

УДК 631.363.2

Модель розподілу матеріалу в робочій камері порційного подрібнювача

Братішко В. В.,

д.т.н., с.н.с., Національний університет біоресурсів і природокористування України,
e-mail: vbratishko@nubip.edu.ua, тел.: 098 207-92-77

Ребенко В. І.,

к.т.н., доцент, Національний університет біоресурсів і природокористування України

Мілько Д. О.,

д.т.н., доцент, Таврійський державний агротехнологічний університет

Хмельовська А. В.,

студентка, Національний університет біоресурсів і природокористування України

Анотація

Мета. Встановити характер розподілу сипкого матеріалу в робочій камері порційного подрібнювача за сталого режиму його роботи.

Методи. Теоретичні положення класичної механіки, механіки рідин та газів.

Результати. Отримано в загальному вигляді математичну модель розподілу матеріалу в робочій камері порційного подрібнювача, яка дозволяє визначити висоту шару матеріалу в довільній точці робочої камери порційного подрібнювача на деякій відстані від осі обертання робочих органів та зв'язує між собою фізико-механічні властивості подрібнюваної сировини, конструкційно-технологічні параметри подрібнювача та режим його роботи. Характер отриманої

моделі свідчить про її відповідність існуючим уявленням про розподіл сипкого середовища в робочій камері порційного подрібнювача.

Висновки. У результаті теоретичних досліджень отримано в загальному вигляді математичну модель розподілу сипкого матеріалу в циліндричній робочій камері порційного подрібнювача за сталого режиму роботи.

Прийняті під час проведення досліджень припущення свідчать про доцільність проведення експериментальних досліджень для перевірки адекватності та уточнення отриманої моделі.

Ключові слова: подрібнення, сипкий матеріал, порційний подрібнювач, характер розподілу, форма поверхні.

UDC 631.363.2

The spreading model of the material in the working chamber of the batch grinder

Bratishko V. V.,

Sc.D., National University of Life and Environmental Science of Ukraine

Rebenko V. I.,

Ph.D., National University of Life and Environmental Science of Ukraine

Milko D. O.,

Sc.D., Tavria State Agrotechnological University, Melitopol, Ukraine

Khmelovska A. V.,

student, National University of Life and Environmental Science of Ukraine

Annotation

Purpose. Set the nature of the distribution of bulk material in the working chamber of a batch grinder with a steady state of its operation.

Methods. Theoretical principles of classical mechanics, mechanics of liquids and gases.

Results. A general mathematical model of the material distribution in the chamber batch grinder is obtained. This model allows determining the height

of the material layer at an each point in the working chamber of the batch grinder at a certain distance from the axis rotation of the working bodies and interconnects the physical and mechanical properties of the crushed raw material, technological parameters of the grinder and its mode of operation. The character of the obtained model indicates that it corresponds to the well-established ideas about

the distribution of loose media in the working chamber of the batch grinder.

Conclusions. As a result of theoretical studies, a mathematical model of the distribution of bulk material in a cylindrical working chamber of a batch grinder with a steady state of operation was obtained in general terms.

Assumptions made in the course of research prove the feasibility of conducting experimental studies to verify the adequacy and refinement of the model.

Keywords: grinding, bulk material, batch grinder, character of distribution, surface shape.

УДК 631.363.2

Модель распределения материала в рабочей камере порционного измельчителя

Братишко В. В.,

д.т.н., с.н.с., Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины

Ребенко В. И.,

к.т.н., доцент, Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины

Милько Д. О.,

д.т.н., доцент, Таврический государственный агротехнологический университет

Хмелевская А. В.,

студентка, Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины

Аннотация

Цель. Определить характер распределения сыпучего материала в рабочей камере порционного измельчителя при установившемся режиме его работы.

Методы. Теоретические положения классической механики, механики жидкостей и газов.

Результаты. Получена в общем виде математическая модель распределения материала в рабочей камере порционного измельчителя, которая позволяет определить высоту слоя материала в произвольной точке рабочей камеры порционного измельчителя на некотором расстоянии от оси вращения рабочих органов и связывает между собой физико-механические свойства измельчаемого сырья, конструктивно-технологические параметры измельчителя и режим его работы. Характер полученной модели свидетельствует о ее соответствии устоявшимся представлениям о распределении сыпучей среды в рабочей камере порционного измельчителя.

Выводы. В результате теоретических исследований получена в общем виде математическая модель распределения сыпучего материала в цилиндрической рабочей камере порционного измельчителя при установившемся режиме работы.

Принятые при проведении исследований допущения свидетельствуют о целесообразности проведения экспериментальных исследований для проверки адекватности и уточнения полученной модели.

Ключевые слова: измельчение, сыпучий материал, порционный измельчитель, характер распределения, форма поверхности

Постановка проблеми. Операція подрібнення є однією з найпоширеніших технологічних операцій у багатьох галузях промисловості та сільського господарства. Причому, чим вищі вимоги ставляться до подрібненого продукту, зокрема до ступеня подрібнення, однорідності, тим технологічно досконалішими повинні бути відповідні технічні засоби. Наприклад, під час тонкого подрібнення сухих сипких матеріалів, яке, зазвичай, реалізується в порційних подрібнювачах, під час обґрунтування параметрів робочого процесу необхідно враховувати не тільки взаємодію робочих органів із матеріалом, яка призводить до зміни геометричних розмірів часточок останнього [1, 2], але й брати до уваги явища дисипації механічної енергії, оскільки значне підвищення температури матеріалу може призвести до небажаної зміни його властивостей [3]. З огляду на це, важливим є встановлення характеру розподілу матеріалу в робочій камері порційного подрібнювача в процесі його роботи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За узагальненими даними теоретичних досліджень, під час подрібнення сипких сухих матеріалів у робочих камерах порційних подрібнювачів відбувається деяке впорядкування частинок матеріалу, спричинене дією робочих органів та поверхонь

робочої камери. Це дає змогу розглядати сукупність частинок подрібнюваного матеріалу як сипуче тіло [4], властивості якого можуть характеризуватися такими параметрами, як густина, динамічна в'язкість тощо.

А отже, під час проведення теоретичних досліджень процесу розподілу матеріалу в робочій камері порційного подрібнювача можливим та доцільним є застосування відповідних положень та методів механіки суцільного середовища, рідин та газів.

Мета досліджень. Встановити характер розподілу сипкого матеріалу в робочій камері порційного подрібнювача за сталого режиму його роботи.

Методи досліджень. Під час виконання досліджень застосовувалися теоретичні положення класичної механіки, зокрема механіки рідин та газів.

Результати досліджень. Характер розподілу маси матеріалу в робочій камері подрібнювача залежить від двох сил – ваги та інерції, зумовленої дією робочих органів. Відомо, що форма поверхні речовини в циліндричному посуді, що обертається, являє собою параболу [5]. У нашому випадку форма поверхні матеріалу може бути визначена на основі спільного аналізу цих сил за умови рівноваги середовища матеріалу в робочій камері. Причому значення цих сил залежатимуть від характеру взаємодії між матеріалом, робочими органами та стінками робочої камери. Для проведення теоретичних досліджень розглянемо сили, що діють на часточку матеріалу в робочій камері порційного подрібнювача (рис. 1).

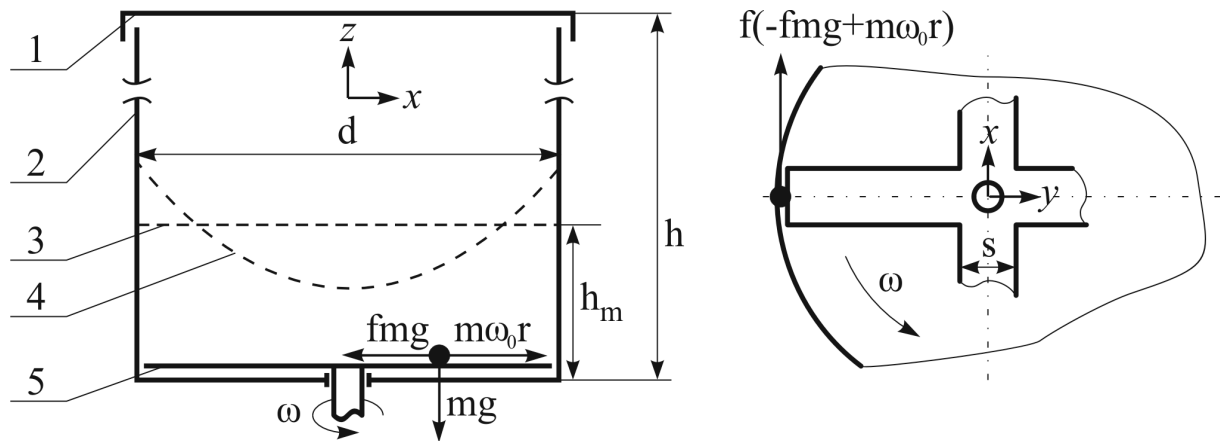


Рис. 1. Схема робочої камери порційного подрібнювача:

- 1 – кришка; 2 – стінки робочої камери; 3 – поверхня матеріалу під час завантаження;
- 4 – поверхня матеріалу при встановленому режимі роботи; 5 – робочі органи

Fig. 1. Scheme of the working chamber of the shredder:

- 1 – lid; 2 – walls of the working chamber; 3 – initial surface of the material;
- 4 – surface of the material while a stabilized mode of operation; 5 – working bodies

З аналізу рисунку 1, приймаючи, що кутова швидкість часточок матеріалу ω_0 , які взаємодіють із робочими органами подрібнювача, пропорційна кутовій швидкості робочих органів ω та відповідному коефіцієнту тертя f , тобто $\omega_0 = \omega f$, запишемо вираз результуючої сили $F_{x,y}$, що діє на часточки матеріалу в площині xy :

$$F_{x,y} = \sqrt{[f^2 m (-g + \omega^2 r)]^2 + [f m (-g + \omega^2 r)]^2} = f m (-g + \omega^2 r) \sqrt{1 + f^2}, \quad (1)$$

де f – коефіцієнт тертя матеріалу по поверхнях робочих органів;
 m – маса матеріалу, кг;
 g – прискорення вільного падіння, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$;
 ω – кутова швидкість обертання робочих органів, рад/с;
 r – поточний радіус робочої камери подрібнювача, м.

Для визначення кутової швидкості часточок матеріалу, які знаходяться в деякій довільній точці, визначеній координатами r (або x чи y) та z запишемо [6]:

$$F_{x,y} = \eta \frac{d\omega_{rz}}{dz} \pi r^3, \quad (2)$$

де η – коефіцієнт внутрішнього тертя матеріалу, динамічна в'язкість, Па·с;
 ω_{rz} – кутова швидкість середовища матеріалу в точці з координатами r , м та z , м, c^{-1} .

Прирівняємо вирази (1) та (2). Після перетворень та розділення змінних отримаємо:

$$\int \frac{1}{\omega^2 r - g} d\omega_{rz} = \int \frac{fm\sqrt{1+f^2}}{\pi\eta r^3} dz. \quad (3)$$

Початковими умовами для інтегрування виразу (3) будуть $z=0$, $\omega|_{z=0} = \omega f$. Тоді шукана кутова швидкість запишеться як:

$$\omega_{rz} = \omega f - \sqrt{\frac{g}{r}} th \left(\frac{fmh_r \sqrt{1+f^2} \sqrt{g}}{\pi\eta r^{5/2}} \right), \quad (4)$$

де h_r – деяка висота шару матеріалу на відстані r від осі обертання робочих органів подрібнювача, м.

Робочі органи таких подрібнювачів здебільшого являють собою плоскі пластини – ножі, молотки тощо. З урахуванням їхньої кількості та розмірів, припускаючи, що кутова швидкість матеріалу залежатиме від співвідношення довжини шляху тертя пластин та відповідного перерізу робочої камери подрібнювача в місці розташування робочих органів, які розміщено в нижній частині робочої камери подрібнювача, вираз (4), з деякими припущеннями, запишемо як:

$$\omega_{rz} = \frac{ns}{\pi d} \left[\omega f - \sqrt{\frac{g}{r}} th \left(\frac{fmh_r \sqrt{1+f^2} \sqrt{g}}{\pi\eta r^{5/2}} \right) \right], \quad (5)$$

де n – кількість ножів або молотків, шт.;

s – ширина ножів або молотків, м;

d – діаметр робочої камери подрібнювача в місці розташування робочих органів, м.

Залежність (5) графічно зображена на рисунку 2.

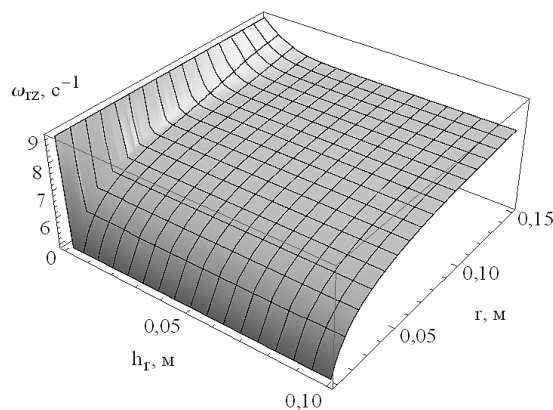


Рис. 2. Кутова швидкість часточок матеріалу в робочій камері порційного подрібнювача
 $(\omega = 100 c^{-1}; f = 0,7; g = 9,81 m/c^2; \eta = 3 Pa \cdot s; m = 2,5 kg; n = 4; d = 0,3 m; s = 0,03 m)$

Fig. 2. The angular velocity of the material particles in the working chamber of the batch shredder
 $(\omega = 100 s^{-1}; f = 0.7; g = 9.81 m/s^2; \eta = 3 Pa \cdot s; m = 2.5 kg; n = 4; d = 0.3 m; s = 0.03 m)$

Знаючи характер зміни кутової швидкості часточок матеріалу в робочій камері (рис. 2), можна визначити форму поверхні матеріалу в робочій камері за умови сталого режиму роботи порційного подрібнювача.

Скориставшись прикладом, наведеним у [5], що описує форму поверхні рідини в циліндричному посуді, що обертається, та прийнявши відповідні припущення, знайдемо вираз для визначення координати точки поверхні матеріалу в камері подрібнювача, на який діють сила тяжіння та сила інерції, викликана обертанням матеріалу навколо осі, причому кутова швидкість обертання в нашому випадку визначається виразом (5).

Знайдемо вираз висоти шару матеріалу в робочій камері для випадку, коли

$$h_0 = \frac{r_0^2 \omega_{rz0}^2}{2g} = \frac{n^2 s^2}{8g\pi^2} \left[\omega f - \sqrt{\frac{g}{r_0}} \operatorname{th} \left(\frac{fm^2 \sqrt{1+f^2} \sqrt{g}}{\rho \pi^2 \eta r_0^{9/2}} \right) \right]^2. \quad (7)$$

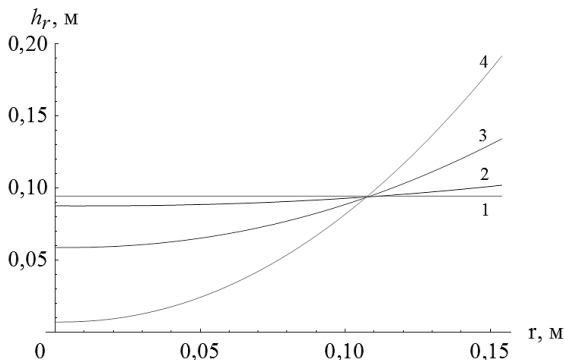
Координати верхньої та нижньої точок поверхонь матеріалу за усталеного режиму роботи відповідатимуть:

$$h_{\min(-)}^{\max(+)} = \frac{m}{\rho \pi r_0^2} \pm \frac{n^2 s^2}{16g\pi^2} \left[\omega f - \sqrt{\frac{g}{r_0}} \operatorname{th} \left(\frac{fm^2 \sqrt{1+f^2} \sqrt{g}}{\rho \pi^2 \eta r_0^{9/2}} \right) \right]^2. \quad (8)$$

На основі отриманих рівнянь запишемо шуканий вираз форми поверхні матеріалу в робочій камері за умови сталого режиму роботи порційного подрібнювача:

$$h_r = \frac{m}{\rho \pi r_0^2} - \frac{n^2 s^2}{16g\pi^2} \left[\omega f - \sqrt{\frac{g}{r_0}} \operatorname{th} \left(\frac{fm^2 \sqrt{1+f^2} \sqrt{g}}{\rho \pi^2 \eta r_0^{9/2}} \right) \right]^2 + \frac{r^2 n^2 s^2}{8g\pi^2 r_0^2} \left[\omega f - \sqrt{\frac{g}{r}} \operatorname{th} \left(\frac{fm^2 \sqrt{1+f^2} \sqrt{g}}{\rho \pi^2 \eta r_0^2 r^{5/2}} \right) \right]^2. \quad (9)$$

Графічне зображення залежності (9) наведено на рисунку 3.



обертання робочих органів відсутнє, а поверхня матеріалу паралельна поверхні дна робочої камери та обертання робочих органів. Нехтуючи об'ємом робочих органів, запишемо:

$$h_m = \frac{m}{\rho \pi r_0^2}, \quad (6)$$

де ρ – густина матеріалу, кг/м^3 ;

r_0 – найбільший радіус робочої камери, $d/2$, м.

Вираз для глибини параболическої воронки (максимальна відстань між найвищою та найнижчою точками поверхні) матеріалу в робочій камері за встановленого режиму роботи порційного подрібнювача з деякими припущеннями запишеться як:

Рис. 3. Форма поверхні матеріалу в робочій камері порційного подрібнювача:

1 – $\omega = 0 \text{ с}^{-1}$; 2 – $\omega = 50 \text{ с}^{-1}$; 3 – $\omega = 100 \text{ с}^{-1}$; 4 – $\omega = 150 \text{ с}^{-1}$

($f = 0,7$; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$; $\eta = 3 \text{ Па}\cdot\text{с}$; $m = 10 \text{ кг}$; $n = 4$; $d = 0,3 \text{ м}$; $s = 0,03 \text{ м}$; $\rho = 1500 \text{ кг/м}^3$)

Fig. 3. Form of material surface in the working chamber of the batch shredder:

1 – $\omega = 0 \text{ s}^{-1}$; 2 – $\omega = 50 \text{ s}^{-1}$; 3 – $\omega = 100 \text{ s}^{-1}$; 4 – $\omega = 150 \text{ s}^{-1}$

($f = 0.7$; $g = 9.81 \text{ m/s}^2$; $\eta = 3 \text{ Pa}\cdot\text{s}$; $m = 10 \text{ kg}$; $n = 4$; $d = 0.3 \text{ m}$; $s = 0.03 \text{ m}$; $\rho = 1500 \text{ kg/m}^3$)

Характер залежності (9), наведений на рисунку 3, свідчить про відповідність отриманої математичної моделі усталеним уявленням про розподіл сипкого середовища в робочій камері порційного подрібнювача.

Отримана модель дозволяє визначити висоту шару матеріалу в довільній точці робочої камери порційного змішувача на деякій відстані від осі обертання робочих органів та зв'язує між собою фізико-механічні властивості подрібнюваної сировини, конструкційно-технологічні параметри подрібнювача та режим його роботи.

Прийняті під час проведення теоретичних досліджень припущення свідчать про доцільність реалізації експериментальних досліджень для оцінки адекватності отриманої моделі.

Висновки. У результаті теоретичних досліджень отримано в загальному вигляді математичну модель розподілу сипкого матеріалу в циліндричній робочій камері порційного подрібнювача за сталого режиму роботи.

Прийняті під час проведення досліджень припущення свідчать про доцільність проведення експериментальних досліджень для перевірки адекватності та уточнення отриманої моделі.

Бібліографія

1. Food Science and Technology. Edited by Geoffrey Campbell-Platt. Singapore: John Wiley & Sons, 2009. 520 p.
2. Austin, L. G. A commentary on the Kick, Bond and Rittinger laws of grinding. *Powder Technology*. 1973. Vol. 7. Issue 6. Pp. 315–317.
3. Tkáčová, K., Heegn, H. & Številová, N. Energy transfer and conversion during comminution and mechanical activation. *International Journal of Mineral Processing*. 1993. Vol. 40. Issues 1–2. Pp. 17–31.
4. Lu, K., Brodsky, E. E. & Kavehpour, H. P. Shear-weakening of the transitional regime for granular flow. *Journal of Fluid Mechanics*. 2007. Vol. 587. Pp. 347–372.

5. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М.-Л.: Гостехиздат, 1950. 676 с.

6. Константинов Ю. М., Гіжа О. О. Технічна механіка рідини і газу. К.: Вища школа, 2002. 277 с.

Bibliografia

1. Food Science and Technology. Edited by Geoffrey Campbell-Platt. Singapore: John Wiley & Sons, 2009. 520 p.
2. Austin, L. G. A commentary on the Kick, Bond and Rittinger laws of grinding. *Powder Technology*. 1973. Vol. 7. Issue 6. Pp. 315–317.
3. Tkáčová, K., Heegn, H. & Številová, N. Energy transfer and conversion during comminution and mechanical activation. *International Journal of Mineral Processing*. 1993. Vol. 40. Issues 1–2. Pp. 17–31.
4. Lu, K., Brodsky, E. E. & Kavehpour, H. P. Shear-weakening of the transitional regime for granular flow. *Journal of Fluid Mechanics*. 2007. Vol. 587. Pp. 347–372.
5. Loitsianskiy L. H. Mekhanika zhidkosti i gaza. M.-L.: Gostekhizdat, 1950. 676 s.
6. Konstantinov Yu. M., Hizha O. O. Tekhnichna mekhanika ridyny i hazu. K.: Vyscha shkola, 2002. 277 s.

References

1. Food Science and Technology. Edited by Geoffrey Campbell-Platt. Singapore: John Wiley & Sons, 2009. 520 p.
2. Austin, L. G. A commentary on the Kick, Bond and Rittinger laws of grinding. *Powder Technology*. 1973. Vol. 7. Issue 6. Pp. 315–317.
3. Tkáčová, K., Heegn, H. & Številová, N. Energy transfer and conversion during comminution and mechanical activation. *International Journal of Mineral Processing*. 1993. Vol. 40. Issues 1–2. Pp. 17–31.
4. Lu, K., Brodsky, E. E. & Kavehpour, H. P. Shear-weakening of the transitional regime for granular flow. *Journal of Fluid Mechanics*. 2007. Vol. 587. Pp. 347–372.
5. Loitsyansky L. G. Fluid and gas mechanics. Moscow-Leningrad: Gostekhizdat, 1950. 676 p.
6. Konstantinov Yu. M., Giza O. O. Technical mechanics of liquid and gas. Kyiv: High school, 2002. 277 p.