

Солона О. В.

Котов Б. І.

Спирін А. В.

*Вінницький  
національний аграрний  
університет*

Калініченко Р. А.

*Національний  
університет  
біоресурсів і  
природокористування  
України*

Solona O. V.

Kotov B. I.

Spirin A. V.

*Vinnitsia National  
Agrarian University*

Kalinichenko R. A.

*National University of Life  
and Environmental  
Sciences of Ukraine*

**УДК 631.363**

## **ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПОЄДНАНИХ ПРОЦЕСІВ МІКРОНІЗАЦІЇ І ПОДРІБНЕННЯ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ВІБРАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПРИ ПЕРЕРОБЦІ ЗЕРНА НА КОРМ**

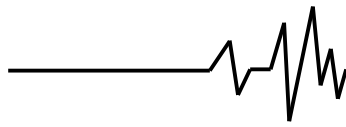
*Приведено аналіз теоретичних і експериментальних досліджень технологічних операцій мікронізації, вібротранспортування і віброподрібнення зерна при його переробці на комбікорм. Отримані математичні залежності які характеризують динаміку і статичку процесів інфрачервоного нагрівання зерна в процесі вібраційного переміщення і подрібнення матеріалу у вібраційному млині. Наведені формули і методику визначення конструкційних і режимних параметрів технологічного устаткування можна використовувати для обґрунтування раціональних режимів роботи, як окремих апаратів так і технологічних ліній мікронізації, вібротранспортування і віброподрібнення зернового матеріалу при переробці його на корм.*

**Ключові слова:** *вібротранспортування, віброподрібнення, зерно, комбікорм.*

**Вступ.** Поживна цінність зернової частини комбікормів в значній мірі залежить від якості попередньої підготовки (нагрівання, зволоження, плющення, подрібнення та їх комбінацій). Із вивчених способів обробки зерна при виробництві комбікормів і підготовки до згодовування, одним із найбільш ефективних є мікронізація – обробка зерна високо інтенсивним інфрачервоним (ІЧ) випромінюванням із подальшим подрібненням. За допомогою таких процесів забезпечується висока якість готових кормів: збільшується їх поживність, перетравність, згодовуваність, в тому числі за рахунок збільшення пористості і питомої поверхні готового продукту. Але впровадження цих процесів стримується незначною продуктивністю і значними енерговитратами технологічного обладнання. Мікронізація реалізується на стрічкових транспортерах при розміщенні зерна в моношарі (шар в одне зерно), що обумовлює малу продуктивність і перевитрати енергії за рахунок збільшення витрат теплоти.

Подрібнення здійснюється молотковими дробарками з енергетичним к.к.д. порядку 40%, оскільки, більшість енергії витрачається циркуляцією повітря і рециркуляцією зерна. Для підвищення ефективності процесів переробки зерна на корм доцільно використовувати новітні вібраційні технології (вібраційне транспортування зерна при ІЧ-опроміненні в режимі інтенсивного перемішування і наступне подрібнення у вібраційних млинах). Для практичної реалізації зазначених операцій в одній лінії переробки необхідно виявити кінетичні параметри окремих операцій для суміщення операцій в часі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В сучасній літературі існує достатньо наукових праць [1,8] в яких обґрунтовано технологічну і енергетичну доцільність використання ІЧ-випромінювання для нагріву [6], сушіння [2] і мікронізації зерна [4] з метою підвищення якісних показників і споживчої вартості продуктів переробки. Використання ІЧ-опромінювання дозволяє



сумістити в одному процесі зневоднення зерна [3], його знезаражування [5], зміну фізико-механічної структури [2,7], в напрямку зменшення міцності зернівок, що дозволяє суттєво зменшити затрати на подрібнення [7].

Зменшення зусиль на подрібнення матеріалу обумовлює доцільність використання одного із прогресивних типів подрібнювачів – вібраційних млинів [8,9], які мають високу продуктивність, малі енерговитрати і високі технологічні можливості.

**Мета роботи і завдання** – отримання і аналіз формул для розрахунку основних параметрів технологічних операцій мікронізації, вібротранспортування і віброподрібнення зернового матеріалу при переробці його на корм.

**Результати досліджень.** При складанні математичного опису фізичної сторони процесу термічної обробки зерна ІЧ-випромінюванням із врахуванням конструктивних особливостей мікронізатора використано загальноприйняті спрощуючі припущення і теоретичні посилання. Оскільки використовується вібраційне переміщення (в режимі з відривом частинок від поверхні) теплопередачею зерна до поверхні нехтуємо. Ефекти прямого і зворотного випромінювання і

теплопровідність середовищ враховується в коефіцієнтах теплообміну, які прийнято незмінними в часі. Нагрівання зернівок – безградієнтне. Інтенсивність випаровування вологи прийнято пропорціонально швидкості нагрівання матеріалу і визначається з критерію

$$\text{Рейндера: } Rb = \frac{cd\theta}{rdU}.$$

Для лінеаризації нелінійної складової радіаційного теплового балансу використаємо рівняння [6]:

$$\begin{aligned} Q_{\text{вип}} &= c_{np} (T_1^4 - T_2^4) = \\ &= c_{np} (T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)(\theta_1 - \theta_2) = \alpha_v (\theta_1 - \theta_2) \end{aligned} \quad (1)$$

де  $T_1, (\theta_1)$ ,  $T_2, (\theta_2)$  – температури тіл, що обмінюються енергією,

$c_{np}$ ,  $\alpha_v$  – приведений коефіцієнт випромінювання і лінеаризований коефіцієнт теплообміну випромінюванням.

За наведених припущень вихідна система диференціальних рівнянь, що описує нестационарний процес інфрачервоного нагрівання може бути представлена у вигляді:

$$m_w \cdot c_w \cdot \frac{\partial \theta_w}{\partial \tau} = \alpha_w \cdot F_w (\theta_z - \theta_w) - \alpha_v \cdot F'_w (\theta_w - t_v) + P_H, \quad (2)$$

$$m'_z \cdot c'_z \cdot \frac{\partial \theta_z}{\partial \tau} + l \cdot G_z \cdot c'_z \cdot \frac{\partial \theta_z}{\partial x} = A_\lambda \cdot \alpha_w \cdot F_w (\theta_w - \theta_z) - m_{zo} \cdot r \cdot \frac{\partial u}{\partial \tau} - \alpha'_v \cdot F'_z F'_w (\theta_z - t_v), \quad (3)$$

Введемо такі позначення:

$$T_w = \frac{m_w C_w}{\alpha_w F_w}; \quad T_z = \frac{m'_z C'_z Rb + m_{zo} C'_z}{Rb \cdot A_\lambda \cdot \alpha_w \cdot F_w}; \quad T_x = \frac{G_z C'_z \tau}{A_\lambda \cdot \alpha_w \cdot F_w}; \quad (4)$$

$$a_1 = 1 + \frac{\alpha_v F'_w}{\alpha_w F_w}; \quad b_1 = \frac{\alpha_v F'_w}{\alpha_w F_w} t_w + \frac{P_H}{\alpha_w F_w}; \quad a_2 = 1 + \frac{\alpha'_v F'_z}{A_\lambda \cdot \alpha_w \cdot F_w}; \quad b_2 = \frac{\alpha'_v F'_z}{A_\lambda \alpha_w F_w} t_v$$

Тоді систему рівнянь (2)–(3) з урахуванням позначень (4) перепишемо в такому вигляді:

$$T_w \frac{\partial \theta_w}{\partial \tau} = \theta_z - a_1 \theta_w + b_1, \quad (5)$$

$$T_z \frac{\partial \theta_z}{\partial \tau} = \theta_w - a_2 \theta_z + b_2 - T_x \frac{\partial \theta_z}{\partial x}. \quad (6)$$

Оскільки система рівнянь (5) – (6) строгого аналітичного розв'язку не має будемо використовувати наближені рішення. При

сталому режимі  $\left( \frac{\partial \theta_w}{\partial \tau} = 0, \frac{\partial \theta_z}{\partial \tau} = 0 \right)$  із системи рівнянь (5) – (6) отримаємо:

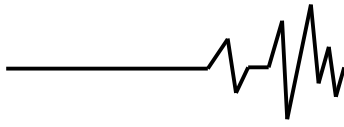
$$T_x \frac{d\theta_z}{dx} = a - b\theta_z \quad (7)$$

$$\text{де } a = \frac{b_1}{a_1} + b_2; \quad b = a_2 - \frac{1}{a_1}.$$

Розв'язок рівняння (7) при граничних

умовах:  $x=0$ ;  $\theta_z = \theta_{z1}$  (де  $\theta_{z1}$  – значення

температури зерна на вході в установку) запишемо так:



$$\theta_z(x) = \frac{a}{b} - \left( \frac{a}{b} - \theta_{z1} \right) \cdot e^{-\frac{b}{T_x} x} \quad (8)$$

Похідна від  $\theta_z(x)$ :

$$\frac{\partial \theta_z}{\partial x} = \frac{(a - b\theta_{z1})}{T_x} \cdot e^{-\frac{b}{T_x} x} \quad (9)$$

Підставляючи значення  $\left( \frac{d\theta_z}{dx} \right)$  в рівняння

(6) будемо мати:

$$A \frac{d^2 \theta_w(\tau)}{d\tau^2} + B \frac{d\theta_w(\tau)}{d\tau} + C \theta_w(\tau) = D_2(P_w, x) \quad (11)$$

де  $A = T_w T_z$ ;  $B = a_1 T_z + a_2 T_w$ ;  $C = (a_1 a_2 - 1)$ ;  $D_1 = a_2 b_1 + b_3(x) \cdot a_1$ ;  $D_2 = a_2 b_1 + b_3(x)$

Припускаючи, що характеристичні рівняння вихідних однорідних рівнянь мають дійсні і різні корні  $r_1, r_2$ , загальне рішення (11) запишемо у вигляді:

$$\theta_z(\tau, x) = C_1 e^{r_1 \tau} + C_2 e^{r_2 \tau} + \frac{D_1(x)}{C} \quad (11a)$$

$$\theta_w(\tau, x) = C_1' e^{r_1 \tau} + C_2' e^{r_2 \tau} + \frac{D_2(x)}{C} \quad (11b)$$

$$\begin{cases} T_z \frac{\partial \theta_z}{\partial \tau} = \theta_w - a_2 \theta_z + b_3(x) \\ b_3(x) = b_2 - \frac{1}{T_x} (a - b\theta_{z1}) e^{-\frac{b}{T_x} x} \end{cases} \quad (10)$$

Розв'язуючи систему рівнянь (6) і (10) відносно  $\theta_z(\tau, x)$  і  $\theta_w(\tau, x)$  отримаємо диференціальні рівняння, що описують перехідні процеси у випромінювачі і шарі зерна, з урахуванням розподілу температури за координатою.

$$\text{де } r_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{B^2 - 4ac}}{2A}$$

Графічна інтерпретація рівнянь (11a) і (11b) для інфрачервоного нагріву насіння ріпаку, наведена на Рис. 1 і Рис. 2.

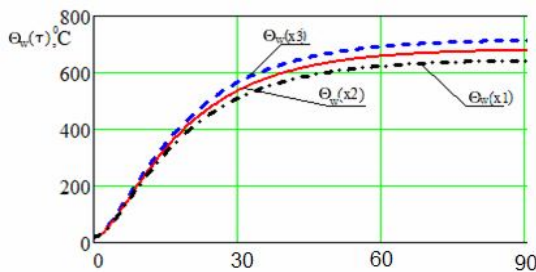


Рис. 1. Зміна температури інфрачервоного нагрівача за часом і координатою в напрямку руху

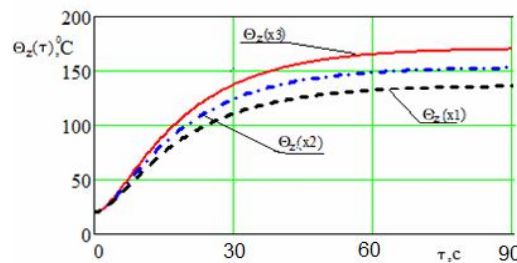


Рис. 2. Зміна температури шару зернового матеріалу за часом і координатою в напрямку руху

Експозиція ІЧ-обробки зерна є фактором що визначає швидкість переміщення зерна при вібраційному транспортуванні. Для підвищення ефективності обробки під час транспортування у шарі висотою 10–12мм доцільним є переміщення з відривом від поверхні (підкидання зернин), що забезпечує їх інтенсивне перемішування. Враховуючи певні труднощі аналітичного визначення швидкості переміщення зерна в шарі, використано метод

статистичного експерименту даних представлених в [10]. Обробка результатів даних натурних експериментів дозволила отримати регресійну математичну залежність середньої швидкості переміщення зерна на вібраційному транспортері мікронізатора від визначальних факторів: амплітуди і частоти вібрацій, куту нахилу, висоти шару і вологості зерна у вигляді:

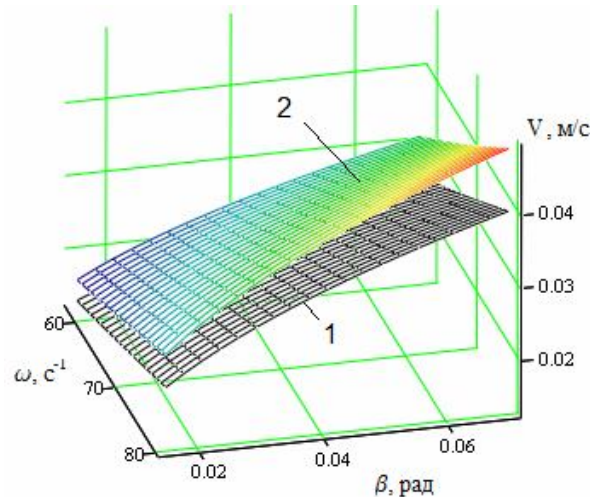
$$V(h, \beta, W, \omega) = 0,0424 - 2,9789h + 0,6301\beta - 0,1257W + 0,0003\omega + 74,5977h^2 - 2,6729\beta^2 + 0,239W^2 + 0,0032\beta\omega - 0,0006W\omega - 15,0429h\beta \quad (12)$$



де  $h$  – висота шару зерна, м;  $\beta$  – кут нахилу, рад;  $W$  – вологість зерна кг/кг;  $\omega$  – частота коливань,  $c^{-1}$ .

На рис.3. наведено залежність швидкості переміщення зерна в мікронізаторі шаром 12

мм від частоти коливань (регулюєма змінна) і кута нахилу транспортера для різних значень вологості матеріалу.



**Рис. 3. Залежність середньої швидкості вібротранспортування від нахилу вібруючої поверхні  $\beta$  і кутової частоти коливань  $\omega$  (1– $W=25\%$ , 2– $W=15\%$ )**

Для використання вібраційного млина при наступному (після термообробки) подрібненні необхідно узгодження продуктивності процесів мікронізації і подрібнення зернового матеріалу. За результатами експериментальних

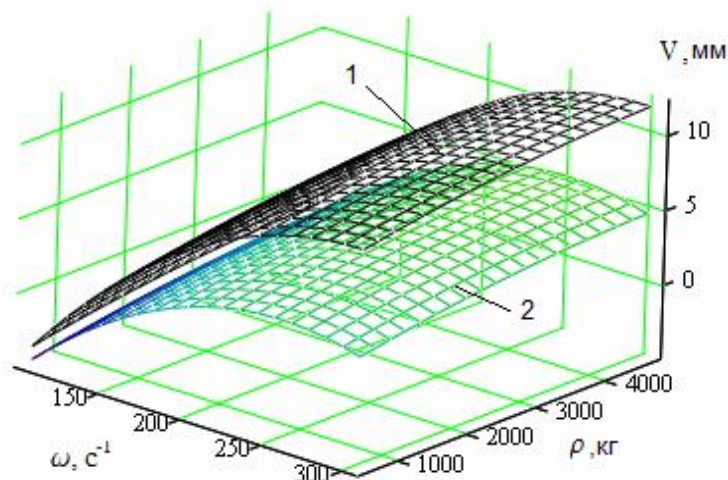
досліджень [9] отримана математична модель, що описує залежність швидкості транспортування (завантаження) від режимних параметрів і властивості (густини) матеріалу яку можна представити у вигляді:

$$V_n = -27.67 + 0.16\omega + 11.25A + 1.044 \cdot 10^{-3} \rho + 0.0157\omega A - 3.44 \cdot 10^{-4} \omega^2 - 3.11A^2 - 9.9 \cdot 10^{-8} \rho^2 \quad [13]$$

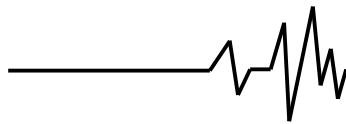
де  $A$ ,  $\omega$  – амплітуда і частота вібрацій,  $\rho$  – насипна густина робочого середовища.

На рис.4. наведена графічна залежність швидкості переміщення робочого середовища у

камері вібраційного млина від визначальних параметрів  $A$  та  $\omega$  (параметр, що регулюється) для різного типу матеріалу завантаження.



**Рис. 4. Залежність швидкості переміщення робочого середовища (1– $A=3\text{мм}$ , 2– $A=1\text{мм}$ )**



Для визначення робочих параметрів обладнання технологічної лінії переробки зернової сировини на корм необхідне узгодження продуктивності мікронізатора і подрібнювача.

Продуктивність процесу мікронізації визначається із співвідношення:

$$G_m = \frac{h_m \cdot B \cdot L \cdot \rho_z}{\tau} = h_m \cdot B \cdot V_m \quad (14)$$

де  $h$ ,  $B$ ,  $L$  – висота, ширина шару зерна на транспортері довжиною  $L$ ,  $\rho$  – експозиція мікронізації (час опромінення).

Швидкість переміщення зерна в мікронізаторі дорівнює:

$$V_m = \frac{L}{\tau} = f(A, \omega, h, \beta) \quad (15)$$

Величина експозиції визначається із графіка рис.2. При визначеному значенні  $\tau$ , визначається швидкість переміщення зерна  $V_m$ , а із графіка рис.3 - параметри  $\omega$  та  $\beta$  при яких забезпечується процес переміщення із вибраною швидкістю.

Продуктивність вібраційного млина можна розрахувати за очевидним співвідношенням:

$$Q = V_m \cdot S \cdot \rho \quad (16)$$

де  $V_m$  – швидкість транспортування,  $S$  – площа поперечного перерізу завантаження в омелній камері,  $\rho$  – насипна густина завантаженого зерна.

За значеннями продуктивності попереднього апарату, насипної густини «робочого тіла»  $\rho$ , об'єму камери помелу і ступеню її заповнення, що визначається величиною  $S$ , визначають необхідну швидкість переміщення:

$$V_n = \frac{Q}{S \cdot \rho} = V_n(A, \omega) \quad (17)$$

і кінематичні параметри віброзбудників, що забезпечують отриману величину (з рис.4.).

Таким чином використовуючи отримані аналітичні і графічні залежності можна визначити конструктивні і режимні параметри обладнання і узгодити їх за продуктивністю.

**Висновки.** Отримані математичні залежності що характеризують динаміку і статику процесів інфрачервоного нагрівання зерна в процесі вібраційного переміщення і подрібнення матеріалу у вібраційному млині, які можна використовувати для обґрунтування параметрів обладнання. Це стосується як окремих апаратів так і їх поєднання в складі технологічних ліній.

### Список використаних джерел

1. Гулавський В.Т. Научные основы применения различных видов ВТО при преработке зерна /В.Т.Гулавський// Зернові продукти і комбікорми. – 2014 – №3. – С. 27-37.

2. Елькин Н.В. Высокотемпературные инфракрасные технологии нового тысячелетия /Н.В.Елькин. В.В.Кудряшкин // Хранение и переработка зерна. – 2002. – №9. – с.47-50.

3. Поперечний А.М. Кінетика процесу сушіння плодівих кісточок у віброкиплячому шарі при інфрачервоному нагріванні / А.М.Поперечний, Н.О.Миронова // Вісник харківського національного технічного університету сільського господарства. Х. – 2007. – Вип. 58. – с. 122-129.

4. Плавінська С.В. Мікронізація бобів сої – перспективний метод отримання якісного продукту для кормоприготування / С.В.Плавінська // Сучасне птахівництво. – 2011. – №11/12. – с. 26-28.

5. Герещенко Б.О. Применение инфракрасного облучения для обеззараживания зерна при хранении / Б.О.Герещенко, Т.А.Токарчук, О.А.Анаевич // Хранение и переработка зерна. – 1998. – №6. – с. 36-37.

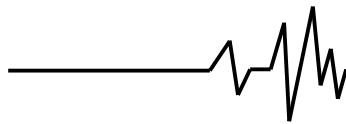
6. Котов Б. І. Аналітичне дослідження перехідних режимів нагрівання зерна в електротерморадіаційних установках безперервної дії / Б. І. Котов, Р. А. Калініченко, В.В. Кифяк // Вісник Харківського технічного університету сільського господарства. – 2012. вип. 131. – с. 57-65.

7. Крикунова Л.Н. Влияние ИК-обработки зерна пшеницы и ржи на параметры его измельчения / Л.Н.Крикунова, Т.В. Андриенко, В.Я. Черных и др. // Известия ВУЗ-ов. Пищевая технология. – 2007. – №4. – с. 76-77.

8. Солоня О.В. Вібраційні млини для помелу матеріалів сільськогосподарського виробництва /О.В.Солоня, Д.А.Білик //Вібрації в техніці і технологіях. 2013. – №2. – с. 196-199.

9. Солоня О.В. Вібраційні млини з просторово-циркуляційним рухом завантаження для тонкого помелу сипких матеріалів. Монографія. Вінниця. РВВ ВДАУ. – 2008. – 133 с.

10. Мишуров Н.П. Совершенствование инженерно-технического обеспечения молочных ферм на основе комплексной энергетической оценки: науч. изд. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2011. – 120 с.

**Список джерел в транслітерації**

1. Gulavskyiy V.T. Nauchnye osnovy primeneniya razlichnyh vydiv VTO pry pererabotke zerna / V.T. Gulavskyiy // Zernovy producty i kombikormi. – 2014 – №3. – S. 27-37.

2. Elykin N.V. Vysokotemperaturnye infrakrasnye technology novogo tysyacheletiya / N.V. Elykin. V.V. Kudryashkin // Hranenie i pererabotka zerna. – 2002. – №9. – s. 47-50.

3. Poperechniy A.M. Kinetika procesu sushinnya plodovyh kistochok v vibrokipliyachomu shari pry infrachervonomu nagrivanii / A.M. Poperechniy, N.O. Mironova // Visnik harkivskogo natsionalnogo tehnicnogo universitetu silyskogo gospodarstva. H. – 2007. – Vip. 58. – s. 122-129.

4. Plavinskya S.V. Mikronizatsiya bobiv soi - perspektivniy method otrimannya yakisnogo produktu dlya kormoprigotuvannya / S.V. Plavinskya // Suchasne ptahivnitstvo. – 2011. – №11 / 12. – s. 26-28.

5. Gereshtenko V.B. Primenenie infrakrasnogo oblucheniya dlya obezrazhivaniya zerna pry hranenii / V.B. Gereshtenko, T.A. Tokarchuk, O.A. Anaevich // Hranenie i pererabotka zerna. – 1998. – №6. – s. 36-37.

6. Kotov B. I. Analitichne doslidzhennya perehidnih rezhimiv nagrivannya zerna v elektrotermoradiatsiynih ustanovkah bezpererivnoї diї / B. I. Kotov, R. A. Kalinichenko, V.V. Kifyak // Visnik Harkivskogo tehnicnogo universitetu silyskogo gospodarstva. – 2012. vip. 131 – s. 57-65.

7. Krikunova L.N. Vliyanie IK-obrabotki zerna pshenitsy i rzhi na parametry ego izmelycheniya / L.N. Krikunova, T.V. Andrienko, V.Ya. Chernyh i dr. // Izvestia universities ov. Pishtevaya technology. – 2007. – №4. – s. 76-77.

8. Solona O.V. Vibratsiyni mlyn dlya pomelu materialiv silyskogospodarskogo virobnitstva / O.V. Solona, D.A. Bilik // Vibratsii v tehni i tehnologiyah. – 2013. – №2. – s. 196-199.

9. Solona O.V. Vibratsiyni mlyn z prostorovo-tsirkulyatsiynim ruhom zavantazhennya dlya tonkogo pomolu sipkih materialiv. Monografiya. Vinnitsya. PBB VDAU. – 2008. – 133 s.

10. Mishurov N.P. Sovershenstvovanie inzhenerno tehniceskogo obespecheniya molochnyh ferm na osnove complexnoy energeticheskoy ocenki: Nauch. izd. – M.: FGBNU "Rosinformagroteh", 2011. – 120 p.

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ  
ОБЪЕДИНЕННЫХ ПРОЦЕССОВ  
МИКРОНИЗАЦИИ И ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ С  
ПРИМЕНЕНИЕМ ВИБРАЦИОННЫХ  
ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ  
ЗЕРНА НА КОРМ**

**Аннотация.** Приведен анализ теоретических и экспериментальных исследований технологических операций микронизации, вибротранспортирования и виброизмельчения зерна при его переработке на комбикорм. Получены математические зависимости характеризующие динамику и статику процессов инфракрасного нагрева зерна в процессе вибрационного перемещения и измельчения материала в вибрационной мельнице. Приведенные формулы и методика определения конструкционных и режимных параметров технологического оборудования можно использовать для обоснования рациональных режимов работы, как отдельных аппаратов так и технологических линий микронизации, вибротранспортирования и виброизмельчения зернового материала при переработке его на корм.

**Ключевые слова:**

вибротранспортирование, виброизмельчение, зерно, комбикорм.

**SUBSTANTIATION OF PARAMETERS  
COMBINED PROCESSES OF GRINDING AND  
MICRONIZATION USING VIBRATION  
TECHNOLOGY IN THE PROCESSING OF  
GRAIN TO FEED ANNOTATION**

**Annotation.** Carries out the analysis of theoretical and experimental studies of technological operations micronization, vibration and vibration transporting grain refinement during its processing in the feed. The mathematical dependences describing the static and dynamic processes of the infrared heating of grain in the process of vibrational displacement and comminution material in a vibratory mill. These formulas and the method of determining the structural and regime parameters of the process equipment can be used to justify the rational operating modes as separate devices and technological lines micronization vibro transportation and vibration grinding grain material in the processing of his feed.

**Key words:** vibrating transport, vibration grinding, grain, feed.