

which is required to drive mechanisms during the transient processes. The dynamic optimization (minimization) of stresses in the arising ropes of cargo lifting equipment is improved. One may use for these aims the two – mass model.

Three stages of lifting of the load are studied in detail. They are: a) the selecting of rope's slack; b) the effort in the rope increases from zero to the cargo's gravity force; c) the lifting «in the weight» for full tension of the rope. The laws are established which describe the changes of rope's pulling force at the second stage of lifting. These laws gives one the possibility to minimize the vibration potentially arising during the lifting process. However, the characteristic feature of system's dynamics at the first stage of lifting is the emergence of its own oscillations of two different forms. These own frequencies and amplitudes for every form are established.

There were considered four possible modes of motion of drive mechanism at the third stage of lifting during its start – up which minimize the certain characteristics of this mechanism. There were found the best modes of optimal motion for every of these modes which minimize the dynamic loads occurring in the elastic connections (ropes) of the crane's lifting mechanism. One may use methods, approaches and mathematical apparatus of the classical variation's calculus.

The results obtained can later be used to update and improve existing engineering methods for calculating the motion mode drive for both stages (projection and design) of such systems, and for the modes of their real operation, as well.

Keywords: *dynamic optimization, minimization, load, elastic elements, lifting machines, lifting conditions, rope's stiffness, lifting «picked out»*

УДК 531.32

ВИЗНАЧЕННЯ МІНІМАЛЬНОЇ ГРАНИЧНОЇ КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВІДЦЕНТРОВОГО РУХУ ЧАСТИНКИ ПО РАДІАЛЬНІЙ ЛОПАТЦІ ОБЕРТОВОГО БАРАБАНА

**Г. А. Голуб, доктор технічних наук
О. А. Марус, кандидат технічних наук
e-mail: gagolub@mail.ru**

Анотація. Пристрої для перемішування на основі обертових барабанів знаходить все більше поширення при розробці

© Г. А. Голуб, О. А. Марус, 2016

біотехнологічних процесів ферментації, а тому підвищення ефективності їх роботи 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.

Встановлено, що найбільш складні умови розгону матеріальної частинки при русі по радіальній лопатці будуть тоді, коли руху під дією відцентрової сили протидіють сила тертя за рахунок коріолісової сили, сила тертя за рахунок сили тяжіння, а також безпосередньо сила тяжіння. Визначено мінімальну граничну кутову швидкість для забезпечення відцентрового руху матеріальних частинок по радіальній лопатці при різних варіантах обертання барабана. Запропоновано методику розрахунку мінімальної граничної кутової швидкості, яка забезпечує відцентровий рух матеріальних частинок по радіальній лопатці. Отримано вираз для розрахунку граничної кутової швидкості, яка забезпечує відцентровий рух матеріальних частинок по радіальній лопатці з точністю 10-12 % в широкому діапазоні умов руху і розмірів барабана.

Ключові слова: барабан, радіальна лопатка, рух частинки

Постановка проблеми. Пристрої для перемішування на основі обертових барабанів знаходять все більше поширення при розробці біотехнологічних процесів ферментації, а тому підвищення ефективності їх роботи 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.

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. Ці дослідження стосувалися аналізу відцентрового руху матеріальних частинок по радіальних робочих органах в обмеженому секторі повороту барабана.

Встановлено також [5], що диференційні рівняння, які описують рух матеріальної частинки, що рухається по радіальних лопатках в

обертівому барабані при його обертанні проти та за часовою стрілкою, а також при системах відліку кута повороту від горизонтальної та вертикальної вісі мають наступний вигляд:

$$m \frac{dv_R}{dt} = m \frac{d^2 r}{dt^2} = mrw^2 - 2fmw \frac{dr}{dt} - fmg \cos(B + wt) - mg \sin(B + wt); \quad (1)$$

$$m \frac{dv_R}{dt} = m \frac{d^2 r}{dt^2} = mrw^2 - 2fmw \frac{dr}{dt} + fmg \sin(B + wt) - mg \cos(B + wt); \quad (2)$$

$$m \frac{dv_R}{dt} = m \frac{d^2 r}{dt^2} = mrw^2 - 2fmw \frac{dr}{dt} + fmg \cos(B + wt) + mg \sin(B + wt); \quad (3)$$

$$m \frac{dv_R}{dt} = m \frac{d^2 r}{dt^2} = mrw^2 - 2fmw \frac{dr}{dt} - fmg \sin(B + wt) + mg \cos(B + wt), \quad (4)$$

де: m – маса частинки, кг; ω – кутова швидкість обертання барабана, рад/с; r – поточний радіус положення частинки на лопатці, м; g – прискорення земного тяжіння, м/с²; f – коефіцієнт тертя матеріальної частинки по матеріалу лопатки, відн. од.; B – початковий кут повороту лопатки барабана, рад.; t – час повороту барабана, с; v_R – мінімальна відносна швидкість руху частинки по лопатці, м/с; mrw^2 – відцентрова сила інерції, Н; $2mw \frac{dr}{dt}$ – коріолісова сила, Н; mg – сила тяжіння, Н.

Встановлено також [6], що повне рішення диференціальних рівнянь (1)–(4) має наступний вигляд:

$$r = C_1 \exp(\lambda_1 t) + C_2 \exp(\lambda_2 t) + \frac{g}{2w^2} \sin\left(B + wt + \arctg \frac{2f}{1-f^2}\right). \quad (5)$$

При цьому відносна швидкість руху частинки по лопатці становитиме:

$$v_R = \frac{dr}{dt} = \lambda_1 C_1 \exp(\lambda_1 t) + \lambda_2 C_2 \exp(\lambda_2 t) + \frac{g}{2w} \cos\left(B + wt + \arctg \frac{2f}{1-f^2}\right). \quad (6)$$

Значення постійних величин при цьому мають значення:

$$C_1 = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \left[R_{II} - \frac{g}{2w^2} \sqrt{1 + \frac{w^2}{\lambda_2^2}} \sin\left(B + \arctg \frac{2f}{1-f^2} - \arctg \frac{w}{\lambda_2}\right) \right]; \quad (7)$$

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

Для встановлення мінімальної граничної кутової швидкості для забезпечення відцентрового руху матеріальних частинок по радіальній лопатці доцільно провести додаткові дослідження.

Мета досліджень. Визначити мінімальну граничну кутову швидкість, яка забезпечує відцентровий рух матеріальних частинок по радіальній лопатці при різних варіантах обертання барабана.

Результати досліджень. Приймаючи, що матеріальна частинка рухатися по поверхні лопатки до периферії барабана, а тому в початковий момент її відносна швидкість дорівнюватиме нулю, а сама частинка буде знаходитися на деякій відстані від центру барабана. Враховуючи такі початкові умови:

$$t = 0; \quad r = R_{II}; \quad v_R = v_{RII} = 0. \quad (8)$$

З урахуванням вищенаведеного, розрахуємо параметри руху матеріальної частинки, що відцентрово рухається по радіальних лопатках в обертовому барабані при вихідних параметрах приведених у табл. 1.

1. Вихідні параметри руху матеріальної частинки по радіальних лопатках в обертовому барабані

Параметри	Од. виміру	Значення
Діаметр барабана	мм	2000
Радіус барабана	мм	1000
Початковий радіус положення частинки на лопатці	мм	500
Прискорення сили тяжіння	м/с ²	9,81
Коефіцієнт тертя матеріалу по лопатці	–	0,40

Результати розрахунку параметрів руху матеріальної частинки, що відцентрово рухається по радіальних лопатках в обертовому барабані при вищенаведених вихідних параметрах приведені на рис. 1 – рис. 4.

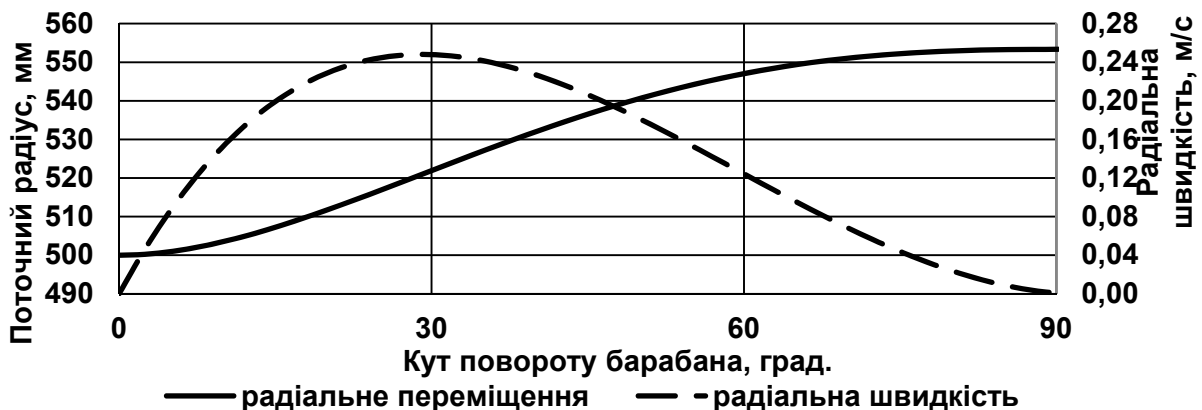


Рис. 1. Параметри руху частинки в 1-му квадранті (0-90 град.).

Найбільш складні умови розгону матеріальної частинки при русі по радіальній лопатці будуть тоді, коли руху під дією відцентрової сили протидіють сила тертя за рахунок коріолісової сили, сила тертя за рахунок сили тяжіння, а також безпосередньо сила тяжіння (рис 1). У цьому випадку мінімальна гранична кутова швидкість, яка забезпечує відцентровий рух матеріальних частинок по радіальній лопатці, за умов руху приведених у табл. 1, становить 4,16 рад/с.

Розрахувати мінімальну граничну кутову швидкість, яка забезпечує відцентровий рух матеріальних частинок по радіальній лопатці можна за допомогою наступного виразу:

$$w = \sqrt{\frac{g}{r}(1+f)}. \quad (9)$$

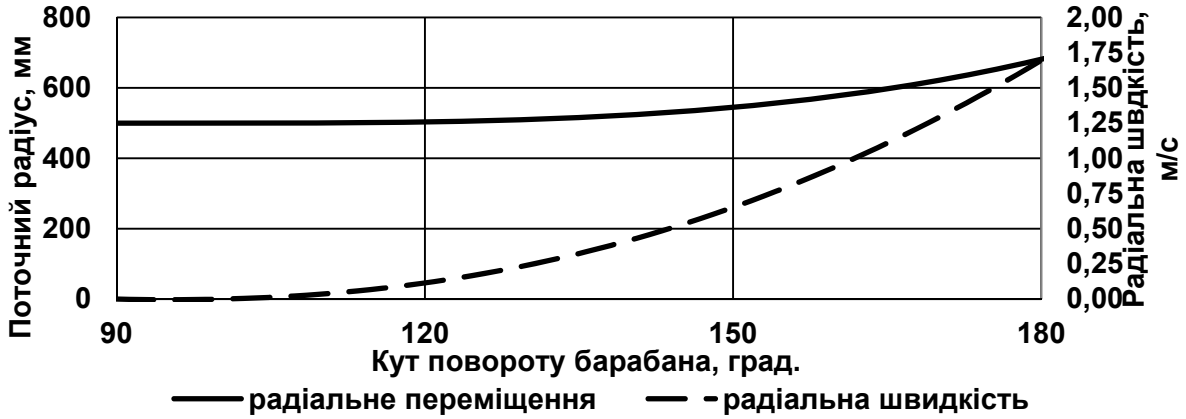


Рис. 2. Параметри руху частинки в 2-му квадранті (90-180 град.).

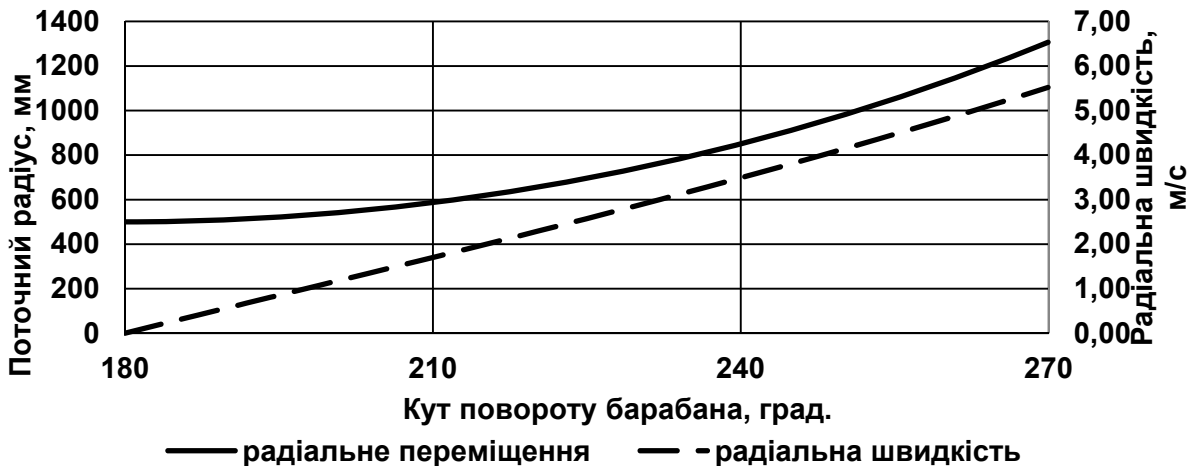


Рис. 3. Параметри руху частинки в 3 квадранті (180-270 град.).

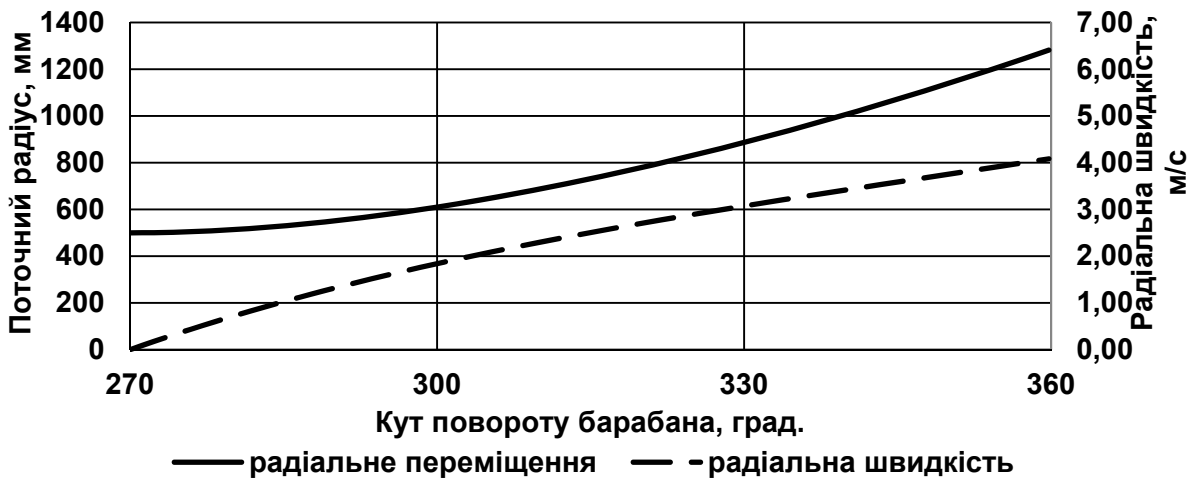


Рис. 4. Параметри руху частинки в 4 квадранті (270-360 град.).

Даний вираз забезпечує розрахунок граничної кутової швидкості, яка забезпечує відцентровий рух матеріальних частинок по радіальній лопатці з точністю 10–12 %.

Висновок. Отримано вираз для розрахунку граничної кутової швидкості, яка забезпечує відцентровий рух матеріальних частинок по радіальній лопатці з точністю 10–12 % в широкому діапазоні умов руху і розмірів барабана.

Список літератури

1. *Василенко П. М.* Теория движения частицы по шероховатым поверхностям сельскохозяйственных машин / *П. М. Василенко*. – К.: УАСХН, 1960. – 284 с.
2. *Марченко Н. М.* Механизация внесения органических удобрений / *Н. М. Марченко, Г. И. Личман, А. Е. Шебалкин*. – М.: ВО “Агропромиздат”, 1990. – 207 с.
3. *Якубаускас В. И.* Технологические основы механизированного внесения удобрений / *В. И. Якубаускас*. – М.: “Колос”, 1973. – 231 с.
4. *Голуб Г. А.* Агропромислове виробництво їстівних грибів. Механіко-технологічні основи / *Г. А. Голуб*. – К.: Аграрна наука, 2007. – 332 с.
5. *Голуб Г. А.* Механіка руху частинки по радіальній лопатці обертового барабана / *Г. А. Голуб, О. А. Марус* // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. – К., 2016. – Вип. 241. – 396 с. – С. 350–358.
6. *Голуб Г. А.* Аналіз рівнянь руху матеріальної частинки по радіальній лопатці обертового барабана / *Г. А. Голуб, О. А. Марус* // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. – К., 2016. – Вип. 251. – 408 с. – С. 43–53.

References

1. *Vasylenko, P. M.* (1960). *Teoryya dvyzhenyya chastytsi po sherokhovatim poverkhnostyam sel'skokhozyaystvennykh mashyn* [Theory of the motion of particles on rough surfaces agricultural machines]. K.: UASKhN, 284.
2. *Marchenko, N. M., Lychman, H. Y., Shebalkyn, A. E.* (1990). *Mekhanyzatsyya vnesenyya orhanycheskykh udobrenyy* [Mechanization of the organic fertilizer application]. M.: VO “Ahpromyzdat”, 207.
3. *Yakubauskas, V. Y.* (1873). *Tekhnolohycheskye osnovi mekhanyzyrovannoho vnesenyya udobrenyy* [Technological bases of the mechanized application of fertilizers]. M.: Kolos, 231.
4. *Holub, H. A.* (2007). *Ahpromyslove vyrobnytstvo yistivnykh hrybiv. Mekhaniko-tekhnolohichni osnovy* [Agro-industrial production of edible mushrooms. Mechanical-technological bases]. K.: Ahrarna nauka, 332.
5. *Holub, H. A., Marus, O. A.* (2016). *Mekhanika rukhu chastynky po radial'niy lopattsi obertovoho barabana* [Mechanics of the motion of the particle in the radial shoulder of the rotating drum]. Scientific Bulletin of National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Series: machinery and energetics AIC. K., Vyp. 241, 396, 350–358.
6. *Holub, H. A., Marus, O. A.* (2016). *Analiz rivnyan' rukhu material'noyi chastynky po radial'niy lopattsi obertovoho barabana* [Analysis of the equations of motion of material particles on the radial shoulder of the rotating drum]. Scientific Bulletin of National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Series: machinery and energetics AIC. K., Vyp. 251, 408, 43–53.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИНИМАЛЬНОЙ ПРЕДЕЛЬНОЙ УГЛОВОЙ
СКОРОСТИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ДВИЖЕНИЯ
ЧАСТИЦЫ ПО РАДИАЛЬНОЙ ЛОПАТКЕ
ВРАЩАЮЩЕГОСЯ БАРАБАНА**

Г. А. Голуб, О. А. Марус

Аннотация. Устройства для перемешивания на основе вращающихся барабанов находят все большее распространение при разработке биотехнологических процессов ферментации, а поэтому повышение эффективности их работы путем обоснования методов определения параметров центробежного движения частиц по радиальной лопатке во вращающемся барабане, которые позволят установить рациональные значения угловой скорости и конструктивные параметры вращающихся барабанов, требует дальнейшего усовершенствования.

Установлено, что наиболее сложные условия разгона материальной частицы при движении по радиальной лопатке будут тогда, когда движению под действием центробежной силы противодействуют сила трения за счет кориолисовой силы, сила трения за счет силы тяжести, а также непосредственно сила тяжести. Определена минимальная предельная угловая скорость для обеспечения центробежного движения материальных частиц по радиальной лопатке при различных вариантах вращения барабана. Предложена методика расчета минимальной предельной угловой скорости, которая обеспечивает центробежное движение материальных частиц по радиальной лопатке. Получено выражение для расчета предельной угловой скорости, которая обеспечивает центробежное движение материальных частиц по радиальной лопатке с точностью 10-12% в широком диапазоне условий движения и размеров барабана.

Ключевые слова: барабан, радиальная лопатка, движение частицы

**DETERMINATION OF MINIMUM ANGULAR VELOCITY TO PROVIDE
CENTRIFUGAL MOTION OF PARTICLE IN RADIAL SHOULDER
OF ROTATING DRUM**

G. A. Golub, O. A. Marus

Abstract. Devices for mixing based on rotating drums is becoming more prevalent in developing biotechnological fermentation process and therefore improve their performance by grounding methods for determining the parameters of centrifugal movement of particles along the radial blade in a rotating drum that will establish rational values of angular velocity and the design parameters of rotating drums requires further improvement.

Found that the most difficult conditions of material particle acceleration when driving on radial blade will be when the movement by

centrifugal forces opposing frictional force due to Coriolis force, the frictional force due to gravity, and gravity directly. The minimum limit for the angular speed centrifugal movement of material particles on the radial blade in different variants drum. The method of calculating the minimum limit angular velocity, which provides centrifugal motion of material particles on the radial blade, is offered. An expression for calculation of the limit of the angular velocity, which provides centrifugal motion of material particles in the radial blade with 10-12% accuracy in a wide range of traffic conditions and the size of the drum.

Keywords: drum, radial blade, movement of particles

УДК 631.3:636

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЗМІШУВАННЯ КОМПОНЕНТІВ ГНОЄ-КОМПОСТНОЇ СУМІШІ ЛОПАТЕВИМ РОБОЧИМ ОРГАНОМ

***С. І. Павленко, кандидат технічних наук
e-mail: gagolub@mail.ru***

Анотація. В результаті чисельного моделювання технологічного процесу змішування компонентів гноє-компостної суміші лопатевим робочим органом з використанням пакету програмного забезпечення Star CCM+ встановлені залежності зміни висоти сформованого бурта H , коефіцієнта варіації якості змішування δ від коефіцієнта завантаження k і кінематичного показника режиму роботи λ . Гноє-компостна суміш представляється у вигляді сферичних частинок радіусом 2,5 мм. При моделюванні процесу зазначеним методом задаються початкові положення частинок гноє-компостної суміші. Потім, виходячи з цих початкових даних заданих фізичних законів контактної взаємодії, обчислюються сили, що діють на кожну частинку в кожній інтервал часу. Для кожної частинки обчислюється результуюча сила і також вирішується задача Коші на вибраному відрізьку часу, результатом якої є початкові дані для наступного кроку. В якості фізичних моделей для чисельного моделювання були обрані наступні: поле сили тяжіння, модель дискретних елементів, лагранжева багатозфазність, модель багатозфазної взаємодії. Чисельне моделювання було проведено за повним факторним дослідом із загальною кількістю дослідів – 27.

© С. І. Павленко, 2016