'ємна витрата газу; R_K – радіус перерізу робочої області гранулятора з координатою Z .

Оскільки $R_{кам}$ у довільному перерізі з координатою "Z" дорівнює $R_{кам} = Z \cdot \operatorname{tg}(\varphi)$, то значення $V_z(Z)$ дорівнює

$$V_z(Z) = \frac{Q}{\pi \cdot Z^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \varphi}. \quad (5)$$

Якщо врахувати, що робоча область гранулятора являє собою патрубковий конус зі змінним перерізом (для спрощення приймається конічна область), то (рис. 1) зміна осьової складової газового потоку при малому куті відкриття конуса підкоряється виразу (5).

Тоді сила опору уздовж осі гранулятора дорівнює:

$$F_S = \psi \cdot \frac{\rho_a \cdot \pi \cdot R^2}{2} \cdot \left(\frac{Q}{\pi \cdot Z \cdot \operatorname{tg} \varphi} \right)^2 = \frac{\psi}{2 \cdot \pi} \cdot \rho_a \cdot \frac{Q^2}{Z^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \varphi}, \quad (6)$$

де R - радіус гранули.

Сила ваги, що діє на гранулу

$$F_g = \rho_d \cdot g \cdot V_{ad} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3 \cdot \rho_d \cdot g. \quad (7)$$

Умова рівноваги краплі в газовому потоці

$$F_S = F_g. \quad (8)$$

При збільшенні F_S гранула буде рухатися нагору, а при зменшенні – вниз апарата.

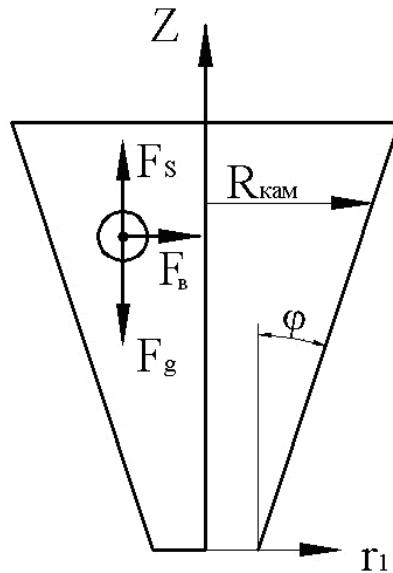


Рис. 1. Схема конічної робочої області гранулятора: φ - половина кута розкриття дифузора; r_1 – поточне значення радіуса; Z – вертикальна вісь координат співпадаюча з віссю робочої області гранулятора; F_s , F_b і F_g - сила опору, сила ваги, що діє на гранулу радіусом R і відцентрова сила відповідно; $R_{\text{кам}}$ – радіус камери.

З умови рівноваги можна визначити швидкість газу, що відповідає цьому стану $V_{p,зр}$ і за її значенням з'ясувати, у якому місці по висоті робочої області гранулятора буде перебувати гранула

$$V_{\delta, \text{ад}1} = 1,633 \cdot \sqrt{\frac{\rho_{\delta} \cdot g \cdot R}{\psi \cdot \rho_a}} \quad (9)$$

Якщо гранула насичена вологою й матеріал має вологість U ($\frac{\text{кг. вологи}}{\text{кг. а. с. р. - ни}}$), то маса гранули дорівнює

$$m_{зр} = m_{\text{а.с.р.-ни}} + m_p \quad (10)$$

де $m_{\text{а.с.р.-ни}}$ й m_p - маса абсолютно сухої речовини гранули й маса рідини, якою насичена гранула.

Припускаючи, що до насичення вологою, стан гранули був близько до абсолютно сухої речовини, її радіус був рівний R_1 , і в процесі насичення вологою об'єм гранули практично не змінився, маса зволоженої гранули дорівнює

$$m_{\text{ад}} = \frac{4}{3} \pi \cdot R_1^3 \cdot \rho_{\delta} \cdot (1 + U) \quad (11)$$

Відповідно до цього вираз умови рівноваги (8) запишеться в наступному вигляді

$$\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \rho_{\delta} \cdot g \cdot R_1^3 \cdot (1 + U) = \psi \cdot \frac{\pi \cdot \rho_{\delta} \cdot R_1^2}{2} \cdot V_{\delta, \text{ад}1}^2 \quad (12)$$

Звідки

$$V_{\delta, \text{ад}1} = 1,633 \cdot \sqrt{\frac{\rho_{\delta} \cdot g \cdot R_1 \cdot (1 + U)}{\psi \cdot \rho_a}} \quad (13)$$

Визначним параметром, який зумовлює характер поведінки краплі в газовому потоці, є критерій Вебера [7]

$$We = \frac{\rho_{\delta} \cdot V_{\text{ад}}^2 \cdot d}{2 \cdot \sigma} \quad (14)$$

де $d = 2 \cdot R$; σ - коефіцієнт поверхневого натягу.

Розглядаючи аеродинамічний вплив газу на краплі та вважаючи критерій Вебера визначальним в цьому процесі, автори [7,9] пропонують встановити критичні значення цього параметра для режиму деформації та вторинного дроблення краплі. Крапля починатиме деформуватись, якщо величина критерію Вебера перевищить критичне значення. Однак в оцінці цього критерію є великі розходження, які можна пояснити залежністю його від в'язкості рідини, тривалістю дії газового потоку на краплю, а також іншими факторами. Таким чином, Критерій Вебера – не єдиний параметр, який визначає стійкість краплі в газовому потоці.

Запропоновано [10] визначити діапазон стійкого існування краплі сферичної форми за критеріальною залежністю

$$We_{\delta\delta} = \frac{1}{2} \cdot Re_{\delta\delta}^2 \cdot \left(\frac{\mu_{\bar{a}}}{\mu_{\delta}} \right)^2 \frac{\rho_{\delta}}{\rho_{\bar{a}}} \cdot \Gamma, \quad (15)$$

де Γ - критерій стійкості краплі;

$$\Gamma = \frac{\mu_{\delta}^2}{\sigma \cdot \rho_{\delta} \cdot d}. \quad (16)$$

Умови відсутності деформації та дроблення краплі мають вигляд [10]

$$4 \leq We_{\delta\delta} \leq 20, \quad (17)$$

$$0,1 \leq We \cdot Re^{-0,5} \leq 0,8. \quad (18)$$

Критерій Рейнольдса, який входить до складу умови (18), дозволяє визначити швидкість руху газового потоку, яка відповідає стабільності форми краплі

$$V_{\delta,\delta\delta 2} = \frac{Re \cdot \mu_{\delta}}{d \cdot \rho_{\delta}}. \quad (19)$$

Одночасне виконання умов (8), (17) та (18) дозволяє визначити довільну точку розташування краплі заданого розміру з відомими фізико-хімічними властивостями. Крім того, необхідно забезпечити витання краплі та незмінність її форми за рахунок швидкості руху суцільної фази і, як наслідок, коректування значення сили аеродинамічного опору середовища.

Співставлення результатів визначення швидкості газового потоку за рівняннями (13) і (18) дає можливість зробити висновок про наявність або відсутність загальної рівноваги краплі у газовому потоці і керувати процесом сушіння і пороутворення зміною технологічних параметрів роботи апарата та конструктивних характеристик робочого простору гранулятора.

Розглянемо, як впливає на величину $V_{p,sp}$ зміна вологості матеріалу U у процесі сушіння, і як наслідок – на масу гранули. Крім цього, у результаті сушіння діаметр гранули збільшується завдяки модифікаційним переходам [6] і утворенню пористої структури.

Виходячи зі схеми [11] і величини dm сухої речовини, вага елементарного об'єму dV гранули з урахуванням наявності вологи дорівнює

$$dm = \rho_T (1 + U(r, \tau)) r^2 \sin \theta d\theta d\varphi dr, \quad (20)$$

де $dV = r^2 \sin \theta d\theta d\varphi dr$ - величина елементарного об'єму [11].

З іншого боку, маса «сухої» гранули радіусом R у загальному випадку дорівнює

$$Msr = 2 \int_0^R \int_0^{\pi} \int_0^{2\pi} \rho_2 r^2 \sin(\Theta) d\Theta d\varphi dr, \quad (21)$$

або після інтегрування

$$Ms = \frac{4}{3} \cdot \rho_{\bar{a}} \cdot \pi \cdot R^3. \quad (22)$$

Або з урахуванням, що U є функцією від r і часу сушіння τ

$$Mg_{n=\infty}(\tau) = \frac{4}{3} \rho_2 \times \left(1 + \frac{\int_0^R U_p + (U_0 - U_p) \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{2(\sin(n\pi) - n\pi \cos(n\pi)) R \sin\left(\frac{n\pi r}{R}\right) e^{\left(\frac{n\pi m \tau}{R}\right)}}{(n\pi - \sin(n\pi) \cos(n\pi)) r n \pi} \right) dr}{R} \right) \pi R^3 \quad (23)$$

де m - коефіцієнт дифузії.

Крім цього, у вищенаведеному рівнянні враховувалося, що в кожний момент часу вологовміст у гранулі приймає деяке середнє значення, що обчислюється виходячи із властивостей інтеграла [12].

Проведені розрахунки показують, що в розв'язанні диференціального рівняння, що описує процес масопередачі в процесі сушіння, визначним є сума перших двох складових. Подальше

обчислення суми призводить до зміни отриманого результату в сьомому знаку дробової частини. Тому обмежимося обчисленням двох перших коефіцієнтів суми. Звідки рівняння для визначення зміни вологості в часі набуває вигляду

$$Us(\tau) = \frac{\int_0^R U_p + (U_0 - U_p) \left(\frac{2R \sin\left(\frac{\pi r}{R}\right) e^{\left(\frac{\pi^2 m \tau}{R^2}\right)} - R \sin\left(\frac{2\pi r}{R}\right) e^{\left(\frac{4\pi^2 m \tau}{R^2}\right)} \right)}{R} dr. \quad (24)$$

Інтегруючи отриманий вираз, стає можливим отримання залежності для визначення маси гранули в будь-який момент часу в процесі сушіння

$$Mg(\tau) = \frac{4}{3} \rho_s \pi R^3 \times \left(1 + \frac{\int_0^R U_p + (U_0 - U_p) \left(\frac{2R \sin\left(\frac{\pi r}{R}\right) e^{\left(\frac{\pi^2 m \tau}{R^2}\right)} - R \sin\left(\frac{2\pi r}{R}\right) e^{\left(\frac{4\pi^2 m \tau}{R^2}\right)} \right)}{R} dr + 2R \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{\sin\left(\frac{n\pi r}{R}\right) (-\sin(n\pi) + n\pi \cos(n\pi)) e^{\left(\frac{-n^2 \pi^2 m \tau}{R^2}\right)}}{(n\pi - \sin(n\pi) \cos(n\pi)) n} \right) U_p dr \right). \quad (25)$$

В результаті вирішення рівнянь запропонованої математичної моделі стає можливим визначення основних геометричних розмірів робочого простору малогабаритного вихрового гранулятора

- висота робочого простору апарата

$$H = \int_0^{\tau} V_{\tilde{a}\tilde{\delta}} \cdot d\tau, \quad (26)$$

- діаметр апарата для виконання умов рівноваги руху та форми краплі

$$D = \sqrt{\frac{Q}{0,785 \cdot V_{\tilde{a}\tilde{\delta}}}}. \quad (27)$$

Визначення гідродинамічних та термодинамічних умов формування гранул пористої структури дозволяє проводити оптимізаційний розрахунок апаратури вихрового типу, запропонувати різні конфігурації корпусу вихрового гранулятора, які дозволять забезпечити необхідний час перебування краплі до повного завершення процесу кристалізації в робочому об'ємі апарату, зменшити висоту падіння гранули та забезпечити постійність її форми.

Результати математичного моделювання та експерименту [13] застосовано при розробці технологічних параметрів процесу отримання гранул пористої структури. Запропонована на основі проведених досліджень технологічна лінія виробництва пористої аміачної селітри (ПАС) забезпечує утримувальну здатність, міцність і гранулометричний склад гранул відповідно до вимог нормативних документів.

1. 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.
2. 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.
3. Патент №82754 Україна МПК (2006) В01J2/16. Спосіб гранулювання рідкого матеріалу та пристрій для його здійснення / Артюхов А.Є., Склабінський В.І. - №а200608137; Заявлено 20.07.2006; Надрук 12.05.2008, Бюл. №9, 2008р.
4. Патент №29950 Україна МПК (2006) В01J2/16. Пристрій для гранулювання рідкого матеріалу / Артюхов А.Є., Склабінський В.І., Стеценко А.С. - №u200512066; Заявлено 15.12.2005; Надрук 11.02.2008, Бюл. №3, 2008р.
5. Патент №90798 Україна МПК (2009) В01J2/16, В01J8/08, В01J8/18. Спосіб отримання гранул пористої структури та пристрій для його здійснення / Артюхов А.Є., Склабінський В.І., Жеба К.В. - №а200812720; Заявлено 30.10.2008; Надрук 25.05.2010, Бюл. №10, 2010р.
6. Иванов М.Е., Олевский В.М., Поляков Н.Н. и др. Технология аммиачной селитры – М.: Химия, 1978. – 311 с.
7. Холин Б.Г. Центробежные и вибрационные грануляторы плавов и распылители жидкости / Холин Б.Г. – М.: Машиностроение, 1977. – 182 с.
8. Склабінський В.І. Розрахунок гідродинамічних параметрів закручених потоків у вихрових грануляторах аналітичним методом / В.І. Склабінський, А.Є. Артюхов // Вісник Сумського державного університету. – 2008. – № 3. – С. 62–70.
9. Казакова Е.А. Гранулирование и охлаждение азотсодержащих удобрений / Казакова Е.А. – М.: Химия, 1980. – 288 с.
10. Пажи Д.Г. Основы техники распыливания гидкостей / Пажи Д.Г., Галустов В.С. – М.: Химия, 1984. – 256 с.
11. Кочергін М.О. Моделювання процесу видалення вологи із гранули з метою створення пористої структури / Кочергін М.О., Склабінський В.І. // Вісник Сумського державного університету. — 2007. — №3. — с. 39-44.
12. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике / Выгодский М.Я. – М.: Наука, 1969. – 872 с.
13. Артюхов А.Є. Промислове впровадження апаратів вихрового типу для отримання гранульованих продуктів / А.Є. Артюхов, В.І. Склабінський // Наукові праці ОНАХТ. – 2008. – Випуск 32. – С. 16–21.

Оцінка факторів силового впливу та визначення умов рівноваги дисперсної фази в малагабаритних в апаратах для створення гранул з особливими властивостями [Текст] / М.О. Кочергін, А.Є. Артюхов, В.І. Склабінський, В.А. Осіпов // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2010. – №7 (154), ч.2. – С. 105-112.