

OPTIMIZATION OF MODE OF REVERSAL OF ROLLER FORMING INSTALLATION ON ACCELERATION OF FOURTH ORDER

V. S. Loveykin, K. I. Pochka

Abstract. *For the purpose of increase in reliability and durability of roller forming installation the optimum mode of back and forth motion of the forming cart with a reversal on acceleration of the fourth order is calculated. Kinematic characteristics of the forming cart at the optimum mode of a reversal on acceleration of the fourth order are calculated. The design of the drive of installation in a type of the cam mechanism is offered and the cam profile for providing the optimum mode of back and forth motion of the forming cart with a reversal on acceleration of the fourth order is constructed.*

In studies conducted with the aim of increasing the reliability and durability of roller molding set the calculated optimal mode of reversal of the molding truck with the acceleration of the fourth order.

Calculated the kinematic characteristics of the moulding of the bogie when the optimal mode of reversal with the acceleration of the fourth order.

The proposed design of the actuator installation in the form of a Cam mechanism and the Cam profile is built to ensure the optimal mode of reversal of the molding truck with the acceleration of the fourth order.

The results can further be useful to clarify and improve the existing engineering methods of calculation of the drive mechanisms of machines roller forming both the stages of design/construction and in modes of real operation. Also the results can be useful in the design or improvement of mechanisms with reciprocating actuators.

Key words: *roller forming installation, movement mode, cam mechanism, drive*

УДК 531.32

АНАЛІЗ РУХУ ЧАСТИНКИ ПО РАДІАЛЬНІЙ ЛОПАТЦІ ОБЕРТОВОГО БАРАБАНА З УРАХУВАННЯМ ОПОРУ СЕРЕДОВИЩА

Г. А. Голуб, доктор технічних наук

**О. А. Марус, кандидат технічних наук
Національний університет біоресурсів і
природокористування України**

Я. Д. Ярош, кандидат технічних наук

**Житомирський національний агроекологічний університет
e-mail: gagolub@mail.ru**

© Г. А. Голуб, О. А. Марус, Я. Д. Ярош, 2017

Анотація. Пристрої для перемішування на основі обертових барабанів мають високі показники якості при перемішуванні і тому знаходить все більше поширення при розробці процесів сушіння сільськогосподарських продуктів та матеріалів, біотехнологічних процесів ферментації біомаси в аеробних та анаеробних умовах. Підвищення ефективності роботи обертових барабанів шляхом обґрунтування методів визначення параметрів відцентрового руху частинок по радіальній лопатці в обертовому барабані, які дозволять встановити раціональні значення кутової швидкості та конструктивні параметри обертових барабанів, потребує подальшого удосконалення.

Для узагальнення проведених досліджень доцільно отримати розв'язок диференційного рівняння, яке описує рух частинок по радіальних лопатках обертового барабана з урахуванням опору середовища. У цьому випадку на частинку діють відцентрова сила інерції, коріолісова сила інерції, сила тяжіння, сила тертя завдяки опору повітря, що притискує частинку до лопатки, а також сила опору повітря, яка протидіє руху частинки в радіальному напрямі. При цьому коефіцієнт пропорційності, який визначає силу опору середовища, яка направлена протилежно напрямку швидкості руху частинок і пропорційна швидкості руху частинки в першій степені, прийнято для випадку, коли повітря обтікає частинки ламінарним потоком при числах Рейнольдса менших 5.

Отриманий розв'язок диференційного рівняння, що визначає параметри руху частинки по радіальній лопатці обертового барабана з урахуванням опору середовища дозволяє встановити радіальне переміщення та відносну швидкість руху частинки по лопатці, а також значення постійних величин диференційного рівняння.

Ключові слова: барабан, радіальна лопатка, рух частинки

Постановка проблеми. Пристрої для перемішування на основі обертових барабанів знаходить все більше поширення при розробці біотехнологічних процесів ферментації, а тому підвищення ефективності їх роботи шляхом обґрунтування методів визначення параметрів руху частинок по радіальній лопатці в обертовому барабані, які дозволять встановити раціональні значення кутової швидкості та конструктивні параметри обертових барабанів, потребує подальшого удосконалення.

Аналіз останніх досліджень. Основи аналізу руху матеріальних частинок по робочих органах з горизонтальною та вертикальною віссю обертання були закладені у відомій праці академіка П. М. Василенка [1]. Значний обсяг досліджень щодо визначення відносної швидкості руху матеріальної точки по робочих

органах з горизонтальною віссю обертання був проведений також у роботах [2, 3, 4] з метою визначення параметрів робочих органів для розпушування компостів та внесення органічних добрив. Встановлено також рішення диференційного рівняння та параметри руху частинок [5, 6, 7] стосовно руху матеріальної частинки по радіальних лопатках в обертовому барабані без урахування опору середовища.

Для узагальнення проведених досліджень доцільно отримати розв'язок диференційного рівняння, яке описує рух частинок по радіальних лопатках обертового барабана з урахуванням опору середовища.

Мета досліджень. Отримати узагальнений розв'язок диференційного рівняння, яке описує рух частинки з урахуванням опору середовища.

Результати досліджень. Для визначення відносної швидкості руху частинки по радіальній лопатці обертового барабана з урахуванням опору середовища, який пропорційний швидкості руху, скористаємося схемою дії сил на частинку, що знаходиться на лопатці обертового барабана, приведену на рис. 1. В цьому випадку диференційне рівняння руху матиме наступний вигляд [1, 9]:

$$m \frac{dv_R}{dt} = m \frac{d^2r}{dt^2} = mrw^2 - mfk_1rw - 2fmw \frac{dr}{dt} - mk_1 \frac{dr}{dt} - mg[f \cos(B + wt) + \sin(B + wt)], \quad (1)$$

де: m – маса частинки, кг; w – кутова швидкість обертання барабана, рад/с; r – поточний радіус положення частинки на лопатці, м; g – прискорення земного тяжіння, м/с²; f – коефіцієнт тертя частинки по матеріалу лопатки, відн. од.; B – початковий кут повороту лопатки барабана, рад.; t – час повороту барабана, с; v_R – відносна швидкість руху частинки по лопатці, м/с; mrw^2 – відцентрова сила інерції, Н; $2mw \frac{dr}{dt}$ – коріолісова сила інерції, Н; mg – сила тяжіння, Н; mfk_1rw – сила тертя завдяки опору повітря, що притискує частинку до лопатки, Н; $mk_1 \frac{dr}{dt}$ – сила опору повітря, яка протидіє руху частинки в радіальному напрямі, Н; k_1 – коефіцієнт пропорційності при ламінарному обтіканні частинки повітрям, с⁻¹.

Коефіцієнт пропорційності k_1 визначає силу опору середовища, яка направлена протилежно напрямку швидкості руху частинок і пропорційна швидкості руху частинки в першій степені, коли повітря обтікає частинки ламінарним потоком при числах Рейнольдса

менших 5 [10]. Виходячи з цього можемо записати:

$$k_1 = \frac{3\pi\eta d_E}{m} = \frac{3\pi\eta d_E}{\rho V} = \frac{18\eta}{\rho d_E^2} \quad (2)$$

де: η – динамічна в'язкість середовища, Н с/м²; d_E – розміри частинки через діаметр еквівалентного шару, м; ρ – щільність матеріалу частинки, кг/м³; V – об'єм частинки, м³.

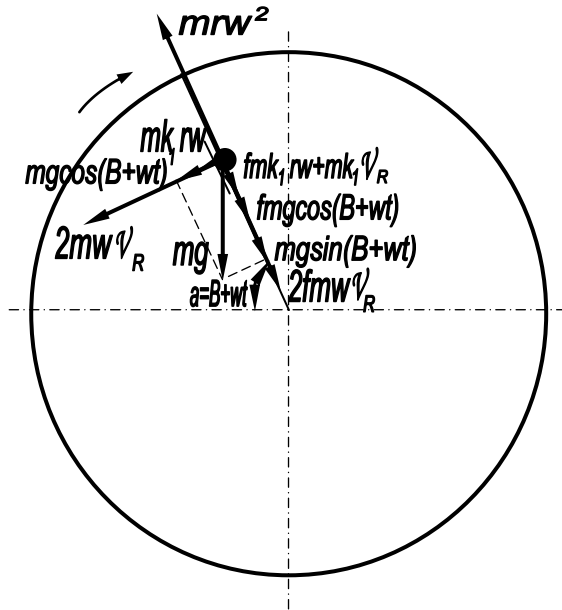


Рис. 1. Схема дії сил на частинку, що рухається по радіальній лопатці обертового барабана з урахуванням сил опору середовища.

На основі рівняння (1) можемо записати:

$$r'' + (2fw + k_1)r' - (w^2 - fk_1w)r = -g[f \cos(B + wt) + \sin(B + wt)]. \quad (3)$$

Дане рівняння є лінійними рівнянням другого порядку з постійними коефіцієнтами та правою частиною у вигляді тригонометричного поліному [6]. Загальновідомо, що відповідне йому однорідне диференціальне рівняння матиме вигляд:

$$r'' + (2fw + k_1)r' - (w^2 - fk_1w)r = 0, \quad (4)$$

а його корені:

$$\lambda_1 = -\left(fw + \frac{k_1}{2}\right) + \sqrt{w^2(1 + f^2) + \frac{k_1^2}{4}}; \quad (5)$$

$$\lambda_2 = -\left(fw + \frac{k_1}{2}\right) - \sqrt{w^2(1 + f^2) + \frac{k_1^2}{4}}, \quad (6)$$

де: λ_1, λ_2 – корені характеристичного рівняння, с⁻¹.

Загальне рішення диференціального рівняння матиме вигляд [6]:

$$r = C_1 \exp(\lambda_1 t) + C_2 \exp(\lambda_2 t) + r_{\text{цр}}. \quad (7)$$

Часткове рішення неоднорідного диференційного рівняння знаходимо у вигляді тригонометричного полінома [8]:

$$r_{\text{чр}} = M \cos(B + wt) + N \sin(B + wt). \quad (8)$$

де: $r_{\text{чр}}$ – часткове рішення неоднорідного диференційного рівняння, м.

Підставивши часткове рішення, а також його першу $r'_{\text{чр}} = -M\omega \sin(B + wt) + N\omega \cos(B + wt)$ й другу похідну $r''_{\text{чр}} = -M\omega^2 \cos(B + wt) - N\omega^2 \sin(B + wt)$ у вихідне диференційне рівняння, отримаємо:

$$\begin{aligned} & -M\omega^2 \cos(B + wt) - N\omega^2 \sin(B + wt) + \\ & + (2f\omega + k_1)(-M\omega \sin(B + wt) + N\omega \cos(B + wt)) - \\ & - (w^2 - fk_1\omega)(M \cos(B + wt) + N \sin(B + wt)) = -fg \cos(B + wt) - g \sin(B + wt); \end{aligned}$$

або

$$\begin{aligned} & -M\omega^2 \cos(B + wt) - N\omega^2 \sin(B + wt) - \\ & - (2f\omega^2 + k_1\omega)M \sin(B + wt) + (2f\omega^2 + k_1\omega)N \cos(B + wt) - \\ & - (w^2 - fk_1\omega)M \cos(B + wt) - (w^2 - fk_1\omega)N \sin(B + wt) = -fg \cos(B + wt) - g \sin(B + wt); \end{aligned}$$

Звідки маємо:

$$\begin{cases} (-2\omega^2 + fk_1\omega)M \cos(B + wt) + (2f\omega^2 + k_1\omega)N \cos(B + wt) = -fg \cos(B + wt) \\ (-2\omega^2 + fk_1\omega)N \sin(B + wt) - (2f\omega^2 + k_1\omega)M \sin(B + wt) = -g \sin(B + wt). \end{cases} \quad (9)$$

Значення коефіцієнтів даного тригонометричного полінома визначимо із системи рівнянь:

$$\begin{cases} (-2w^2 + fk_1w)M + (2fw^2 + k_1w)N = -gf \\ (-2fw^2 - k_1w)M + (-2w^2 + fk_1w)N = -g \end{cases}; \quad (10)$$

визначник якої становить:

$$\begin{aligned} \Delta &= \begin{vmatrix} -2w^2 + fk_1w & 2fw^2 + k_1w \\ -2fw^2 - k_1w & -2w^2 + fk_1w \end{vmatrix} = 4w^4 - 2w^3fk_1 - 2w^3fk_1 + w^2f^2k_1^2 + \\ & + 4f^2w^4 + 2w^3fk_1 + 2w^3fk_1 + k_1^2w^2 = 4w^4 + f^2k_1^2w^2 + \\ & + 4f^2w^4 + k_1^2w^2 = 4w^4(1 + f^2) + k_1^2w^2(1 + f^2) = w^2(4w^2 + k_1^2)(1 + f^2). \end{aligned}$$

Значення коефіцієнтів становитимуть:

$$\begin{aligned} N &= \frac{\begin{vmatrix} -2w^2 + fk_1w & -gf \\ -2fw^2 - k_1w & -g \end{vmatrix}}{\Delta} = \frac{2gw^2 - fk_1wg - 2f^2gw^2 - fk_1wg}{w^2(4w^2 + k_1^2)(1 + f^2)} = \\ &= \frac{2g[w(1 - f^2) - fk_1]}{\omega(4w^2 + k_1^2)(1 + f^2)}; \end{aligned}$$

$$M = \frac{\begin{vmatrix} -gf & 2fw^2 + k_1w \\ -g & -2w^2 + fk_1w \end{vmatrix}}{\Delta} = \frac{2gfw^2 - f^2k_1wg + 2fw^2g + k_1wg}{(4w^4 + k_1^2w^2)(1 + f^2)} =$$

$$= \frac{g[4fw + k_1(1 - f^2)]}{w(4w^2 + k_1^2)(1 + f^2)}.$$

Тоді часткове рішення неоднорідного диференційного рівняння матиме вигляд:

$$r_{\text{чп}} = \frac{g[4fw + k_1(1 - f^2)]}{w(4w^2 + k_1^2)(1 + f^2)} \cos(B + wt) + \frac{2g[w(1 - f^2) - fk_1]}{w(4w^2 + k_1^2)(1 + f^2)} \sin(B + wt). \quad (11)$$

Для часткового рішення рівняння (11) можна записати:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{gw[4fw + k_1(1 - f^2)]}{2gw[w(1 - f^2) - fk_1]} = \frac{4fw + k_1(1 - f^2)}{2[w(1 - f^2) - fk_1]}; \quad \varphi = \operatorname{arctg} \frac{4fw + k_1(1 - f^2)}{2[w(1 - f^2) - fk_1]},$$

а також:

$$c = \sqrt{\frac{g^2[4fw + k_1(1 - f^2)]^2}{w^2(4w^2 + k_1^2)^2(1 + f^2)^2} + \frac{4g^2[w(1 - f^2) - fk_1]^2}{w^2(4w^2 + k_1^2)^2(1 + f^2)^2}} =$$

$$= \sqrt{\frac{g^2\{[4fw + k_1(1 - f^2)]^2 + 4[w(1 - f^2) - fk_1]^2\}}{w^2(4w^2 + k_1^2)^2(1 + f^2)^2}} =$$

$$= \sqrt{\frac{g^2[16f^2w^2 + k_1^2(1 - f^2)^2 + 4w^2(1 - f^2)^2 + 4f^2k_1^2]}{w^2(4w^2 + k_1^2)^2(1 + f^2)^2}} =$$

$$= \sqrt{\frac{g^2[4w^2(4f^2 + (1 - f^2)^2) + k_1^2(4f^2 + (1 - f^2)^2)]}{w^2(4w^2 + k_1^2)^2(1 + f^2)^2}} =$$

$$= \sqrt{\frac{g^2(1 + f)^2(4w^2 + k_1^2)}{w^2(4w^2 + k_1^2)^2(1 + f^2)^2}} = \sqrt{\frac{g^2}{w^2(4w^2 + k_1^2)}} = \frac{g}{w\sqrt{4w^2 + k_1^2}}.$$

Тоді повне рішення неоднорідного диференційного рівняння (1), як сума загального та часткового рішень матиме вигляд:

$$r = C_1 \exp(\lambda_1 t) + C_2 \exp(\lambda_2 t) +$$

$$+ \frac{g}{w\sqrt{4w^2 + k_1^2}} \sin\left(B + \operatorname{arctg} \frac{4fw + k_1(1 - f^2)}{2[w(1 - f^2) - fk_1]} + wt\right). \quad (12)$$

Відносна швидкість руху частинки по лопатці становитиме:

$$v_R = \frac{dr}{dt} = \lambda_1 C_1 \exp(\lambda_1 t) + \lambda_2 C_2 \exp(\lambda_2 t) + \frac{g}{\sqrt{4w^2 + k_1^2}} \cos \left(B + \operatorname{arctg} \frac{4fw + k_1(1-f^2)}{2[w(1-f^2) - fk_1]} + wt \right). \quad (13)$$

Прийнявши початкові умови:

$$t = 0; \quad r = R_{II} = R - 0,5d_E; \quad v_R = v_{RII} = 0, \quad (14)$$

система рівнянь для визначення постійних величин диференційного рівняння (1) буде мати вигляд:

$$\begin{cases} C_1 + C_2 = R_{II} - \frac{g}{w\sqrt{(4w^2 + k_1^2)}} \sin \left(B + \operatorname{arctg} \frac{4fw + k_1(1-f^2)}{2[w(1-f^2) - fk_1]} \right) \\ \lambda_1 C_1 + \lambda_2 C_2 = - \frac{g}{\sqrt{(4w^2 + k_1^2)}} \cos \left(B + \operatorname{arctg} \frac{4fw + k_1(1-f^2)}{2[w(1-f^2) - fk_1]} \right). \end{cases} \quad (15)$$

Визначник даної системи рівнянь становить:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ \lambda_1 & \lambda_2 \end{vmatrix} = \lambda_2 - \lambda_1.$$

Значення постійних величин диференційного рівняння (1) становитимуть:

$$C_1 = \frac{\begin{vmatrix} R_{II} - \frac{g}{w\sqrt{(4w^2 + k_1^2)}} \sin \left(B + \operatorname{arctg} \frac{4fw + k_1(1-f^2)}{2[w(1-f^2) - fk_1]} \right) & 1 \\ - \frac{g}{\sqrt{(4w^2 + k_1^2)}} \cos \left(B + \operatorname{arctg} \frac{4fw + k_1(1-f^2)}{2[w(1-f^2) - fk_1]} \right) & \lambda_2 \end{vmatrix}}{\Delta} =$$

$$= \frac{\lambda_2 R_{II} - \frac{\lambda_2 g}{w\sqrt{(4w^2 + k_1^2)}} \sin \left(B + \operatorname{arctg} \frac{4fw + k_1(1-f^2)}{2[w(1-f^2) - fk_1]} \right)}{\lambda_2 - \lambda_1} +$$

$$+ \frac{\frac{g}{\sqrt{(4w^2 + k_1^2)}} \cos \left(B + \operatorname{arctg} \frac{4fw + k_1(1-f^2)}{2[w(1-f^2) - fk_1]} \right)}{\lambda_2 - \lambda_1};$$

$$C_2 = \frac{\begin{vmatrix} 1 & R_{II} - \frac{g}{w\sqrt{(4w^2 + k_1^2)}} \sin\left(B + \operatorname{arctg} \frac{4fw + k_1(1-f^2)}{2[w(1-f^2) - fk_1]}\right) \\ \lambda_1 & -\frac{g}{\sqrt{(4w^2 + k_1^2)}} \cos\left(B + \operatorname{arctg} \frac{4fw + k_1(1-f^2)}{2[w(1-f^2) - fk_1]}\right) \end{vmatrix}}{\Delta} =$$

$$-\frac{g}{\sqrt{(4w^2 + k_1^2)}} \cos\left(B + \operatorname{arctg} \frac{4fw + k_1(1-f^2)}{2[w(1-f^2) - fk_1]}\right)$$

$$\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} - \frac{\lambda_1 R_{II} - \frac{\lambda_1 g}{w\sqrt{(4w^2 + k_1^2)}} \sin\left(B + \operatorname{arctg} \frac{4fw + k_1(1-f^2)}{2[w(1-f^2) - fk_1]}\right)}{\lambda_2 - \lambda_1}.$$

або

$$C_1 = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \left[R_{II} - \frac{g}{w\sqrt{(4w^2 + k_1^2)}} \sin\left(B + \operatorname{arctg} \frac{4fw + k_1(1-f^2)}{2[w(1-f^2) - fk_1]}\right) + \frac{g}{\lambda_2 \sqrt{(4w^2 + k_1^2)}} \cos\left(B + \operatorname{arctg} \frac{4fw + k_1(1-f^2)}{2[w(1-f^2) - fk_1]}\right) \right];$$

$$C_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \left[\frac{g}{w\sqrt{(4w^2 + k_1^2)}} \sin\left(B + \operatorname{arctg} \frac{4fw + k_1(1-f^2)}{2[w(1-f^2) - fk_1]}\right) - \frac{g}{\lambda_1 \sqrt{(4w^2 + k_1^2)}} \cos\left(B + \operatorname{arctg} \frac{4fw + k_1(1-f^2)}{2[w(1-f^2) - fk_1]}\right) - R_{II} \right].$$

Для значень постійних величин диференційних рівнянь можна записати:

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{g}{\lambda_2 \sqrt{(4w^2 + k_1^2)}} : \left(-\frac{g}{w\sqrt{(4w^2 + k_1^2)}} \right) = -\frac{w}{\lambda_2};$$

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = -\frac{g}{\lambda_1 \sqrt{(4w^2 + k_1^2)}} : \frac{g}{w\sqrt{(4w^2 + k_1^2)}} = -\frac{w}{\lambda_1}$$

$$\varphi_1 = -\operatorname{arctg} \frac{w}{\lambda_2}; \quad \varphi_2 = -\operatorname{arctg} \frac{w}{\lambda_1}$$

$$\begin{aligned}
c_1 &= \sqrt{\frac{g^2}{w^2(4w^2 + k_1^2)} + \frac{g^2}{\lambda_2^2(4w^2 + k_1^2)}} = \sqrt{\frac{g^2 \lambda_2^2 + g^2 w^2}{\lambda_2^2 w^2 (4w^2 + k_1^2)}} = \\
&= \sqrt{\frac{g^2 (\lambda_2^2 + w^2)}{\lambda_2^2 w^2 (4w^2 + k_1^2)}} = \frac{g}{w \sqrt{(4w^2 + k_1^2)}} \sqrt{1 + \frac{w^2}{\lambda_2^2}}; \\
c_2 &= \sqrt{\frac{g^2}{w^2(4w^2 + k_1^2)} + \frac{g^2}{\lambda_1^2(4w^2 + k_1^2)}} = \sqrt{\frac{g^2 \lambda_1^2 + g^2 w^2}{\lambda_1^2 w^2 (4w^2 + k_1^2)}} = \\
&= \sqrt{\frac{g^2 (\lambda_1^2 + w^2)}{\lambda_1^2 w^2 (4w^2 + k_1^2)}} = \frac{g}{w \sqrt{(4w^2 + k_1^2)}} \sqrt{1 + \frac{w^2}{\lambda_1^2}};
\end{aligned}$$

З урахуванням цього, значення постійних величин диференційного рівняння (1) матимуть значення:

$$C_1 = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \left[R_{II} - \frac{g}{w \sqrt{(4w^2 + k_1^2)}} \sqrt{1 + \frac{w^2}{\lambda_2^2}} \times \sin \left(B + \arctg \frac{4fw + k_1(1 - f^2)}{2[w(1 - f^2) - fk_1]} - \arctg \frac{w}{\lambda_2} \right) \right], \quad (16)$$

$$\begin{aligned}
C_2 &= \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \left[\frac{g}{w \sqrt{(4w^2 + k_1^2)}} \sqrt{1 + \frac{w^2}{\lambda_1^2}} \times \right. \\
&\times \left. \sin \left(B + \arctg \frac{4fw + k_1(1 - f^2)}{2[w(1 - f^2) - fk_1]} - \arctg \frac{w}{\lambda_1} \right) - R_{II} \right]. \quad (17)
\end{aligned}$$

Висновок. Отримане рішення диференційного рівняння дозволяє встановити параметри руху матеріальних частинок по радіальній лопатці обертового барабана з урахуванням опору середовища.

Список літератури

1. Василенко П. М. Теория движения частицы по шероховатым поверхностям сельскохозяйственных машин. Киев. 1960. 284 с.
2. Марченко Н. М., Личман Г. И., Шебалкин А. Е. Механизация внесения органических удобрений. Москва. 1990. 207 с.
3. Якубаускас В. И. Технологические основы механизированного внесения удобрений. Москва. 1973. 231 с.
4. Голуб Г. А. Агропромислове виробництво їстівних грибів. Механіко-технологічні основи. Київ. 2007. 332 с.
5. Голуб Г. А., Марус О. А. Аналіз рівнянь руху матеріальної частинки по радіальній лопатці обертового барабана. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. Київ. 2016. Вип. 251. С. 43—53.
6. Голуб Г. А., Марус О. А. Аналіз рівнянь руху матеріальної частинки по радіальній лопатці обертового барабана. Науковий вісник Національного

університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. Київ. 2016. Вип. 251. С. 43—53.

7. Голуб Г. А., Марус О. А. Визначення мінімальної граничної кутової швидкості для забезпечення відцентрового руху частинки по радіальній лопатці обертового барабана. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. Київ. 2016. Вип. 254. С. 37—44.

8. *Выгодский М.Я.* Справочник по высшей математике. Москва. 1959. 783 с.

9. Голуб Г. А. Радіальна швидкість руху компосту в барабанно-пальцевому розпушувачі. Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства. Харків. 2003. Вип. 21. С. 484—491.

10. *Зельдович Я. Б., Яглом И. М.* Высшая математика для начинающих физиков и техников. Москва. 1982. 512 с.

References

1. *Vasilenko P. M.* (1960) *Teoriya dvizheniya chastitsy po sherokhovatyam poverkhnostyam sel'skokhozyaystvennykh mashin* [The theory of particle motion on rough surfaces of agricultural machinery]. Kiev. 284.

2. *Marchenko N. M., Lichman G. I., Shebalkin A. E.* (1990). *Mekhanizatsiya vneseniya organicheskikh udobreniy* [Mechanization of organic fertilizer]. Moscow. 207.

3. *Yakubauskas V. I.* (1973). *Tekhnologicheskie osnovy mekhanizirovannogo vneseniya udobreniy* [Technological bases mechanized fertilizer application]. Moscow. 231.

4. *Golub G. A.* (2007). *Agropromislove virobnitstvo yistivnikh gribiv* [Agro-industrial production of edible mushrooms]. *Mekhaniko-tehnologichni osnovi*. Kiev. 332.

5. *Golub G. A. Marus O. A.* (2016). *Analiz rivnyan' rukhu material'noyi chastinki po radial'niy lopatsi obertovogo barabana* [The analysis of the equations of motion of a particle on radial blade rotating drum]. *Naukoviy visnik Natsional'nogo universitetu bioresursiv i prirodkoristuvannya Ukraini*. Seriya: tekhnika ta energetika APK. Kiev. Vip. 251. 43-53.

6. *Golub G. A. Marus O. A.* (2016). *Analiz rivnyan' rukhu material'noyi chastinki po radial'niy lopatsi obertovogo barabana* [The analysis of the equations of motion of a particle on radial blade rotating drum]. *Naukoviy visnik Natsional'nogo universitetu bioresursiv i prirodkoristuvannya Ukraini*. Seriya: tekhnika ta energetika APK. Kiev. Vip. 251. 43-53.

7. *Golub G. A. Marus O. A.* (2016). *Viznachennya minimal'noyi granichnoyi kutovoyi shvidkosti dlya zabezpechennya vidtsentrovogo rukhu chastinki po radial'niy lopatsi obertovogo barabana* [Determining the minimum limit for the angular velocity of a particle in a centrifugal radial blade rotating drum]. *Naukoviy visnik Natsional'nogo universitetu bioresursiv i prirodkoristuvannya Ukraini*. Seriya: tekhnika ta energetika APK. Kiev. Vip. 254. 37-44.

8. *Vygodskiy M. Ya.* (1959). *Spravochnik po vysshey matematike* [Handbook of higher mathematics]. 4-e izdanie, stereotipnoe. Moscow. 783.

9. *Golub G. A.* (2003). *Radial'na shvidkist' rukhu kompostu v barabanno-pal'tsevomu rozpushuvachi* [The radial velocity of the compost in a drum-pallavam baking powder]. *Visnik Kharkivs'kogo derzhavnogo tekhnichnogo universitetu sil's'kogo gospodarstva "Mekhanizatsiya sil's'kogospodars'kogo virobnitstva"*. Kharkiv. Vip. 21. 484-491.

10. *Zel'dovich Ya. B., Yaglom I. M.* (1982). *Vysshaya matematika dlya*

АНАЛИЗ ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦЫ ПО РАДИАЛЬНОЙ ЛОПАТКЕ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ БАРАБАНА С УЧЕТОМ СОПРОТИВЛЕНИЯ СРЕДЫ

Г. А. Голуб, О. А. Марус, Я. Д. Ярош

Аннотация. Устройства для перемешивания на основе вращающихся барабанов имеют высокие показатели качества при перемешивании, и поэтому находят все большее распространение при разработке процессов сушки сельскохозяйственных продуктов и материалов, биотехнологических процессов ферментации биомассы в аэробных и анаэробных условиях. Повышение эффективности работы вращающихся барабанов путем обоснования методов для определения параметров центростремительного движения частиц по радиальной лопатке во вращающемся барабане, которые позволят установить рациональные значения угловой скорости и конструктивные параметры вращающихся барабанов, требует дальнейшего совершенствования.

Для обобщения проведенных исследований целесообразно получить решение дифференциального уравнения, описывающего движение частиц по радиальных лопатках вращающегося барабана с учетом сопротивления среды. В этом случае на частицу действуют центростремительная сила инерции, кориолисова сила инерции, сила тяжести, сила трения из-за сопротивления воздуха, которая прижимает частицу к лопатке, а также сила сопротивления воздуха, которая противодействует движению частицы в радиальном направлении. При этом коэффициент пропорциональности, определяющий силу сопротивления среды, которая направлена противоположно направлению скорости движения частиц и пропорциональна скорости движения частицы в первой степени, принят для случая, когда воздух обтекает частицы ламинарным потоком при числах Рейнольдса меньше 5.

Полученное решение дифференциального уравнения, определяет параметры движения частицы по радиальной лопатке вращающегося барабана с учетом сопротивления среды, позволяет установить радиальное перемещение и относительную скорость движения частицы по лопатке, а также значения постоянных величин дифференциального уравнения.

Ключевые слова: барабан, радиальная лопатка, движение частицы

ANALYSIS IN PARTICLE MOTION RADYALNYM BLADES VRASCHAYUSCHEHOSYA DRUM C RESISTANCE ACCOUNTING ENVIRONMENT

G. A. Golub, O. A. Marus, Ya. D. Yarosh

Abstract. *Devices for mixing through rotating drum with high quality and so stirring is becoming more common in the development process of drying of agricultural products and materials, biotechnology fermentation of biomass under aerobic and anaerobic conditions. Increasing efficiency by rotating drums grounding methods for determining the parameters of centrifugal movement of particles along the radial blade in rotating drum that will establish rational values of angular velocity and design parameters of rotating drums needs further improvement.*

To summarize the studies expedient to obtain the solution of differential equations describing the motion of particles in radial blades rotating drum support given environment. In this case, a piece of acting centrifugal force of inertia, Coriolis force of inertia, gravity, friction due to air resistance, which presses the piece to the blade, and the force of air resistance which counteracts the movement of particles in the radial direction. The coefficient of proportionality, which determines the resistance of medium, which is directed opposite direction and velocity of particle is proportional to velocity of particle in first degree, accepted case when air flows around particles laminar flow in smaller Reynolds numbers 5.

The resulting solution of differential equations defining the parameters of a particle on radial blade rotating drum considering to set the resistance of the medium radial displacement and relative velocity of the particle on the blade, and the importance of constant values of differential equations.

Key words: *drum, radial blade, movement of particles*

УДК 620.92

ВИРОБНИЦТВО ДИЗЕЛЬНОГО БІОПАЛИВА ІЗ ЗЕРНОВОГО ВОРОХУ ОЛІЙНИХ КУЛЬТУР

**Г. А. Голуб, доктор технічних наук
М. Ю. Павленко, В. В. Чуба, кандидати технічних наук
e-mail: maxim_pavlenko@i.ua**

Анотація. *Розглянуто питання оцінки сировинної бази для виробництва дизельного біопалива із зернового вороху. Оцінено*

© Г. А. Голуб, М. Ю. Павленко, В. В. Чуба, 2017