



DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-1-96-103

УДК 66.099.2

О. Ю. Юрченко¹, аспірант,

ORCID: 0000-0002-3047-6654

В. І. Склабінський¹, д-р техн. наук

ORCID: 0000-0001-9388-5861

О. Г. Гусак¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0003-4372-5776

¹ Сумський державний університетe-mail: aleksyurchenko110917@gmail.com, тел.: +380966106782

ВПЛИВ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ТА МЕХАНІЧНИХ ЧИННИКІВ НА ФОРМУВАННЯ ГРАНУЛ У ГРАНУЛЯЦІЙНІЙ БАШТІ З ВИКОРИСТАННЯМ ОБЕРТОВОГО ВІБРАЦІЙНОГО ГРАНУЛЯТОРА

Анотація. Виробництво продукції а належному рівні вимагає від обладнання відповідного рівня контролю та якості. Для забезпечення необхідної якості продукції використовуються різноманітні речовини, на які багата хімічна промисловість та які можуть не лише впливати на якість та структуру нових речовин, які і змінювати власний агрегатний стан. Мінеральні добрива, що на сьогоднішній день є досить розповсюдженими та важливими у процесі сільськогосподарського та промислового виробництва, утворюються в результаті грануляції. В даній статті проведено теоретичний аналіз математичних рівнянь, що описують основні процеси по витіканню струменя плаву з перфорованого кошика гранулятора з подальшим диспергуванням на каплі під дією внутрішніх збурень у струмені рідини та розглянуто і проаналізовано математичні рівняння, що описують подальший рух гранул від гранулятора до нижньої частини грануляційної башти. В результаті, на основі такого аналізу виявлено чисельні фактори, що впливають на процеси утворення гранул у грануляційній башті виробництва мінеральних добрив. Розроблено рекомендації щодо необхідності враховувати перелічені фактори при гідродинамічних розрахунках процесів, що протікають як у кошику гранулятора, так при руху гранул у робочому просторі грануляційної башти.

Ключові слова: грануляція, струмінь, краплі, тиск, щільність, обертання, частота.

Постановка проблеми. При розрахунках нового грануляційного обладнання, при розробці рекомендацій по встановленню технологічних режимів використання такого обладнання у грануляційних баштах велике значення має вірний вибір геометричних розмірів як самого гранулятора, або грануляторів, якщо їх декілька у разі великого навантаження по плаву та великої площі пересічного перетину башти, так і типу гранулятора [1].

У сучасних грануляційних баштах виробництв мінеральних



добри найбільше поширення набули вібраційні гранулятори статичного типу та обертові вібраційні гранулятори ОВГ з різною формою кошика, що залежить і від технологічних режимів роботи грануляційної башти. Поширення вібраційних грануляторів пояснюється гарним монодисперсним складом гранульованого продукту, що відповідає сучасним вимогам на ринку мінеральних добрив [2].

Основою високоякісної роботи таки ОВГ є процес розпорошування струменів плаву, які витікають із отворів кошика та поділяються на краплі, грануляційний склад яких повинен бути якомога ближче до монодисперсного [3]. У подальшому ці краплі взаємодіють з холодним потоком повітря, що призводить до їхньої кристалізації, охолодження. На цьому етапі велике значення має вірна організація гідродинаміки повітряного потоку, який впливає як на процеси теплообміну між гранулами та повітрям, так і на швидкість руху гранул та на напрямок цього руху.

Аналіз останніх досліджень. Гранулятори ОВГ було створено на кафедрі хімічної інженерії Сумського державного університету та успішно впроваджено на багатьох вітчизняних та закордонних підприємствах у виробництвах аміачної селітри та карбаміду. Основою роботи ОВГ є диспергування розчину на краплі монодисперсного складу за допомогою накладання на струмінь плаву вимушених коливань. Цей метод також впроваджений і у вібраційних відцентрових розпилювачах, що обертаються. У ОВГ вимушені збурення струменів плаву створюються за допомогою розповсюдження у плаві регулярних змінних імпульсів тиску. Наприклад, як це пояснюється на рис.1, джерелом таких імпульсів у ОВГ може бути диск-випромінювач у вигляді мембрани, що коливається. На який подається механічна вібрація [4].

У роботі [5] представлено теоретичні дослідження з використанням накопичених у процесі промислового впровадження вібраційних грануляторів, що обертаються. За рахунок показаних рівнянь руху рідини у стаціонарному режимі в циліндричній системі координат, що використовуються для вирішення рівнянь так званої «теорії струменів», що лежать в основі теоретичного опису руху рідини у струмені. Наведені розрахунки представляють актуальність для аналізу роботи вібраційних грануляторів у промислових умовах з метою оцінки грануляційного складу продукту, що, у свою чергу, підвищує надійність і стабільність роботи всієї промислової установки з виробництва мінеральних добрив. Представлена у роботі [6] методика проведення фізичних експериментів по процесу диспергування рідини (золя), що дозволяє оцінити вплив гідродинамічних і конструктивних параметрів обладнання на фізико-

механічні властивості одержуваних гранул.

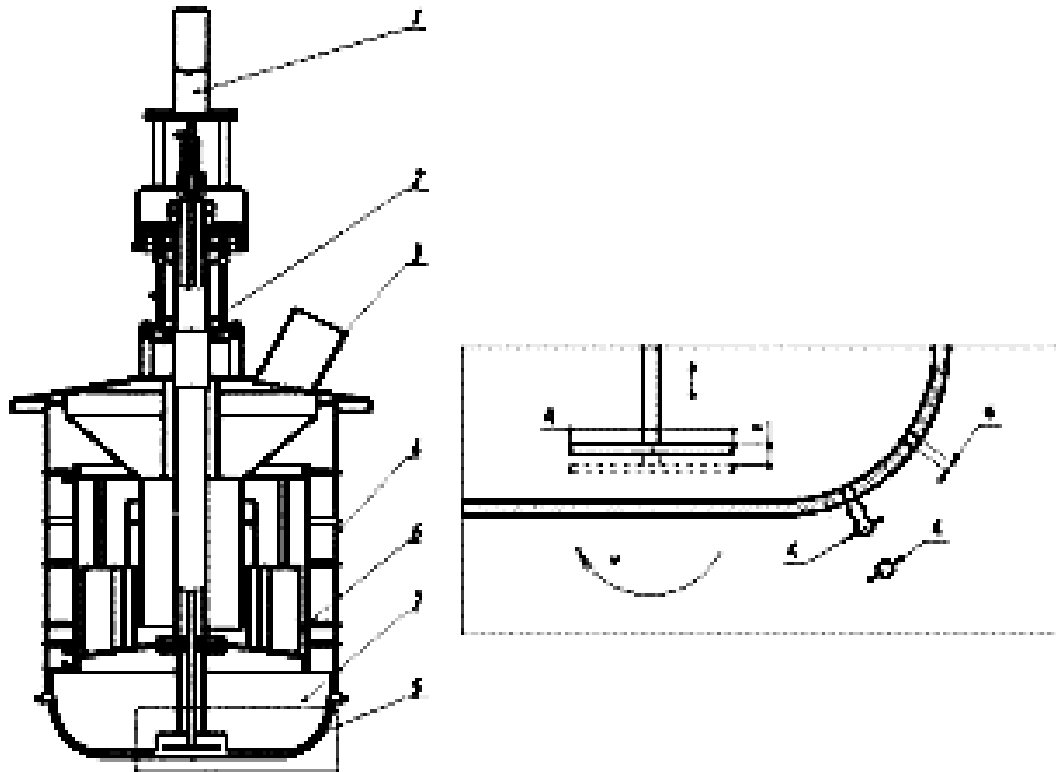


Рис. 1. Конструкція ОВГ: 1 – вібраційний пристрій; 2 – підшипники; 3 – патрубок для входу плаву; 4 – корпус; 5 – перфорована корзина; 6 – розподільник; 7 – додаткові лопатки

З використанням рівняння руху гранул у повітряному потоці, у роботі [7] розроблено програму автоматичного регулювання швидкості обертання гранулятора, виходячи зі зміни навантажень по плаву. Крім того, встановлено, що за рахунок зміни швидкості обертання гранулятора є можливість впливу на розміри факелу розпилу.

Але тільки гарна робота ОВГ може не дати потрібного якісного продукту, якщо гранулятор не буде гармонійно працювати з грануляційною баштою.

Гранулятор є важливою ланкою технологічного процесу. На стадії поділу потоку плаву на струмені, диспергування струменів на краплі, з урахуванням вимог досягнення якомога кращого монодисперсного складу гранул, і формується основа від якої потім залежить і отримання якісного продукту.

Формулювання мети статті. Метою даного дослідження є визначення впливу гідродинамічних і механічних чинників на формування гранул у грануляційній башті із використанням обертового вібраційного гранулятора. У зв'язку із цим висувуються такі задачі дослідження на основі залежностей.



Основна частина. Для розробки методики розрахунку потрібних чинників для ефективної роботи ОВГ у грануляційній башті, а саме технологічних та геометричних параметрів та умов, я яких працює кошик гранулятора, було проведено ряд теоретичних досліджень впливу гідродинамічних параметрів потоку плаву рідини, що витікає із отворів грануляційного кошика, з урахуванням симетричного відповідно осі цих струменів характеру такого руху [8].

$$\begin{cases} u_r \frac{\partial v_r}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + v \left[\frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial (r \cdot v_r)}{r} \right) \right] \\ u_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + v \left[\frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot \frac{\partial v_z}{\partial r}) \right] \\ \frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot v_r) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

Було отримано рішення [6] системи рівнянь (1) у вигляді:

$$u_r = \frac{1}{48} \frac{z(-24A_1 r^5 v - 8vz^2 A_2 + 64vz^2 A_1 r^3 + 3A_1^2 r^7 z^3 - 12A_1 r^4 z^3 A_2 - 8A_1 r^3 z^3 A_3)}{vr^2} \quad (2)$$

$$u_z = A_1 r^2 z^2 - \frac{1}{6} \frac{3z^4 A_1^2 \rho r_s^4 + 6p_0 - 12z A_1 \rho v r_s^2 - 8\rho v A_1 z^3 - 6p_1}{z^2 r_s^2 \rho A_1} \quad (3)$$

де коефіцієнти A_1 , A_2 , A_3 у свою чергу залежать від геометрії отворів у корзини та початкових гідродинамічних чинників струменя, що витікає та фізичних властивостей плаву.

Складність та громіздкість цих математичних виразів не дозволяє приводити їх повністю у даній статті. Але для вияву геометричних та гідродинамічних параметрів, що впливають на формування крапель які витікають з отворів кошика ОВГ, і не потрібно розглядати ці математичні рівняння у вигляді точного математичного рішення системи рівнянь, але у такому громіздкому вигляді. Для цього достатньо просто розглянути лише рівняння (3) яке стосується значень величини радіальної складової швидкості рідини у струменю плаву. Саме зростання величини цієї швидкості до критичного значення, коли збурення у струмені буде руйнувати дію поверхневих сил струменя, і приводити до руйнації струменя на краплі.

Таким чином, для подібного аналізу можливо переписати складне рішення [9] у вигляді загальної функціональної залежності від геометричних та гідродинамічних параметрів для виявлення чинників, які повинно враховувати при розрахунках технологічних параметрів нового обладнання. Тоді представим коефіцієнти A_1 , A_2 , A_3 у наступному вигляді:

$$A_1 = f_1(\rho, r_s, v, v_{z0}, p_0, p_1), \quad (4)$$

$$A_2 = f_2(r_s, A_1, \rho, A_3, v, p_1, p_0), \quad (5)$$

$$A_3 = f_3(A_1, \rho, r_s, v, p_1, p_0), \quad (6)$$



де ρ – щільність плаву; r_s – радіус струменя, який у свою чергу залежить від діаметру отвору у кошику гранулятора з якого витікає струмінь; ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості плаву; v_{z0} – швидкість струменя плаву у отворі кошика гранулятора яка у свою чергу залежить від навантаження по плаву у цілому на гранулятор, від кількості отворів у кошику та їх розмірів; p_0 , та p_1 - тиск у навколишньому середовищі та початковий тиск у струмені у отворі кошика (початковий тиск може мати змінне значення у часі).

Але тільки гарна робота ОВГ може не дати повністю потрібного якісного продукту, якщо гранулятор не буде гармонійно працювати з грануляційною баштою.

Для розробки методики розрахунку потрібних умов для ефективної роботи усього комплексу обладнання грануляційної башти було проведено ряд теоретичних досліджень впливу гідродинамічного впливу потоку повітря на рух гранул у башті після виходу їх із ОВГ. В основу було покладено рівняння руху гранули з урахуванням симетричного відповідно осі гранулятора (бо у башті може бути встановлено декілька грануляторів і кожен гранулятор буде формувати свій факел розпилу) характеру такого руху [10]. Тому можна розглядати у подальшому рух краплі, а потім і гранули у площині, яка проходить через вісь гранулятора, що обертається.

$$\begin{cases} \frac{d}{d\tau} W_x(\tau) = - \frac{\xi S \rho_{vozd} (W_x(\tau) + V_x)^2}{2 m} \\ \frac{d}{d\tau} W_y(\tau) = g - \frac{\xi S \rho_{vozd} (W_y(\tau) + V_y)^2}{2 m} \end{cases} \quad (7)$$

де x – горизонтально вісь; y – вертикальна вісь, яка направлена у низ; τ - час; $W(\tau)$ – швидкість руху краплі у тому чи іншому напрямку; ξ – коефіцієнт опору краплі (гранули); S – площа миделевого перетину, яка залежить від діаметру гранули; ρ_{vozd} – щільність повітря; V – швидкість повітря у грануляційній башті, яка залежить від пересічних розмірів грануляційної башти, від витрат повітря через башту; m – маса краплі (гранули), яка залежить від розміру гранул та їх фізичних властивостей.

Якщо розглядати залежність (7) та взаємозв'язок між параметрами, що входять до системи цих рівнянь, то можна побачити, що рішення цих рівнянь, а саме значення горизонтальної та вертикальної складових швидкості руху гранули у свою чергу зворотно впливають, на чисельне значення коефіцієнту супротиву. Це пояснюється тим, що коефіцієнт опору залежить від чисел Рейнольдса, який залежить від значень швидкості, а також, з огляду на значну різницю величин швидкості крапель у горизонтальному та вертикальному напрямках, має у часі перемінне значення. Також, як горизонтальна швидкість так і вертикальна швидкості мають

перемінне значення у часі. І тому ці складні взаємозв'язки ускладнюють рішення поставлених задач визначення горизонтальної та вертикальної швидкості у часі з наступним розрахунком траєкторій руху гранул, визначенням діаметра факелу розпилу, а також видачою вихідних даних для термодинамічних розрахунків процесів, що протікають між потоком повітря та гранулами. А ці гідродинамічні та термодинамічні параметри є визначальними для організації процесу кристалізації гранул.

Рівняння (7), з урахуванням всіх зазначених залежностей було вирішено та ці рівняння використано для розрахунків траєкторій руху гранул від кошика гранулятора, що обертається, до нижньої частини башти, де гранули вже відводяться за її межі. На рисунку 2 показано приклад таких розрахунків.

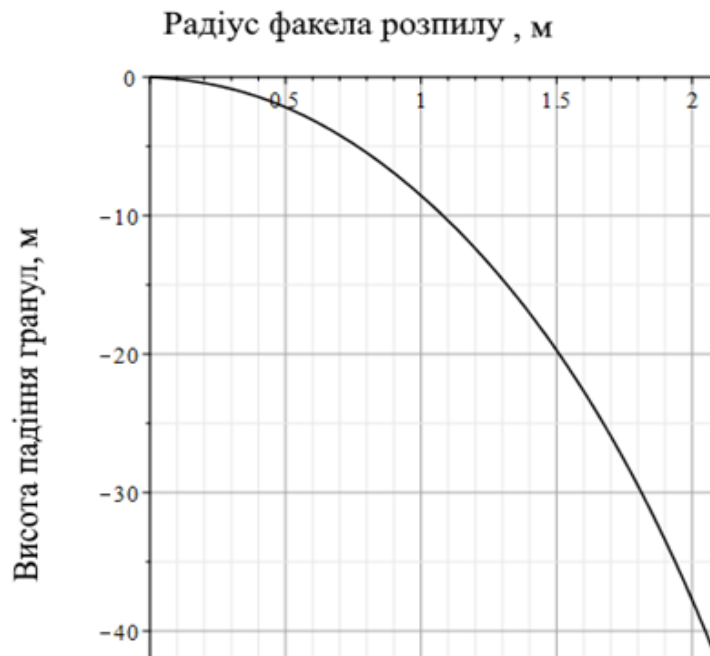


Рис. 2. Результати розрахунку траєкторії руху гранули карбаміду у грануляційній башті висотою падіння гранул 42 м.

Для розрахунків, що використані у показаному прикладі, враховані реальні умови роботи грануляційної башти виробництва карбаміду. Подальше впровадження промислових зразків ОВГ показало дієвість такого підходу.

Навантаження по плаву 130 т/годину, витрата повітря становить 130000 м³/годину, діаметр кошика ОВГ 500 мм. Вибрано випадок коли гранулятор не обертається та кутова швидкість дорівнюється 0. У цьому випадку витікання струменів плаву відбувається під дією стовпа плаву, який знаходиться у грануляторі. Та вказана на графіку траєкторія для такого випадку характерна для гранул, що утворилися з крапель, які витікають з середньої частини кошика гранулятора під кутом 45 градусів до горизонтальної площини.



Висновки. Було проведено теоретичний аналіз математичних рівнянь, що описують такі основні процеси як витікання струменя плаву з перфорованого кошика гранулятора з подальшим диспергуванням на каплі під дією внутрішніх збурень у струмені рідини. Також розглянуто та проаналізовано математичні рівняння, що описують подальший рух гранул від гранулятора до нижньої частини грануляційної башти. На основі такого аналізу було виявлено чисельні фактори, які перелічено вище, впливають на процеси утворення гранул у грануляційній башті виробництва мінеральних добрив. Розроблено рекомендації щодо необхідності враховувати перелічені фактори при гідродинамічних розрахунках процесів, що протікають як у кошику гранулятора, так при руху гранул у робочому просторі грануляційної башти. Ці рекомендації було використано для розробки метода розрахунку траєкторій руху гранул для використання у реальних промислових умовах з метою рівномірного розподілу гранул по перетину башти, що забезпечує однакові умови контактування гранул з повітрям, що охолоджує гранули та впливає на якість гранульованого продукту.

Список використаних джерел

1. Склабінський В. І., Кононенко Н. П., Скиданенко М. С. Ефективність промислового впровадження модернізованого вібраційного гранулятора, що обертається, плава в агрегатах отримання аміачної селітри. *Хімічна промисловість України*. 2012. № 3(110). С. 73-76
2. Склабінський В. І., Артюхов А. Є., Скиданенко М. С. Експериментальне дослідження впливу температури та концентрації розчину на якість монодисперсних гранул. *Наукові праці ОНАХТ. Серія: Технічні науки*, 2012. Вип. 4, т. 2. С. 127-129.
3. Скиданенко М. С., Склабінський В. І., Кононенко Н. П. Дослідження процесу закінчення струменя рідини з отвору перфорованої оболонки прилера. *Вісник НТУ ХПІ. Серія: Нові рішення у сучасних технологіях*. 2014. № 26(1069). С. 186-192.
4. Скиданенко М. С., Склабінський В. І. Розповсюдження коливань тиску у зоні формування крапель віброгранулятор. *Перспективные инновации в науке, образовании, производстве и транспорте: Междунар. науч.-практ. ИНТЕРНЕТ-конф.*, 18 – 19 июня 2013 г. Одесса, 2013. С. 28-36.
5. Yurchenko O., Ostroha R., Sklabinskyi V., Gusak O., Bocko J. Formation of Liquid Droplets at the Prilling Bucket Outlet Under Free Oscillations of the Liquid Jet. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing*. 2023. https://doi.org/10.1007/978-3-031-32774-2_18
6. Sklabinskyi V., Liaposhchenko O., Pitel' J., Pavlenko I. [et al.]. Experimental Studies and Condition Monitoring of Auxiliary Processes in the Production of Al₂O₃ by Sol-Gel Technology. *Processes*. 2022. Vol. 10.



P. 2090. <https://doi.org/10.3390/pr10102090>.

7. Yurchenko O., Sklabinskyi V., Ochowiak M., Ostroha R., Gusak O. Rational choice of a basket for the rotational vibropriller. *Journal of Engineering Sciences*. 2022. Vol. 9(1). F16-F20. [https://doi.org/10.21272/jes.2022.9\(1\).f3](https://doi.org/10.21272/jes.2022.9(1).f3).

8. Левич В. Г. Фізико-хімічна гідродинаміка. Москва: Физматиз, 1959. 700 с.

9. Скиданенко М. С., Склабінський В. І. Аналіз гідродинаміки стаціонарного витікання струменя. *Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки*. 2013. № 1. С. 79–85.

10. Холин Б. Г. Центробежные и вибрационные грануляторы плавов и распылителей жидкости. Москва: Машиностроение, 1977. 182 с.

Стаття надійшла до редакції 12.09.2023 р.

O. Yurchenko¹, V. Sklabinskyi¹, O. Gusak¹
¹Sumy State University

INFLUENCE OF HYDRODYNAMIC AND MECHANICAL FACTORS ON THE FORMATION OF GRANULES IN A GRANULATION TOWER USING A ROTATING VIBRATING GRANULATOR

Summary

The production of products at the proper level requires the appropriate level of control and quality from the equipment. To ensure the required quality of products, various substances are used, which the chemical industry is rich in and which can not only affect the quality and structure of new substances, but also change their own aggregate state. Mineral fertilizers, which today are quite widespread and important in the process of agricultural and industrial production, are formed as a result of granulation. In this article, a theoretical analysis of the mathematical equations describing the main processes of the outflow of the liquid jet from the perforated basket of the granulator with subsequent dispersion into droplets under the action of internal disturbances in the liquid jet was carried out, and the mathematical equations describing the further movement of the granules from the granulator to the lower part were considered and analyzed. granulation tower. As a result, on the basis of such an analysis, numerous factors affecting the processes of granule formation in the granulation tower of mineral fertilizer production were identified. Recommendations have been developed regarding the need to take into account the listed factors during hydrodynamic calculations of the processes occurring both in the granulator basket and during the movement of granules in the working space of the granulation tower. But only good work of mashine may not give a completely required high-quality product, if the granulator does not work harmoniously with the granulation tower. For the calculations used in the example shown, the real operating conditions of the granulation tower for the production of urea are taken into account. Further implementation of industrial samples of mashine showed the effectiveness of such an approach. These recommendations were used to develop a method of calculating the trajectories of the granules for use in real industrial conditions with the aim of uniform distribution of granules across the cross-section of the tower, which ensures the same conditions of contact of granules with air, which cools the granules and affects the quality of the granulated product.

Keywords: granulation, jet, drops, pressure, density, rotation, frequency.