

НАУМЕНКО М. М.

<https://orcid.org/0000-0002-1697-3478>e-mail: itfn@ukr.net

МИКОЛЕНКО С. Ю.

<https://orcid.org/0000-0002-1959-1141>e-mail: svetlana.mykolenko@gmail.com

ГУРІДОВА В. О.

<https://orcid.org/0000-0002-7684-5072>e-mail: guridova@ukr.net

ГЕЗЬ Я. В.

Дніпровський державний аграрно-економічний університет

<https://orcid.org/0000-0003-2173-7338>e-mail: yanavasilevna11@gmail.com

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПЕРЕМІЩЕННЯ ЗЕРНОВОЇ СИРОВИНИ ПРИ ВЗАЄМОДІЇ З ДИСПЕРГАТОРОМ І ШНЕКОВИМ ЖИВИЛЬНИКОМ

Біоактивоване дисперговане зерно, яке отримують шляхом замочування з наступним здрібненням на диспергатора, є перспективною сировиною для розширення асортименту хлібобулочних виробів і забезпечення населення продукцією з підвищеною біологічною цінністю. Задля визначення кінематичних характеристик руху зернової суміші в диспергаторі в залежності від його конструктивних характеристик і кутової швидкості шнека живильника запропоновано математичну модель переміщення зернової сировини під час подрібнення. Отримано математичні залежності для визначення швидкості процесу диспергування, які можна застосовувати з врахуванням фізичних властивостей матеріалу при стаціонарному режимі роботи диспергатора.

Ключові слова: диспергатор, біоактивоване зерно, шнек, зернова суміш, стаціонарний режим роботи, алгебраїчні залежності, кінематичні характеристики.

MYKOLA NAUMENKO, SVETLANA MYKOLENKO, VICTORIA GURIDOVA, YANA HEZ
Dnipro State Agrarian and Economic University

MATHEMATICAL MODEL OF GRAIN RAW MOVEMENT IN INTERACTION WITH DISPERSER AND SCREW FEEDER

Bioactivated dispersed grain, which is obtained by soaking followed by grinding on a dispersant is a promising raw material for expanding the range of bakery products and providing the population with products of high biological value. Bioactivation is understood as the process of grain saturation with moisture, during which the transformation of macromolecular substances into easily accessible forms takes place, which makes it a source of bioactive substances. However, the implementation of the process of dispersing bioactivated grain material remains relevant, the process of grinding which is mainly influenced by such factors as moving the grain with the help of a screw feeder and pushing it through the cutting mechanism.

To obtain dispersed grain, there are a large number of crushing machines, the main working bodies of which are the screw feeder, knives and lattice. Many scientific papers are devoted to improving the helical transport mechanism of the disperser, by changing its design, which allows to increase the homogeneity of the grain mass at the outlet, its dispersion, reduce energy consumption and increase productivity. However, the use of screw feeders for grain dispersion raises a number of issues that require further research. Namely, the study of the influence of the additional pressure required to work when loading the material on the process of its movement, and determining the speed of movement of the grain material through the cutting mechanism for grinding in the dispersant.

To address the above issues, a mathematical model for the movement of grain raw materials during grinding is proposed. Mathematical dependences for determining the speed of the dispersing process have been obtained, which can be applied taking into account the physical properties of the material in the stationary mode of operation of the dispersant.

Key words: dispersant, grain bioactivation, auger, grain mixture, stationary mode, algebraic parameters, kinematic characteristics.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Завданням харчової і переробної промисловості є забезпечення населення харчовими продуктами підвищеної біологічної цінності. На сьогодні перспективним у виробництві хлібобулочних виробів є використання біоактивованої диспергової зернової сировини [1–4]. Під біоактивацією розуміють процес насичення зерна вологою, в ході якого відбувається трансформація високомолекулярних речовин в легкодоступні форми, що і робить його джерелом біоактивних речовин [5–6]. Проте, актуальним залишається реалізація процесу диспергування біоактивованого зернового матеріалу, на процес подрібнення якого переважно впливають такі чинники, як переміщення зерна за допомогою шнекового живильника та проштовхування його крізь ріжучий механізм.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Для отримання диспергової зернової сировини існує велика кількість здрібноючих машин [7, 8], основними робочими органами яких є шнековий живильник, ножі і решітка. Багато наукових праць присвячено вдосконаленню гвинтового транспортного механізму диспергатора, за рахунок зміни його конструкції [7, 8],

що дозволяє підвищити однорідність зернової маси на виході, її дисперсність, знизити енерговитрати і підвищити продуктивність. У роботах [9–13], досліджено такі питання, як навантаження на гвинтові робочі органи, їх розрахунок і проектування. Проте, при використанні шнекових живильників для диспергування зерна виникає ряд питань, які потребують додаткових досліджень. А саме, дослідження впливу додаткового тиску, необхідного для роботи при завантаженні матеріалу на процес його переміщення, і визначення швидкості руху зернового матеріалу крізь ріжучий механізм для його подрібнення у диспергаторі. Розробка математичної моделі взаємодії зернового насипного матеріалу з елементами диспергатора в стаціонарному режимі роботи дозволила б удосконалити процес диспергування.

Формування цілей статті

В зв'язку з відміченими проблемними питаннями завданням роботи стали розробка математичної моделі взаємодії зернового матеріалу зі шнеком диспергатора в стаціонарному режимі роботи та отримання залежностей кінематичних характеристик руху зернової суміші в диспергаторі від конструктивних і кінематичних характеристик самого диспергатора.

Виклад основного матеріалу

У роботі [14] обґрунтована математична модель взаємодії зернової суміші з шнековим живильником диспергатора при перехідному режимі його роботи. При усталеній роботі диспергатора, розглядаючи рух зернової суміші як єдиного цілого, будемо вважати швидкість переміщення в осьовому напрямку сталою (V_1). При проходженні через решітку в процесі подрібнення матеріалу на виході з диспергатора швидкість зростає, приймаючи значення V_2 . Крім того вважаємо, що об'єм шнека повністю заповнений продуктом; об'єм матеріалу, що заповнює шнек на будь-якому кроці, має такі ж кінематичні характеристики, як і об'єм, що заповнює сусідній крок; крок гвинтової поверхні шнека є незмінним; під час роботи диспергатора при завантаженні забезпечується сталий тиск q (рис. 1).

Для аналізу процесу подрібнення матеріалу і для можливого його удосконалення важливо встановити залежність кінцевої швидкості V_2 від кутової швидкості шнека диспергатора ω_0 .

Застосовуючи до об'єму матеріалу, що надходить в диспергатор теорему Ейлера для суцільного середовища [15], прийдемо до рівняння:

$$-M_c V_2 + N \cos \alpha - f_1 N \sin \alpha - f_2 N_k \cos \beta + Q = 0 \quad (1)$$

де M_c – секундна маса;

V_2 – швидкість на виході з диспергатора;

N – сумарний тиск поверхні шнека на матеріал;

α – кут нахилу гвинтової лінії шнека;

f_1 – коефіцієнт тертя на поверхні шнека;

f_2 – коефіцієнт тертя на корпусі шнека;

β – кут, який утворює вектор швидкості граничної частини матеріалу з осьовим напрямком;

N_k – сумарний радіальний тиск корпусу шнека на матеріал;

Q – осьова сила від додаткового тиску q на матеріал.

За відомого додаткового тиску q при подачі матеріалу на шнек осьову силу Q визначатимемо як

$$Q = q\pi \frac{D^2 - d^2}{4},$$

де D – внутрішній діаметр корпусу шнека;

d – діаметр вала шнека (рис. 1)

Радіальна сила N_k буде залежати від додаткового тиску N_q , від відцентрової сили N_ω та від сили ваги P .

Силу N_q будемо визначати як

$$N_q = q \cdot \pi \cdot D \cdot l,$$

де l – довжина корпусу.

Відцентрова сила

$$N_\omega = m \cdot \omega^2 \cdot R,$$

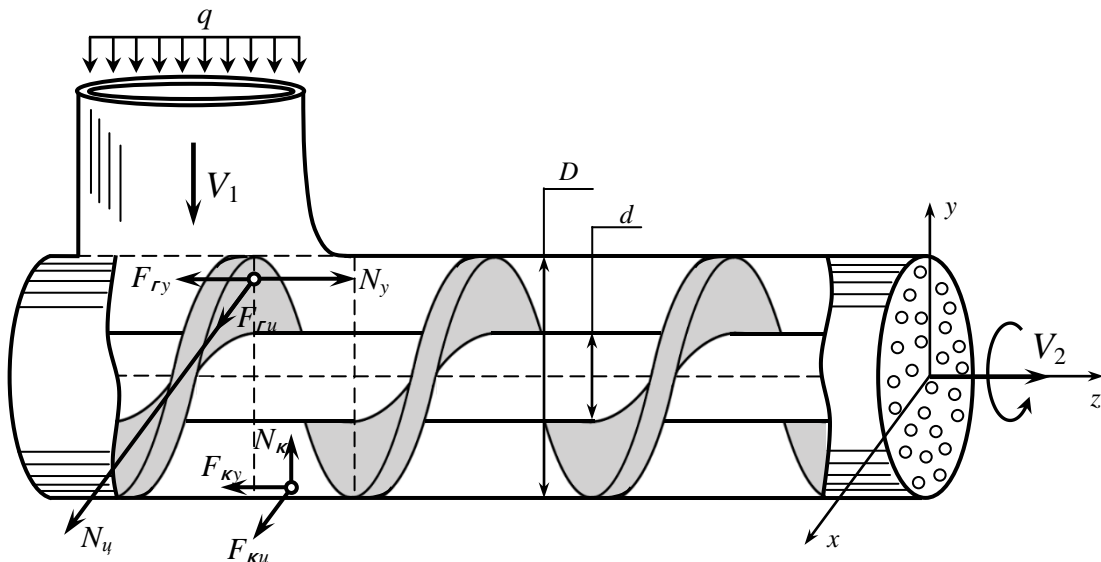


Рис. 1. Диспергатор

де m – маса матеріалу в диспергаторі ($m = \gamma \cdot l \cdot \frac{D^2 - d^2}{4}$);

ω – кутова швидкість матеріалу;

R – середній радіус об'єму матеріалу в диспергаторі ($R = \frac{D+d}{2}$).

Вагу матеріалу визначаємо як

$$P = \gamma \cdot g \cdot \pi \left(\frac{D^2 - d^2}{4} \right),$$

де γ – густина суміші;

g – прискорення вільного падіння.

Таким чином сила тертя, що виникає при взаємодії матеріалу з корпусом наближено можна визначити як

$$N_k = f(N_q + N_\omega + P)$$

При визначенні швидкості руху суміші в осьовому напрямі V_1 прийемо до уваги, що вона забезпечується робочою поверхнею шнека живильника. За умови, що суміш рухається тільки в осьовому напрямі за один оберт шнека з кутовою швидкістю ω_0 осьове переміщення матеріалу зі швидкістю V_1 складатиме один крок шнека h , що дає можливість отримати співвідношення

$$\frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{V_1}{h} \tag{2}$$

Враховуючи, що насипний матеріал обертається з кутовою швидкістю ω співвідношення (2) прийме вигляд

$$\frac{\omega_0 - \omega}{2\pi} = \frac{V_1}{h},$$

звідки

$$V_1 = \frac{(\omega_0 - \omega) \cdot h}{2\pi} \tag{3}$$

Враховуючи викладене для кута β прийдемо до співвідношень

$$\cos \beta = \frac{V_1}{\sqrt{V_1^2 + \frac{\omega^2 \cdot D^2}{4}}} \quad \text{і} \quad \sin \beta = \frac{\omega \cdot D}{2 \cdot \sqrt{V_1^2 + \frac{\omega^2 \cdot D^2}{4}}}$$

або

$$\cos \beta = \frac{2V_1}{\sqrt{4V_1^2 + \omega^2 \cdot D^2}} \quad \text{і} \quad \sin \beta = \frac{\omega \cdot D}{\sqrt{4V_1^2 + \omega^2 \cdot D^2}}$$

Приймаючи до уваги усталений рух потоку матеріалу в живильнику, складемо рівняння рівноваги моментів сил прикладених до масиву відносно осі обертання:

$$N \sin \alpha R + fN \cos \alpha R - N_k \sin \beta \frac{D}{2} = 0 \quad (4)$$

Залежність швидкостей V_1 і V_2 впливає з умови нерозривності потоку Бернуллі, згідно з якою

$$S_1 V_1 = S_2 V_2,$$

де S_1 – площа поперечного перерізу об'єму матеріалу в диспергаторі; S_2 – площа поперечного перерізу потоку при проходженні через решітку.

Тоді

$$V_2 = \frac{S_1}{S_2} V_1 = \frac{S_1}{S_2} \cdot \frac{(\omega_0 - \omega)}{2\pi} \cdot h \quad (5)$$

Підставляючи вирази для V_1 і V_2 з формул (3) і (5) в рівняння (1) отримаємо

$$-\gamma \frac{S_1^2}{S_2} \cdot \frac{(\omega_0 - \omega) \cdot h^2}{4\pi^2} + N \cos \alpha - fN \cdot \sin \alpha - f_2 N_k \cos \beta + Q = 0 \quad (6)$$

Сумісний розв'язок рівнянь (4) і (6) дає можливість знаходити кутову швидкість ω та швидкості V_2 і V_1 в залежності від кутової швидкості шнека і параметрів конструкції диспергатора.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Рух продукту в шнековому диспергаторі визначається як конструктивними і кінематичними характеристиками живильника, так і фізичними властивостями частинок матеріалу, що обробляється. Розроблено і запропоновано математичну модель, що дозволяє аналізувати кінематичні характеристики руху зернової суміші в диспергаторі в залежності від його конструктивних характеристик та кутової швидкості шнека живильника.

Для стаціонарного режиму роботи отримані достатньо прості алгебраїчні залежності, що дозволяють визначати швидкість диспергування за відомих фізичних властивостей матеріалу. Дослідження руху суміші в диспергаторі дає можливість підбирати раціональні характеристики диспергатора для забезпечення його ефективної роботи.

Література

1. Mykolenko S., Hez Y., Pivovarov O. Effect of bioactivated amaranth grain on the quality and amino acid composition of bread. *Ukrainian Food Journal*. 2021. Vol. 10. Iss. 3. P. 576–591.
2. Guardianelli L.M., Salinas M.V., Puppo M.C. (2021), Quality of wheat breads enriched with flour from germinated amaranth seeds, *Food Science and Technology International*, 0(0), pp. 1–9.
3. Pivovarov A., Mykolenko S., Hez, Y., Shcherbakov S. (2018), Plasma-chemically activated water influence on staling and safety of sprouted bread, *Journal of Food Science and Technology-Ukraine*, 12(2), pp. 100–107.
4. Guardianelli L.M., Salinas M.V., Puppo M.C. (2019), Hydration and rheological properties of amaranth-wheat flour dough: Influence of germination of amaranth seeds. *Food hydrocolloids*. 97(2). P. 1–26.
5. Platel K., Krishnapura Srinivasan K. (2016), Bioavailability of Micronutrients from Plant Foods: An Update, *Food Science and Nutrition*, 56(10), pp. 1608–1619.
6. Wojnanska T. (2002), The use of spelt wheat (*Triticum spelta* L.) for baking applications, *Rostlinna Vyroba*, 48, pp. 141–147. <https://doi.org/10.17221/4212-pse>
7. Акимов М.З., Момотюк С.Н., Светайло Ю.А. Измельчитель пищевых продуктов: пат. 2121399, Российская федерация: МПК В02С18/30. заявл. 29.12.1997; опубл. 10.11.1998.
8. Жикленков В.К., Корсакова Г.А., Третьяков И.Ф. Устройство для приготовления тестовой массы из зерна : пат. 2156065, Российская федерация, МПК А21С1/12, В02С18/30. заявл. 22.02.2000; опубл. 20.09.2000.
9. Гевко І. Б. Гвинтові транспортно-технологічні механізми: розрахунок і конструювання / І. Б. Гевко. – Тернопіль : ТДТУ ім. Ів. Пулюя, 2008. – 307 с.
10. Рогатинський Р. М. Дослідження крутильних коливань шнека у випадку дії імпульсних сил / Р. М. Рогатинський, І. Б. Гевко, А. Е. Дячун // Науковий вісник НГУ. – 2015. – № 5. – С. 64–68.
11. Грудовий Р. С. Моделювання характеру навантаження на гвинтові робочі органи / Р. С. Грудовий // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин : загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб. Кіровоград, КНТУ. – 2012. – № 42. – С. 171–181.
12. Nevko R.B., Zalutskyi S.Z., Tkachenko I.G., et al. Development and investigation of reciprocating screw with flexible helical surface. *INMATEH Agricultural Engineering*. 2015. Vol. 46. № 2. P.133–138.
13. Newko V.M., Popovich P.V., Diachun A.Y., et al. The study of bulk material kinematics in a screw conveyor-mixer. *INMATEH Agricultural Engineering*. 2015. Vol. 47 Iss. 3. P. 156–163.
14. Обґрунтування математичної моделі взаємодії зернової сировини з шнековим живильником при диспергуванні / М. М. Науменко [та ін.] // Праці ТДАТУ. – 2012. – Т. 1, № 21. – С. 101–108.

References

1. Mykolenko S., Hez Y., Pivovarov O. Effect of bioactivated amaranth grain on the quality and amino acid composition of bread. *Ukrainian Food Journal*. 2021. Vol. 10. Iss. 3. P. 576–591.
2. Guardianelli L.M., Salinas M.V., Puppo M.C. (2021), Quality of wheat breads enriched with flour from germinated amaranth seeds, *Food Science and Technology International*, 0(0), pp. 1–9
3. Pivovarov A., Mykolenko S., Hez, Y., Shcherbakov S. (2018), Plasma-chemically activated water influence on staling and safety of sprouted bread, *Journal of Food Science and Technology-Ukraine*, 12(2), pp. 100–107.
4. Guardianelli L.M., Salinas M.V., Puppo M.C. (2019), Hydration and rheological properties of amaranth-wheat flour dough: Influence of germination of amaranth seeds. *Food hydrocolloids*. 97(2). P. 1–26.
5. Patel K., Krishnapura Srinivasan K. (2016), Bioavailability of Micronutrients from Plant Foods: An Update, *Food Science and Nutrition*, 56(10), pp. 1608–1619.
6. Bojnanska T. (2002), The use of spelt wheat (*Triticum spelta* L.) for baking applications, *Rostlinna Vyroba*, 48, pp. 141–147. [https://doi: 10.17221/4212-pse](https://doi.org/10.17221/4212-pse)
7. Akimov M.Z., Momotyuk S.N., Svetajlo Yu.A. Izmelchitel pishevyyh produktov: pat. 2121399, Rossijskaya federaciya: MPK B02C18/30. zayavl. 29.12.1997; opubl. 10.11.1998.
8. Zhiklenkov V.K., Korsakova G.A., Tretyakov I.F. Ustrojstvo dlya prigotovleniya testovoj massy iz zerna : pat. 2156065, Rossijskaya federaciya, MPK A21C1/12, B02C18/30. zayavl. 22.02.2000; opubl. 20.09.2000.
9. Hevko I. B. Hvyntovi transportno-tekhnolohichni mekhanizmy: rozrakhunok i konstruiuvannia / I. B. Hevko. – Ternopil : TDTU im. Iv. Puliuia, 2008. – 307 s.
10. Rohatynskyi R. M. Doslidzhennia krutylnykh kolyvan shneka u vypadku dii impulsnykh syl / R. M. Rohatynskyi, I. B. Hevko, A. E. Diachun // *Naukovyi visnyk NHU*. – 2015. – № 5. – S. 64–68.
11. Hrudovyi R. S. Modeliuvannia kharakteru navantazhennia na hvyntovi robochi orhany / R. S. Hrudovyi // *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn: zahalnodierzh. mizhvid. nauk.-tekhn. zb. Kirovohrad, KNTU*. – 2012. – № 42. – S. 171–181.
12. Development and investigation of reciprocating screw with flexible helical surface / Hevko R.B., Zalutskyi S.Z., Tkachenko I.G., et al // *INMATEH Agricultural Engineering*. 2015. Vol. 46. № 2. P.133–138.
13. The study of bulk material kinematics in a screw conveyor-mixer / Hewko B.M., Popovich P.V., Diachun A.Y., et al // *INMATEH Agricultural Engineering*. 2015. Vol. 47 Iss. 3. P. 156–163.
14. Obgruntuvannia matematychnoi modeli vzaiemodii zernovoi syrovyny z shnekovym zhyvlynykom pry dysperhuvanni / M. M. Naumenko [ta in.] // *Pratsi TDATU*. – 2012. – T. 1, № 21. – S. 101–108.
15. Pavlovskyi M. A. Teoretychna mekhanika / M. A. Pavlovskyi. – Kyiv : Tekhnika, 2002. – 497 s.