

## ДИНАМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ КУЛЬКОВОГО ПОДРІБНЮВАЧА

**Сухенко Ю.Г., д.т.н., проф., Бойко Ю.І., к.т.н., Сухенко В.Ю., к.т.н., доценти**

*(Національний університет харчових технологій)*

*У статті запропоновано методику розрахунку та визначення оптимального кута нахилу притискних кілець у кульковому подрібнювачі: розв'язком модельної системи, за принципом д'Аламбером для зв'язаної матеріальної точки, реакціями сил інерції.*

Подрібнення зернової сировини – одна з основних технологічних операцій при виробництві борошна із зерна та зернопродуктів. Використання білкових добавок рослинного походження, в рецептурах хлібобулочних виробів дозволяє підвищити їх харчову та біологічну цінність, органолептичні та фізико-хімічні показники, дає змогу отримати якісний хліб з борошна пониженої якості. Перспективним джерелом білку для хлібопекарної галузі є вторинні продукти переробки круп'яної, борошномельної та олійножирової промисловості [1].

Отже, актуальною задачею є розроблення альтернативного способу тонкого подрібнення відходів олійожирових культур. Такий спосіб був запропонований і впроваджений авторами на виготовленому дослідному промисловому зразку нового кулькового подрібнювача, що ґрунтується на застосуванні регульованих стискаючо-зсувних деформацій і втомлювальних процесів [1, 2]. [4].

Основним конструктивним параметром подрібнювача є кут нахилу робочої поверхні притискного кільця до робочої поверхні розмелювального кільця, оскільки цей кут впливає на характер руху кульок.

Розмелювальне кільце у перерізі має форму конуса з кутом скосу до вертикалі  $\varphi_1$ . Притискні кільця розташовані під кутом  $\varphi_2$  до горизонту (вісь  $OY$ ).

Експериментальні дослідження показали, що рух кульок у механічній системі є досить складним. Це підтверджується формою траєкторії, що залишається на розмелювальному і притискному кільцях. Така складна механічна система може ефективно працювати лише при певних кутах  $\varphi_1$  і  $\varphi_2$ , та частоті обертання  $\omega$ .

Для визначення динамічних властивостей механічної системи подрібнювача складемо модельну систему (рис. 3.2), що складається з розмелювального кільця, яке обертається навколо вісі  $OZ$  зі сталою кутовою швидкістю  $\omega$ .

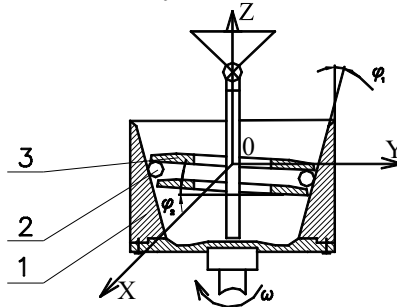


Рис. 3.2. Принципова схема розташування робочих органів механічної системи подрібнювача: 1 – розмелювальне кільце; 2 – кулька; 3 – притискне кільце.

Під час обертання кульки притискаються відцентровою силою і контактують з розмелювальним кільцем та двома притискними кільцями 3. Притискні кільця разом з центральною частиною нерухомі. Припустимо, що рух розпочинається з правого нижнього положення, в якому кульки знаходяться між розмелювальним і притискним кільцями [28]. В лівому верхньому положенні вони вже матимуть деяке прискорення, що створюється дотичною складовою відцентрової сили і складною взаємодією силових навантажень зі сторони притискного кільця, яке забезпечує складну траєкторію руху розмелюваних частинок.

Для детальнішого вивчення системи, модель якої зображена на (рис. 3.1), розглянемо її, як дві прості підсистеми, утворені двома перерізами. Для того, щоб проаналізувати такий рух, розкладемо його на більш прості рухи.

Найсуттєвішим фактором, який впливає на параметри складного руху, є нахил притискного кільця відносно площини руху кульок. Адже кулька при контакті з притискним кільцем утворює додаткову вісь обертання. В залежності від положення притискного кільця, а саме кута нахилу  $\varphi_2$  (рис. 3,5) точка контакту  $B$  зміщується по поверхні кульки і, відповідно, і зміщується вісь її обертання.

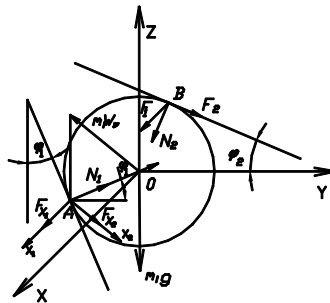


Рис. 3.5. Схема розташування кульки на розмелювальному кільці у верхньому крайньому положенні

В умовах нахилу притискного кільця до горизонту утворюється такий рух, при якому постійно змінюється точка контакту поверхні кульки з притискним кільцем. Кулька постійно притиснута до поверхні притиснутого кільця реакцією сили  $N_2$ , що спричиняє ковзання точки її контакту по поверхні притиснутого кільця. При цьому виникає умовна вісь обертання, яка забезпечує перекочування. Ці складові забезпечать перекочування кульок по поверхні розмелювального кільця з постійним їх ковзанням.

Такий рух можливий за умови, коли точка контакту кульки з притискним кільцем не співпадає з умовною віссю її обертання. Кулька ж створює у подрібнюваному продукті деформацію стиску з одночасним зсувом, що забезпечує ефективне подрібнення [16, 40].

У момент, коли відбувається миттєве “гальмування”, кулька на деякий час зупиняється. Тому всі сили, а також моменти сил повинні врівноважитись:

$$\sum_{i=1}^n F_i = 0, \quad (3.8)$$

$$\sum_{i=1}^n r_i \times F_i = 0. \quad (3.9)$$

У рівнянні (3.8) закладені активні сили (вага, інерція) та реакції їх в'язів. За принципом д'Аламбера для зв'язаної матеріальної точки активні сили, що прикладені до неї, та реакції в'язів урівноважуються силою інерції [55, 126, 127]. Рівновагу вважають фіктивною:

$$F + R + I = 0, \quad (3.10)$$

де  $I$  - сила інерції  $i$ -тої кульки,

$F$  - рівнодіюча активних сил,

$R$  - рівнодіюча реакцій в'язів.

Застосуємо принцип звільнення від в'язів. Тоді невідну систему точок можна розглянути як вільну, що рухається під дією заданих сил та реакцій в'язів.

Завдяки тому, що кулька рухається по складній траєкторії, і при цьому створюється складний осцилюючий рух кульок по поверхні розмелювального кільця. Тоді в точці  $A$  крім нормальної реакції кульки  $N_1$  на поверхні кільця виникає сила тертя, яку можна розкласти на дві складові  $F_{x1}$ ,  $F_{x2}$   $F_{x1}$  в площині  $Ax_1x_2$  (рис. 3.5).

Розглянемо систему сил, які утворюються в точці  $B$  контакту кульки з притискним кільцем, де присутня нормальна реакція  $N_2$  та сила тертя, яка складається з двох складових  $F_1$  та  $F_2$ :

$$F_1 = -fN_2, \quad (3.11)$$

$$F_2 = (0, fN_2 \cos \varphi_2 - fN_2 \sin \varphi_2). \quad (3.12)$$

З огляду на те, що розміри кульок в порівнянні з розмірами розмелювального та притискного кілець на порядок менші то, користуючись теоремою Варіньона для сил інерції та тяжіння, вважаємо, що дані сили прикладені до центру кульки [70 - 72].

Отже, в точці  $O$  маємо наступну систему складових сил:  $m_i g$ ,  $m_i W_v$ ,  $m_i W_\tau$ ,  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $N_3$ ,  $N_4$  та  $F_{x1}$ ,  $F_{x2}$ ,  $F_1$  та  $F_2$

В момент повного “гальмування” кулька припиняє перекочування по поверхні розмелювального кільця і обертання навколо умовної вісі. При цьому зовнішні сили та моменти врівноважують систему реакціями в’язів:

$$F + R + I = 0, \quad (3.13)$$

$$M_a (F + R + I) = 0, \quad (3.14)$$

У даному положенні забезпечується рівновага системи, причому сукупний момент відносно точки  $A$  дорівнює нулю (обертання відсутнє).

Для того, щоб наповнити умови рівнянь (3.13) і (3.14) реальними співвідношеннями, розглянемо рис. 3.5. На ньому зображено дві активні системи координат – одна з центром в точці  $O$  ( $Ox_1x_2x_3$ ), а друга - з центром в точці  $A$  ( $Ax_1x_2x_3$ ). Систему координат  $Ax_1x_2x_3$  вводимо для зручнішого проектування компонентів реакції розмелювального кільця в точці  $A$  на вісі  $Ox_1x_2x_3$ . Щоб спроектувати сили та моменти потрібно знати радіус – вектори  $\vec{AO}$ ,  $\vec{AB}$ ,  $\vec{AC}$ ,  $\vec{AD}$  (рис.3.4, рис.3.5).

Згідно з рис. 3.5; 3.6.; 3.7. координати точок в системі  $Ox_1x_2x_3$  записується так:

$$A (0; -r_k \cos \varphi_1; -r_k \sin \varphi_1), B (0; r_k \sin \varphi_2; r_k \cos \varphi_2),$$

$$C (-r_k \cos \varphi_3; r_k \sin \varphi_3; 0), D (r_k \cos \varphi_3; r_k \sin \varphi_3; 0).$$

Тоді радіус – вектори мають такі координати:

$$\vec{AO} = (0; r_k \cos \varphi_1; r_k \sin \varphi_1),$$

$$\vec{AB} = (0; r_k (\sin \varphi_2 + \cos \varphi_1); r_k (\cos \varphi_2 + \sin \varphi_1)),$$

$$\vec{AC} = (-r_k \cos \varphi_3; r_k (\sin \varphi_3 + \cos \varphi_1); r_k \sin \varphi_1),$$

$$\vec{AD} = (r_k \cos \varphi_3; r_k (\sin \varphi_3 + \cos \varphi_1); r_k \cos \varphi_1)$$

Сили в проекціях на вісі координатної системи  $Ox_1x_2x_3$  можна записати так:

$$N_1 = (0; N_1 \cos \varphi_1; N_1 \sin \varphi_1),$$

$$N_2 = (0; -\bar{N}_2 \sin \varphi_2; -N_2 \cos \varphi_2),$$

$$N_3 = (\bar{N}_3 \cos \varphi_3; -N_3 \sin \varphi_3; 0),$$

$$N_4 = (-N_4 \cos \varphi_3; -N_4 \sin \varphi_3; 0),$$

$$m_i g = (0; 0; -mg),$$

$$m_i W_i = (-m_i |W_i| \sin \alpha; -m_i |W_i| \cos \alpha; 0),$$

$$F_{x_1} = (F_{x_1}; 0; 0),$$

$$F_{x_2} = (0; F_{x_2} \sin \varphi_1; -F_{x_2} \cos \varphi_1)$$

де  $\alpha = \arctg \frac{|W_\tau|}{|W_v|}$  - кут між дотичною  $|W_\tau|$  та нормальною

$$|W_v| \text{ складовою } W_i = \sqrt{W_\tau^2 + W_v^2}.$$

Рівняння (3.13) в проєкціях виглядають так:

$$OX: -m_i |W_i| \sin \alpha + F_{x_1} + N_3 \cos \varphi_3 - N_4 \cos \varphi_3 - fN_2 = 0, \quad (3.15)$$

$$OY: -m_i |W_i| \cos \alpha + F_{x_2} \cdot \sin \varphi_1 + N_1 \cos \varphi_1 - N_2 \sin \varphi_2 - N_3 \sin \varphi_3 - N_4 \sin \varphi_3 - fN_2 \cos \varphi_2 = 0,$$

(3.16)

$$OZ: -m_i g - F_{x_2} \cos \varphi_1 + N_1 \sin \varphi_1 - N_2 \cos \varphi_2 - fN_2 \sin \varphi_2 = 0. \quad (3.17)$$

Аналітичні дослідження показали, що вибір оптимальної величини кута нахилу притискних кілець слід проводити в два етапи:

1. Знаходження критичного значення кута нахилу притискних кілець, при якому взагалі можливий рух кульок і працездатність та виключається негативне явище миттєвого гальмування кульок.

2. Створення умов такого складного руху, при якому зусилля з боку кульки на подрібнюваний продукт забезпечують його ефективне руйнування.

Ці задачі вдалося вирішити на основі розв'язання системи рівнянь та побудови графічних залежностей реакцій в'язів та активних сил від кутів  $N_1, N_2, N_3, N_4$  та  $F_{x_1}, F_{x_2}$ .

Розрахунки проводились для різних фіксованих значень кута скосу робочої поверхні розмелювального кільця  $\varphi_1 = 9^\circ; 12^\circ, 17^\circ, 19^\circ$ . При цьому кут  $\varphi_2$  змінювали у межах  $2^\circ \leq \varphi_2 \leq 20^\circ$ . Решта параметрів були постійними: кутова швидкість обертання вала  $\omega = 5 \text{ с}^{-1}$ , прискорення  $i$  -ї кульки  $|W_i| = 126,38 \text{ м/с}^2$ , діаметр кульки  $d_{кул.} = 0,031 \text{ м}$ , діаметр притискного кільця  $D_{пр} = 0,26 \text{ м}$ .

## Список літератури

1. Карнаушенко Л.І., Шевченко Р.І. Використання рослинного білка в технології хлібобулочних виробів /Наукові праці ОДАХТ. Вип. 20. – Одеса. – 1999. –с.67-71.

2. Сухенко Ю.Г., Бойко Ю.І. Кульковий млин для подрібнення відходів олійно-жирової сировини // Хранение и переработка зерна. – 2005. - №12 – с. 55 – 56.

3. *Бутковский В.А.*, Мерко А.И., Мельников Е.М. Технология зерноперерабатывающих производств: Учебник для ВУЗов по спец. “Машины и аппараты пищевых производств”. – М.: Интерграфсервис, 1999. – 472 с.

4. *Егоров Г.А.*, Петренко Т.П. Технология муки и крупы, – М.: Изд. Комплекс МГУПП, 1999. – 336 с.

5. *Кильчевский Н.А.*, Ремизова Н.И., Кильчевский Е.Н. Основы теоретической механики. – К.: Вища шк. 1986. – 296 с.

6. *Яблонский А.А.*, Никифорова В.М. Курс теоретической механики Ч. 1. Статика Кинематика. Учебник. Изд. 4-е, перераб. – М.: Высшая шк., 1971. – 424 с.

7. *Яблонский А.А.*, Никифорова В.М. Курс теоретической механики Ч. 2. Динамика. Учебник. Изд. 4-е, перераб. – М.: Высшая шк., 1971. – 488 с.

8. Пат. 65015А Україна, МКИ В 02 С 15/12, В 02 С 17/08 Спосіб тонкого подрібнення матеріалів і пристрій для його здійснення / Ю.Г. Сухенко, Ю.І. Бойко, В.І. Білий (Україна). №2003043796 Заявлено 24.04.03; Опубл. 15.03.04, Бюл. №3. 2004 -6с.ил.

## Анотація

### **ДИНАМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ КУЛЬКОВОГО ПОДРІБНЮВАЧА**

*У статті запропоновано методику розрахунку та визначення оптимального кута нахилу притискних кілець у кульковому подрібнювачі: розв’язком модельної системи, за принципом д’Аламбером для зв’язаної матеріальної точки, реакціями сил інерції.*