

## АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ ЗЕРНА

**В.П. Ковбаса, д.т.н., проф., В.О. Соломка, к.т.н., доцент, О.В. Соломка, асистент**

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

*В статті розглянуті основні проблеми та наведені результати аналітичних досліджень процесу подрібнення зернових матеріалів шляхом прикладання ударних навантажень в експериментальному подрібнювачі.*

Постановка проблеми. Подрібнення зернових матеріалів – складний процес, який залежить від ряду факторів: фізико-механічних властивостей матеріалів, конструкції, режимів роботи, стану та форми робочих органів подрібнювачів. На сьогоднішній день відсутня чітка картина протікання процесу подрібнення зернових матеріалів в робочій камері подрібнювача, незалежно від його конструкції та режимів роботи.

Основним принципом роботи дробарок молоткового типу є руйнування зернини в результаті вільного удару по ній робочої поверхні шарнірного молотка. Теоретичні основи цього принципу можна застосувати і для аналізу розробленого подрібнювача з врахуванням жорсткого закріплення лопатки на диску і фіксованого кута нахилу робочої поверхні до напрямку обертання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Ефективність роботи подрібнювачів малої продуктивності, не зважаючи на їх призначення, конструкцію та принцип роботи, а також відповідність одержаної продукції поставленим вимогам, в першу чергу, залежать від рівномірної дозованої подачі вхідного матеріалу. Особливо це актуально для подрібнювачів зернових матеріалів, в яких відсутність стабільної рівномірної подачі зерна призводить до його переподрібнення, утворення значної кількості мучнистої фракції і, як наслідок, зниження надійності виконання процесу та зростання енерговитрат на одиницю продукції. На жаль, як показав літературно-патентний пошук, існуючі конструкції живильників подрібнювачів зернових матеріалів не здатні забезпечити стабільну рівномірну подачу зерна до камери подрібнення дробарок малої продуктивності, що викликало необхідність у проведенні власних досліджень.

Руйнування зерна в робочій камері подрібнювача може здійснюватися в наступних випадках [1]:

- при косому ударі лопатки по зернині на шляху її переміщення від завантажувального вікна до деки;
- відбитої лопаткою зернини, або її фрагментів (часток) при ударі по ребру деки;
- після відбивання зернини від деки і повторного удару лопаткою подрібнювача;
- при співударі зернин між собою в результаті їх переміщення в потоці,

особливо на зустрічних траєкторіях руху (зіткнення зернин, відбитих лопаткою та зернин, що відбиті від поверхні решіт і дек).

Ймовірність кожного з цих випадків залежить від багатьох чинників, в першу чергу, від фізико-механічних властивостей зерна та типу, параметрів і режимів роботи подрібнювача. В залежності від сили удару та механічних властивостей, зернина може відбитися від поверхні лопатки (неушкодженою, чи розколотою на частки), або деформуватися і продовжувати рух разом з лопаткою, ковзаючи по її поверхні під дією відцентрової сили. В першому випадку маємо справу з пружним ударом, в другому – з пластичним.

Питаннями теоретичних досліджень процесу подрібнення зернових матеріалів займалися відомі вчені С.В. Мельников, В.І. Сироватко, І.І. Ревенко, Г.М. Кукта, А.П. Макаров, О.М. Пилипенко, та інші. Але повний аналіз подрібнення зернових матеріалів робочими органами ударно-сколювальної дії з мінімізацією утворення пиловидної фракції при забезпеченні встановленого модуля помелу потребує проведення додаткових досліджень.

Мета досліджень. Обґрунтувати технологічний процес та визначити принцип роботи і раціональні параметри подрібнювача зерна, здатного забезпечити необхідний модуль помелу в залежності від виду тварин з мінімальним вмістом пиловидної фракції.

Результати досліджень. Процес подрібнення зернових матеріалів в результаті вільного удару робочого органу подрібнювача по зернині носить стохастичний характер, тому при його аналізі зробимо наступні припущення: зернина в момент зустрічі з лопаткою нерухома, маса зернини значно менша за масу лопатки з диском, швидкість диска не змінюється в результаті удару (швидкість лопатки до удару та після удару однакова).

При співударі твердих тіл сила удару  $P_{y\delta}$  залежить від маси тіл  $M_{np}$  і  $m_z$ , відносної швидкості удару  $V_{y\delta}$ , форми поверхонь тіл та їх фізико-механічних властивостей. Подрібнення зернини при ударі по ній лопатки подрібнювача відбудеться у випадку, коли зусилля, що виникає при співударі, буде перевищувати критичне значення (зусилля руйнування):  $P_{y\delta} > P_{кр}$ .

Найбільш вірогідно, що ової маси робочій ча відбув при першому ударі по зернині и. Враховуючи складну реологічну структуру зернини практично неможливо застосувати класичну теорію удару, тому що має місце пружно-пластичний удар і не відомо, буде зернина відбиватися від поверхні лопатки в результаті пружних властивостей, або деформується і рухатиметься разом з лопаткою, переміщуючись під дією відцентрових сил по її поверхні до сходження та вільного польоту в напрямку деки. При цьому, в залежності від сили удару та механічних властивостей, зернина може руйнуватися на частки, деформуватися (розплющуватися), або залишатися неушкодженою.

Приведену масу лопатки визначаємо з умови рівності кінетичних енергій всієї системи відносно центру обертання та відносно точки контакту з зерниною (рис. 1).

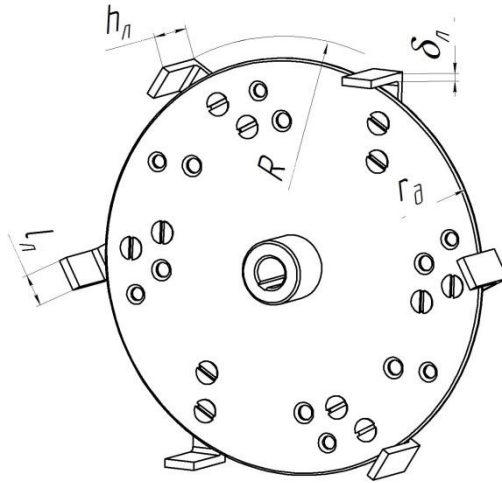


Рис. 1. Диск експериментального подрібнювача з лопатками

Кінетична енергія системи відносно точки контакту лопатки з зерниною становить [2]:

$$T_k = \frac{M_{np} \cdot v_l^2}{2} = \frac{M_{np} \cdot (v_n^2 + v_\tau^2)}{2} = \frac{M_{np}}{2} \cdot \left( v_\tau^2 + \frac{v_\tau^2}{\text{tg}^4 \alpha} \right) = M_{np} \cdot \frac{\omega^2 \cdot r_i^2}{2} \cdot \left( 1 + \frac{1}{\text{tg}^4 \alpha} \right), \quad (1)$$

де:  $T_k$  – кінетична енергія системи відносно точки контакту;  
 $M_{np}$  – приведена маса лопатки;  
 $v_l$  – швидкість лопатки до удару;

$v_n$  і  $v_\tau$  - відповідно нормальна і тангенціальна складові швидкості лопатки.

Кінетична енергія системи відносно центра обертання складається з кінетичної енергії диска та лопаток. В зв'язку зі складною формою лопатки, умовно розділимо її на дві частини: основу та стійку лопатки, кожна з яких має форму паралелепіпеда. Згідно з [2], запишемо:

$$T_s = \frac{I_d \cdot \omega^2}{2} + \frac{z \cdot \omega^2}{2} \cdot \left[ \frac{m_{oc}}{3} \cdot \frac{(b^2 + l_{oc}^2)}{4} + m_{oc} \cdot \left( r_d - \frac{l_{oc}}{2} \right)^2 + \frac{m_l}{3} \cdot \frac{(\delta^2 + l_l^2)}{4} + m_l \cdot \left( \frac{r_d + R}{2} \right)^2 \right], \quad (2)$$

де:  $I_d$  – момент інерції диска;  
 $z$  – кількість лопаток на диску, шт.;  
 $m_{oc} = \rho b l_{oc} \delta_l$  - маса основи лопатки, кг;  
 $b$  – ширина лопатки, м;  
 $l_{oc}$  – довжина основи лопатки, м;  
 $r_d$  – радіус диска, м;  
 $m_l = \rho h l_l \delta$  – маса стійки лопатки, кг;  
 $l_l$  – довжина лопатки, м;  
 $h$  – висота лопатки, м;  
 $\rho$  – густина матеріалу лопатки та диска, кг/м<sup>3</sup>;  
 $R$  – зовнішній радіус обертання лопатки, м;  
 $\delta_l$  – товщина лопатки, м.

Момент інерції диска подрібнювача:

$$I_{\delta} = \rho \cdot \frac{\pi \cdot r_{\delta}^4 \cdot \delta_{\delta}}{2}, \quad (3)$$

де:  $\delta_{\delta}$  – товщина диска, м.

Прирівнявши вирази кінетичної енергії (1) і (2) між собою та провівши відповідні перетворення, визначимо приведену масу:

$$M_{np} = \frac{\rho \cdot tg^4 \alpha}{r_i^2 \cdot (1 + tg^4 \alpha)} \cdot \left\{ \frac{\pi \cdot r_{\delta}^4 \cdot \delta_{\delta}}{2} + z \cdot \delta_{\delta} \cdot \left[ b \cdot l_{oc} \cdot \left( \frac{b^2}{12} + \frac{l_{oc}^2}{3} + r_{\delta} \cdot (r_{\delta} - l_{oc}) \right) + \frac{h \cdot l_{\pi}}{4} \cdot \left( \frac{\delta^2 + l_{\pi}^2}{3} + (r_{\delta} + R)^2 \right) \right] \right\} \quad (4)$$

Отриманий вираз дозволяє визначити приведену до точки удару лопатки по зернині масу ротора подрібнювача

При зустрічі з зерниною лопатка діятиме з ударним імпульсом  $S$  [2]:

$$S = \int_0^t P dt = m_3 \cdot (V_3 - v_3), \quad (5)$$

де:  $P$  – сила удару лопатки по зернині, Н;

$m_3$  – маса зернини, кг;

$V_3$  – швидкість зернини після удару, м/с;

$v_3$  – швидкість зернини до удару, м/с.

При ударі лопаткою зернина може відбитися від її поверхні цілою, або подрібненою на частки (пружний удар), а у випадку пластичного удару – ковзати під дією відцентрової сили до сходження з її поверхні (рис. 2).

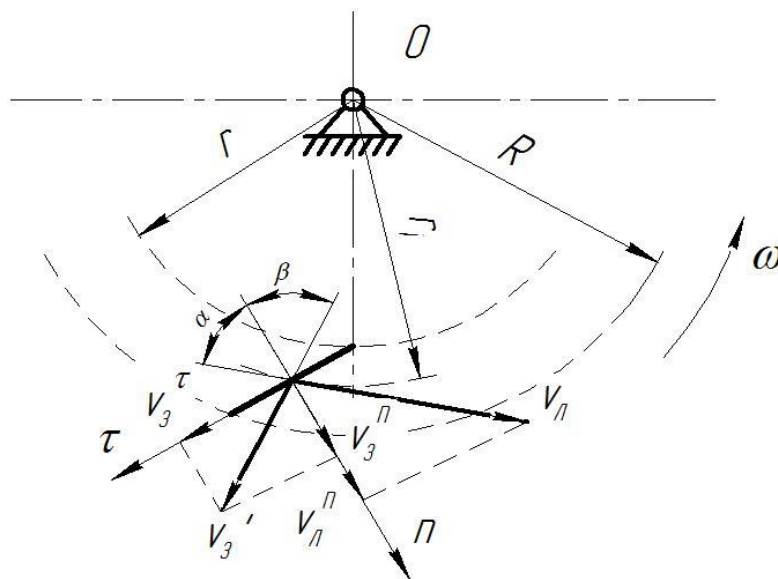


Рис. 2. Взаємодія зернини з лопаткою в подрібнювальній камері

Розглянемо випадок, коли зернина при ударі по ній лопатки не зруйнується. Якщо припустити, що поверхня лопатки ідеально гладка і жорстко

встановлена під кутом  $\alpha$  до напрямку руху, а кут відбиття зернини  $\beta > \alpha$ , то можна визначити модуль швидкості та напрям польоту зернини після пружного удару по ній лопатки [2]:

$$V_3 = v_l \cdot \sin \alpha \cdot \sqrt{1 + \varepsilon^2 \cdot \operatorname{ctg}^2 \alpha};$$

$$\beta = \operatorname{arcctg}(\varepsilon \cdot \operatorname{ctg} \alpha), \quad (6)$$

де:  $V_3$  – швидкість зернини після удару, м/с;  
 $v_l$  – швидкість обертання лопатки, м/с;  
 $\alpha$  – кут між нормаллю до поверхні лопатки та напрямом обертання, град.;  
 $\varepsilon$  – коефіцієнт відновлення зернини після удару, який визначається з довідника, або експериментальним шляхом за залежністю:  $\varepsilon = \sqrt{h_e / h_n} \leq 1$ ;  
 $\beta$  – кут відбиття зернини від поверхні лопатки, град.;  
 $h_e$  – висота відбиття зернини, м;  
 $h_n$  – висота падіння зернини, м.

Враховуючи, що зернина не ідеально пружне тіло ( $\varepsilon < 1$ ), то модуль її швидкості після відбиття лопаткою буде меншим від швидкості обертання лопатки, тобто  $V_3 < V_l$ . За попередніми розрахунками, швидкість зернини після відбивання лопаткою в експериментальному подрібнювачі знаходиться в межах 30 м/с. Кут відбиття зернини  $\beta$  навпаки, буде перевищувати кут її падіння  $\alpha$  [3]. В нашому випадку,  $\beta \approx 40^\circ$ .

Для спрощення аналізу процесу вважаємо, що початкова швидкість зернини в момент удару в напрямку руху лопатки відсутня ( $v_{z_n} = 0$ ), а швидкість лопатки  $v_l = \omega \cdot r_i$ , де ( $r \leq r_i \leq R$ ). Тоді вираз (5), для випадку відбивання цілої зернини, запишемо у вигляді:

$$\int_0^t P dt = m_3 \cdot \omega \cdot r_i \cdot \sin \alpha \cdot \sqrt{1 + \varepsilon^2 \cdot \operatorname{ctg}^2 \alpha}. \quad (7)$$

Межі інтегрування лівої частини виразу (7) можна визначити з умови швидкості  $c$  проходження звукової хвилі в пружному середовищі, яким може бути формалізована зернина:

$$c = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}}, \quad (8)$$

де:  $\lambda$  – коефіцієнт Ламе,  $\lambda = K - \frac{2}{3}G$ ;

$K$  – модуль пружності об'ємної деформації:  $K = \frac{2}{3} \cdot \left( \frac{1+\nu}{1-2\nu} \right) \cdot G$ ;

$G$  – модуль пружності зсувних деформацій:  $G = \frac{E}{2 \cdot (1+\nu)}$ ;

$\nu$  – коефіцієнт Пуассона для зерна.

Підставивши одержані значення у вираз (8) та враховуючи, що час  $t$  проходження хвилі в зернині – це співвідношення відстані (діаметра зернини  $d_{np}$ ) до швидкості  $c$ , одержимо:

$$t = \frac{d_{np}}{c} = \frac{(5a + 6b)/30}{\sqrt{\frac{E \cdot (1 - \nu)}{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu) \cdot \rho}}}, \quad (9)$$

де:  $\rho$  – густина зернини;  
 $a, b$  – відповідно ширина і товщина зернини.

Діаметр зернини визначаємо з залежності [3]:  $d_{np} = (5a + 6b)/30$ .

Тоді, з врахуванням (9), вираз (7) для цілої зернини запишемо у вигляді:

$$\frac{P \cdot (5a + 6b)/30}{\sqrt{\frac{E \cdot (1 - \nu)}{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu) \cdot \rho}}} = m_3 \cdot \omega \cdot r_i \cdot \sin \alpha \cdot \sqrt{1 + \varepsilon^2 \cdot \text{ctg}^2 \alpha}. \quad (10)$$

Звідки визначимо зусилля удару лопатки по зернині:

$$P_{y\partial} = \frac{m_3 \cdot \omega \cdot r_i \cdot \sin \alpha}{(5a + 6b)/30} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot (1 + \varepsilon^2 \cdot \text{ctg}^2 \alpha) \cdot (1 - \nu)}{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu) \cdot \rho}} \geq P_{кр}. \quad (11)$$

Аналіз виразу (11) показує, що зі збільшенням кута  $\alpha$  нахилу лопатки до напрямку її обертання зусилля удару по зернині зростає (рис. 3).

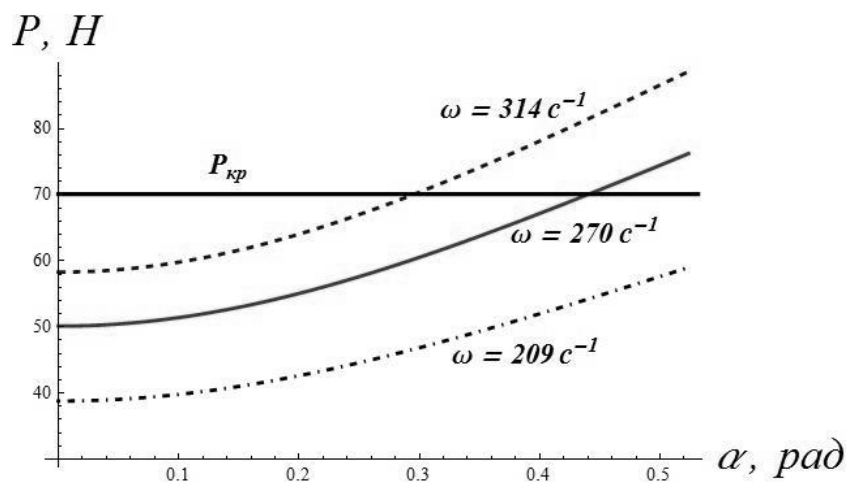


Рис. 3. Залежність зусилля удару лопатки по зернині від кута її нахилу при різній частоті обертання

Аналогічно, при збільшенні частоти обертання лопатки зусилля удару також зростає.

Наведені вище твердження справедливі для умови, що зернина відбивається від лопатки неушкодженою. У випадку руйнування зернини на

частки, можна припустити, що вони також відбиваються від лопатки аналогічно цілій зернині і для них справедливий вираз (11), або вони як пластичне тіло рухаються разом з лопаткою, переміщуючись під дією відцентрової сили та сили тертя по її поверхні до сходження та вільного польоту в напрямку деки (решета).

Висновки. Аналітичні дослідження процесу подрібнення зернових матеріалів дозволили визначити межі раціональних параметрів експериментального подрібнювача зерна.

Встановлено, що частота обертання диска з чотирма лопатками, яка забезпечує силу удару  $P_{уд} \geq P_{кр}$  повинна перевищувати  $250...290 \text{ с}^{-1}$  при куті нахилу  $\alpha = 25^{\circ}$ .

Перевищення частоти обертання та кута нахилу лопатки гарантує руйнування зернини при ударі по ній лопатки, але призводить до переподрібнення маси та утворення значної кількості пиловидної фракції.

### Список використаних джерел

1. Соломка О.В. Обґрунтування конструктивних параметрів дискового подрібнювача зерна. ТДАУ. Вип. 9, т. 3. Мелітополь, 2009, ст. 40-47
2. Бутенин Н.В. Курс теоретической механики: Учебник / Бутенин Н.В., Лунц Я.Л., Меркин Д.Р.- М.: Наука, Т.2, 1979. – 544с.
3. Механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів: Підручник// О.М. Царенко, Д.Г. Войтюк, В.М. Швайко та ін. За ред. С.С. Яцуна. - К.: Мета, 2003. – 448 с.

### Аннотация

#### АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ЗЕРНА

В.П. Ковбаса, д.т.н., проф., В.А. Соломка, к.т.н., доцент, А.В. Соломка, ассистент

*В статье рассмотрены основные проблемы и приведены результаты аналитических исследований процесса измельчения зерновых материалов путем приложения ударных нагрузок в экспериментальном измельчителе.*

### Abstract

#### ANALYTICAL STUDY OF GRINDING GRAIN

V. Kovbasa, V. Solomka, A. Solomka

*The article considers the main problems and the results of analytical studies of grain grinding process application materials by shock loads in the experimental chopper.*