



DOI: 10.32782/2078-0877-2024-24-3-4

УДК 631.363.28

В. І. Склабінський¹, д-р техн. наук

ORCID: 0000-0001-9388-5861

О. Г. Гусак¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0003-4372-5776

О. Ю. Юрченко¹, аспірант

ORCID: 0000-0002-3047-6654

К. В. Нічволодін¹, аспірант

ORCID: 0000-0002-1055-0722

¹ Сумський державний університет

e-mail: aleksyurchenko110917@gmail.com, тел.: +380966106782

ОСОБЛИВОСТІ РОЗТАШУВАННЯ ДЕКІЛЬКОХ ОБЕРТОВИХ ВІБРАЦІЙНИХ ГРАНУЛЯТОРІВ (ОВГ) У ОДНІЙ ГРАНУЛЯЦІЙНІЙ БАШТІ

Анотація. Процес гранулювання мінеральних добрив реалізується за рахунок спеціального обладнання – обертового вібраційного гранулятора мінеральних добрив. Відома конструкція установки, що є неодноразово вдосконаленою, дає можливість отримання готового продукту грануляції необхідної якості, головним чином – необхідного розміру гранул. Одночасно із цим, оптимальна конструкція з точки зору окремих параметрів, серед яких швидкість обертання корзини та рух плаву не завжди може задовольняти умови виробництва. В даній роботі представлено кілька негативних явищ, що можуть бути виявленими внаслідок роботи такої установки. Серед основних із них підкреслено явище пересікання струменів рідини, що не може бути допустимим. Таке явище призводить до зміни розміру крапель, а, отже, і гранул, що впливає на якість кінцевого продукту. В такий спосіб описано неможливість прояву такого фактору, що не є допустимим, та представлено теоретичні рішення щодо покращення стану готового продукту шляхом набору математичних рівнянь та їх вирішення.

Ключові слова. Гранулятор, тиск, корзина гранулятора, швидкість обертання, якість, готовий продукт, грануляція.

Постановка проблеми. Процес гранулювання проводиться у грануляційних баштах різних розмірів та різної форми перетину [1]. В основному це круглі башти (рис.1а) та башти прямокутної форми перетину (рис.1 б). У баштах з поперечним перетином круглої форми рівномірний розподіл добре забезпечується за рахунок обертання кошика обертового вібраційного гранулятора (ОВГ), конструкцію якого було розроблено на кафедрі хімічної інженерії Сумського державного університету (СумДУ) [2] та схема якого показано на рис. 2. Тоді, під дією відцентрових сил факел розпику, що являє собою всю сукупність потоку гранул, що рухаються у грануляційній башті, збільшує або зменшує свій діаметр, що залежить від швидкості обертання кошика гранулятора, і загалом факел «вписується» у

робочий простір башти. При цьому запобігають потраплянню ще не сформованих гранул на стінки грануляційної башти (рис. 1 в), що супроводжується налипанням плаву мінеральних добрив на стінках та приводить до необхідності зупинки башти та усього виробництва мінеральних добрив для ремонтних робіт по очищенню внутрішньої поверхні башти від плаву, що застиг на ній.

Схема розташування ОВГ у грануляційних баштах різної форми приводиться на рис. 1.

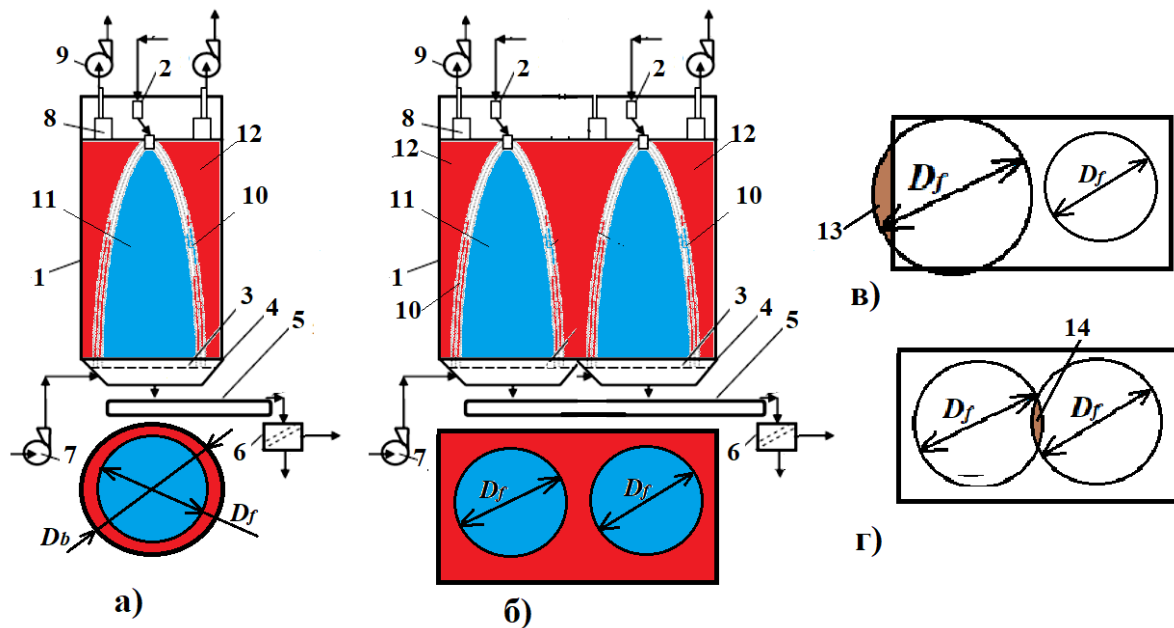


Рис. 1. Схематичне зображення факелу розпилу баштового виробництва мінеральних добрив: а) башта круглої форми. б) башта прямокутної форми. в) факел гранул потрапляє на стінки башти. г) факели гранул сусідніх грануляторів перехрещуються між собою. 1 – грануляційна башта; 2 – плаву у гранулятор; 3 – «киплячий шар»; 4 – конуси для збору гранул; 5 – транспортер; 6 – розділювач гранул по розмірам; 7 – напірний вентилятор; 8 – обладнання для очистки повітря; 9 – витяжні вентилятори; 10 – зовнішня границя факелу гранул; 11 – потік гранул; 12 – зона башти де відсутній контакт гранул з повітрям; 13 – зона потрапляння плаву на внутрішні стінки грануляційної башти; 14 – зона пересікання двох сусідніх факелів гранул

Ще до одного негативного явища може привести невірний розрахунок або невірна налагодка технологічного режиму роботи ОВГ. Явище пересікання двох сусідніх факелів гранул (рис. 1 г) виникає у тому випадку, коли один з факелів має більший діаметр за той, що потрібен. Таке пересікання двох сусідніх факелів гранул приводить до того, що ще на стадії не сформованих крапель у гранули ці краплі

стикаються одна з одною. Такі краплі або у результаті зіткнення руйнуються і виникають краплі меншого розміру, або виникає їх злиття і виникають краплі більшого розміру.

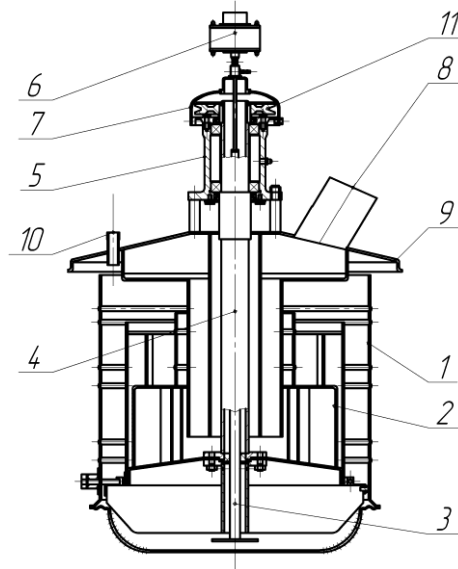


Рис. 2. Схема обертового вібраційного гранулятора (ОВГ):

- 1 - корзина, 2 – розподільник плаву по корзині, 3 – шток вібратора,
- 4 – вал, 5 – підшипниковий вузол, 6 – вібратор, 7 – металевий ковпак,
- 9 – кришка (корпус), 8 і 10 – патрубки для введення плаву і пари,
- 11 – шків

У обох випадках це приводить до негативних наслідків [3]. При подрібненні крапель потім з цих малих крапель формуються гранули малого розміру. Такі малі гранули, особливо діаметром менше 1 мм, забираються разом з повітрям у атмосферу забруднюючи її та збільшуючи втрати кінцевого продукту у вигляді готових мінеральних добрив. У випадку коли з'являються краплі збільшеного діаметру це приводить до того, що такі краплі формуються у гранули за більший проміжок часу, аніж потрібно для формування їх потрібних властивостей, що недостатню для повного «застигання» їх у вигляді гранул та набуття потрібної міцності. Такі гранули, при попаданні у зважений шар або на транспортер, що знаходяться у нижній частині башти, деформуються або зовсім руйнуються, що також приводить до втрат продукції та зниження її якості.

Аналіз останніх досліджень. Імовірнісні фактори впливу на отримання гранул необхідного розміру описано в дослідженнях [4-6]. Підкреслено, що додатковий тиск в забезпеченні широкого факелу розпилу плаву створюють за допомогою лопатевої системи у внутрішньому просторі корзини ОВГ, що конструктивно є важливим технічним рішенням [4]. Також указано, що діаметр та розміщення



отворів у корзині гранулятора з додатковим фактором, таким як швидкість обертання кошику гранулятора, впливають на діаметр факелу розпилу плаву. Підкреслено, що це є важливим тоді, коли башта матиме форму прямокутника і завширшки буде малою. Приведені деякі аспекти досліджень є основою подальших робіт по вдосконаленню методів з розрахунку діаметру струменя рідини, а також зміни радіуса струменя уздовж його осі з виходом на створення методик з прогнозування форми струменю до його розпаду на краплі. Тому, дослідження [7] містить розрахунки, що представляють актуальність при аналізі роботи вібраційних грануляторів для промислових масштабів з метою оцінки їх грануляційного складу продукту. Спираючись на отриманий досвід, в роботі [8] розроблено методику визначення діаметра факела розпилу плаву мінеральних добрив для напрацювання рекомендацій щодо зміни швидкості обертання гранулятора у залежності від зміни навантажень по плаву у промислових умовах та форми кошика за умови потрібного початкового напрямку введення струменів та гранул у повітряний потік.

Формулювання мети статті (постановка завдання). У обох випадках запобігти потраплянню плаву на стінки башти і зіткненню гранул між собою з двох сусідніх факелів гранул можна вірним підбором параметрів роботи грануляторів. За мету в даній роботі ставиться вирішення задачі зниження імовірності виникнення негативних явищ у роботі грануляційного обладнання.

Основна частина. Для вирішення задачі зниження імовірності виникнення негативних явищ у роботі грануляційного обладнання, які було описано вище, було проведено дослідження та пошук чинників при роботі ОВГ, впливом на які можна запобігати цим негативним явищам.

Зовнішній контур факелу гранул обмежений траєкторіями гранул, що формуються з крапель, які виникають зі струменів із отворів розташованих на найбільшому радіусі кошика ОВГ, що обертається. Під дією статичного тиску стовпа плаву H_{st} (у метрах стовпа плаву або рідини, що витікає) у грануляторі відбувається витікання крапель з початковою швидкістю W_0 , від величини якої у подальшому і залежить діаметр факелу гранул:

$$W_0 = \psi \sqrt{2 g H_{st}}, \quad (1)$$

де ψ – коефіцієнт витрати рідини (плаву), що витікає.

Додатковим фактором, що впливає на швидкість, є число обертів кошика гранулятора n , що приводить до виникнення відцентрової сили і додатковому відцентровому тиску:



$$H_{\omega} = \left(\frac{\pi n}{30}\right)^2 \frac{(2 R_a)^2}{8 g} \quad (2)$$

і тоді повна величина тиску, під яким відбувається процес витікання дорівнює $H_a = H_{st} + H_{\omega}$, а величина швидкості під дією цього тиску дорівнює:

$$W_{0a} = \psi \sqrt{2 g \left(H_{st} + \left(\frac{\pi n}{30}\right)^2 \frac{(2 R_a)^2}{8 g} \right)} \quad (3)$$

З огляду на те, що струмені плаву витікають під кутом від горизонту то складова швидкості гранули у горизонтальному напрямку дорівнює:

$$W_{x0} = \psi \sqrt{2 g \left(H_{st} + \left(\frac{\pi n}{30}\right)^2 \frac{(2 R_a)^2}{8 g} \right)} \cos \left(\frac{\pi \alpha}{180} \right), \quad (4)$$

а рівняння для визначення складової швидкості гранули у вертикальному напрямку має вигляд:

$$W_{y0} = \psi \sqrt{2 g \left(H_{st} + \left(\frac{\pi n}{30}\right)^2 \frac{(2 R_a)^2}{8 g} \right)} \sin \left(\frac{\pi \alpha}{180} \right), \quad (5)$$

Знання початкових умов руху гранули у робочому просторі грануляційної башти, якими є рівняння (4) та (5) дозволяють чисельними методами вирішити диференційні рівняння руху гранули, рішенням яких можна знайти швидкість руху гранули:

$$\begin{cases} \frac{d}{d\tau} W_x(\tau) = -\frac{\xi S_g \rho_{voz} (W_x(\tau) + V_x)^2}{2 m} \\ \frac{d}{d\tau} W_y(\tau) = g - \frac{\xi S_g \rho_{voz} (W_y(\tau) + V_y)^2}{2 m} \end{cases} \quad (6)$$

де τ – час руху гранули; $W(\tau)_i$ – відповідно осям координат складові швидкості руху краплі; ξ – коефіцієнт опору гранули; S_g – площа поперечного перетину гранули; ρ_{voz} – щільність повітря; V_i – відповідно до осі швидкості повітря; m – маса гранули, а потім знайти траєкторію руху гранули.

Або, визначивши початкові умови шляху гранули уздовж горизонтальної осі x як $S_{x0} = 0$, а уздовж вертикальної осі y як $S_{y0} = 0$ та вирішивши відповідні диференційні рівняння:

$$\begin{cases} \frac{d^2}{d\tau^2} S_x(\tau) = \frac{-3\xi_x(\tau) \rho_{voz} \left(\frac{d}{d\tau} S_x(\tau) + V_x \right)^2}{4 d_k \rho_g} \\ \frac{d^2}{d\tau^2} S_y(\tau) = g - \frac{3\xi_y(\tau) \rho_{voz} \left(\frac{d}{d\tau} S_y(\tau) + V_y \right)^2}{4 d_k \rho_g} \end{cases} \quad (7)$$

де $S_x(\tau)$ та $S_y(\tau)$ – відповідно шлях, що долає гранула уздовж горизонтальної та вертикальної осі; $\xi_x(\tau)$ та $\xi_y(\tau)$ – коефіцієнт опору гранулі відповідно по осям,

Можна визначити траєкторію руху гранули та побудувати відповідний графік (рис. 3).

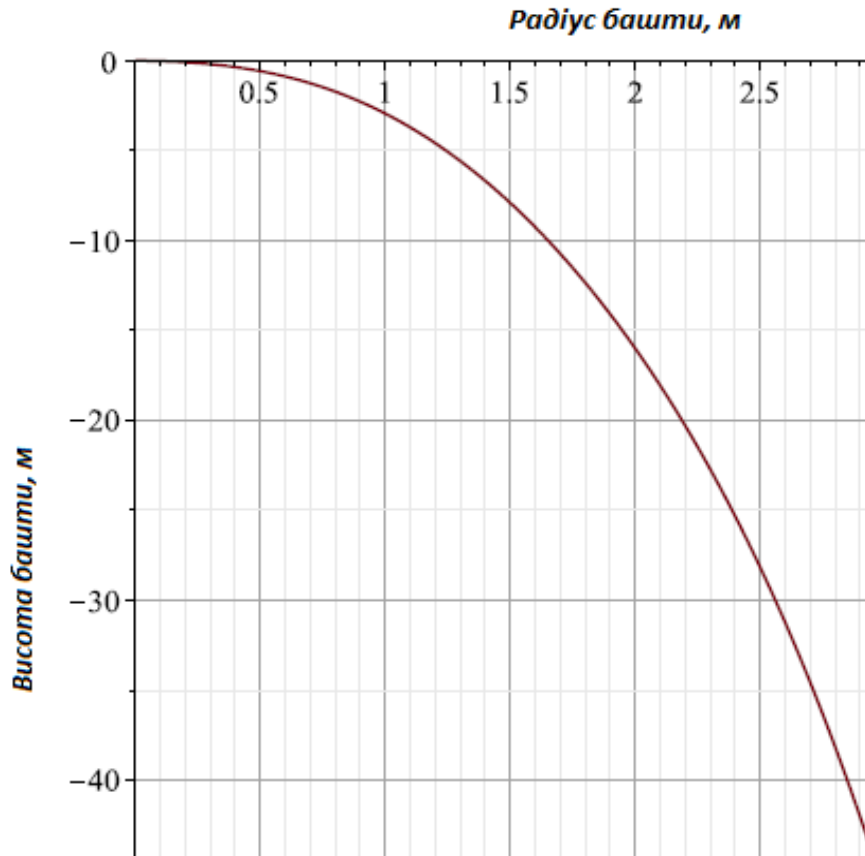


Рис. 3. Траєкторія руху гранули $d_k = 1,4$ мм для башти виробництва карбаміду висотою 42 м.

Необхідно також відмітити, що у випадку неповного розподілу гранул по перетину башти (рис.1 а) не весь повітряний потік контактує з гранулами. Очевидним є те, що фактична кількість повітря, що контактує з гранулами V_f буде меншою ніж кількість повітря V_B , що подається вентиляторами до башти $V_f < V_B$. Це негативно позначається на охолодженні гранул та пояснюється за допомогою наступного теоретичного опису.

Розглянемо рівняння теплового балансу, що є математичним описом кількості тепла, що передається від гранул до холодного теплоносія, яким є повітря:

$$\begin{cases} G_{plava} (C_p(T_{pn} - T_{pk}) + z_f + C_g(T_{pk} - T_{gk})) = G_v C_v (T_{vk} - T_{vn}), \\ K F \left(\frac{(T_{pn} - T_{vk}) + (T_{gk} - T_{vn})}{2} \right) = G_{plava} (C_p(T_{pn} - T_{pk}) + z_f + C_g(T_{pk} - T_{gk})), \end{cases} \quad (8)$$

де $G_v = V_B \rho_{vozd}$ та G_{plava} - відповідно масова витрата повітря та плаву; C_p - питома теплоємність плаву; z_f - питома теплота фазового переходу у результаті кристалізації плаву; C_g - питома теплоємність



гранули; C_v – питома теплоємність повітря; T_{pn} та T_{pk} – початкова та кінцева температура плаву; T_{gk} – кінцева температура гранули; T_{vn} та T_{vk} – початкова та кінцева температура повітря; F та K – площа теплопередачі між гранулами і повітрям та коефіцієнт теплопередачі.

Якщо вирішити цю систему рівнянь та визначити від яких параметрів залежить кінцева температура гранули після закінчення контакту з повітрям:

$$T_{gk} = (2C_g C_v G_v T_{pk} G_{plava} + C_g F K T_{pk} G_{plava} - 2C_p C_v G_v T_{pk} G_{plava} + 2C_p C_v G_v T_{pn} G_{plava} - C_p F K C_p F K T_{pk} G_{plava} + C_p F K T_{pn} G_{plava} - C_v F G_v K T_{pn} + 2C_v F G_v K T_{vn} + 2C_v G_v Z_f G_{plava} + F K Z_f G_{plava}) / (2C_g C_v G_v G_{plava} + C_g F K G_{plava} + C_v F G_v K) \quad (9)$$

то можна побачити, що заміна у цьому рівнянні (9) значення витрати повітря на менше по величині число приведе до підвищення температури гранул, що є небажаним з точки зору погіршення якості продукції.

Висновки. Таким чином, у результаті проведених теоретичних досліджень та різних розрахунків з урахуванням практичного досвіду, що отримали співробітники кафедри хімічної інженерії на різних виробництвах мінеральних добрив на вітчизняних та закордонних підприємствах, було обґрунтовано необхідність врахування параметрів ОВГ, які впливають на розміри факелу гранул у грануляційній башті для запобігання перехресненню факелів гранул двох сусідніх грануляторів та недопущення потрапляння плаву на внутрішні стінки башти. Розроблено методику визначення параметрів гранулятора, що впливають на діаметр факела розпилу плаву мінеральних добрив, для ОВГ, які впроваджуються у виробництві мінеральних добрив у промислових умовах.

Список використаних джерел

1. Скиданенко М. С., Артюхов А. Є., Склабінський В. І. Перспективи отримання мікрогранул у вібраційних грануляторах. *Сучасні технології в промисловому виробництві*: матер. наук.-техн.ї конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету технічних систем та енергоефективних технологій (Суми, 18-22 квітня 2011 року). Суми: СумДУ, 2011. Ч. 1. С. 117.
2. Холин Б. Г. Центробежные и вибрационные грануляторы плавов и распылители жидкости. Москва : Машиностроение, 1977. 182 с.
3. Казакова Е. А. Гранулирование и охлаждение азотсодержащих удобрений. Москва : Химия, 1980. 288 с.



4. Юрченко О. Ю., Склабінський В. І., Гусак О. Г. Теоретичний аналіз дії механічних та гідродинамічних чинників на утворення крапель у вібраційному грануляторі. *Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі*: матер. V Міжнар. наук.-практ. Інтернет-конференції (Запоріжжя, 01-24 листопада 2023 р.). Запоріжжя, 2023. С. 22-24.

5. Юрченко О. Ю., Склабінський В. І., Гусак О. Г. Вплив форми днища вібраційного гранулятора мінеральних добрив на основні параметрів технологічного процесу. *Промислова гідравліка і пневматика*: матер. XXIII Міжнар. наук.-техн. конференції (Київ, 15–16 грудня 2022 р.). Київ: Глобус-Прес, 2023. С. 164-166.

6. Юрченко О. Ю., Скиданенко М. С., Гусак О. Г., Склабінський В. І. Вплив гідродинаміки внутрішніх течій у корзині вібраційного гранулятора на струмені плаву. *Матер. ІХ Всеукр. наук.-техн. конференції (Суми, 19–22 квітня 2022 р.)*. Суми: СумДУ, 2022. С. 170-171.

7. Yurchenko O. Y., Ostroha R. O., Sklabinskyi V. I., Gusak O. G., Bocko J. Formation of liquid droplets at the prilling bucket outlet under free oscillations of the liquid jet. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2023. Ch. 18. P. 2-18. https://doi.org/10.1007/978-3-031-32774-2_18

8. 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). P. 16-20. [https://doi.org/10.21272/jes.2022.9\(1\).f3](https://doi.org/10.21272/jes.2022.9(1).f3).

Стаття надійшла до редакції 18.04.2024 р.

V. Sklabinskyi¹, O. Gusak¹, O. Yurchenko¹, K. Nichvolodin¹

¹Sumy State University

FEATURES OF PLACEMENT OF SEVERAL ROTATING VIBRATING GRANULATORS (OVG) IN ONE GRANULATION TOWER

Summary

The process of granulating mineral fertilizers is implemented using special equipment - a rotating vibrating granulator of mineral fertilizers. The well-known design of the installation, which has been repeatedly improved, makes it possible to obtain a finished granulation product of the required quality, mainly of the required size of granules. At the same time, the optimal design from the point of view of individual parameters, among which the speed of rotation of the basket and the movement of the float, cannot always satisfy the conditions of production. This work presents several negative phenomena that can be detected as a result of the operation of such an installation. Among the main ones, the phenomenon of crossing liquid jets, which cannot be admissible, is emphasized. Such a phenomenon leads to a change in the size of the droplets, and, therefore, the granules, which affects the quality of the final



product. In this way, the impossibility of manifesting such a factor, which is not admissible, is described and theoretical solutions are presented to improve the state of the finished product by means of a set of mathematical equations and their solution. The spray torch of tower production of mineral fertilizers with a round tower and a rectangular tower is shown schematically. In addition, it is shown how the torch of pellets falls on the walls of the tower and the phenomenon of the torch of pellets of neighboring granulators colliding with each other. The need to take into account the parameters of granulator, which affect the dimensions of the pellet torch in the granulation tower, is substantiated to prevent the pellet torches of two neighboring granulators from crossing and to prevent the liquid from falling on the inner walls of the tower. A technique for determining the parameters of the granulator, which affect the diameter of the spray torch of floating mineral fertilizers, has been developed for OVG, which are implemented in the production of mineral fertilizers in industrial conditions.

Key words: Granulator, pressure, granulator basket, rotation speed, quality, finished product, granulation.