

УДК 531.32

**ВПЛИВ ОПОРУ ПОВІТРЯ НА РУХ ЧАСТИНКИ ПО РАДІАЛЬНІЙ ЛОПАТЦІ
ОБЕРТОВОГО БАРАБАНА****Г. А. Голуб¹, О. А. Марус¹, Й. Чесна²***e-mail: gagolub@ukr.net, jonas.cesna@asu.lt*¹Національний університет біоресурсів і природокористування України
м. Київ, вул. Героїв оборони, 15, 03041, Україна,²Факультет сільськогосподарського машинобудування, університет ім. Aleksandras Stulginskis,
вул. Studentu. 15, LT-53362 Akademija Kauno r., Литва,

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.

Досліджено рух матеріальної частинки по радіальній лопатці в обертовому барабані із врахуванням наступних параметрів: діаметра та радіуса барабану, початкового радіуса положення матеріальної частинки на лопатці, прискорення сили тяжіння, коефіцієнта тертя матеріалу по лопатці, еквівалентного діаметра та щільності частинки, а також динамічної в'язкості повітря. Використання параметрів руху матеріальної частинки по радіальній лопатці в обертовому барабані, що були наведені раніше, дозволили визначити та порівняти закономірності руху частинки з урахуванням та без урахування опору повітря в залежності від квадранта, в якому вона знаходиться.

Отримані траєкторії матеріальної частинки при русі по радіальній лопатці в обертовому барабані дозволили визначити вплив опору повітря на радіальне переміщення та радіальну швидкість частинки в 4-х квадрантах. Дані дослідження показують, що на траєкторію руху матеріальної частинки в різних квадрантах впливає відцентрова сила, сила тертя, що виникає за рахунок коріолісової сили, сила тертя за рахунок сили тяжіння, а також безпосередньо сила тяжіння. Але кожна сила впливає по-різному в залежності від місця знаходження матеріальної частинки, тобто кута ковороту радіальної лопатки.

Ключові слова: барабан, радіальна лопатка, рух частинки, опір повітря.

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 і публікацій

Основи аналізу руху матеріальних частинок по робочих органах із горизонтальною та вертикальною віссями 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. Частина відомих досліджень направлена на вивчення руху частинок біомаси упродовж обертання горизонтальних реакторів для виробництва біогазу [5, 6, 7, 8, 9].

Встановлено також [10, 11, 12], що рішення диференційного рівняння, яке описує рух матеріальної частинки, що рухається по радіальних лопатках в обертовому барабані із урахуванням опору повітря, має наступний вигляд для переміщення та відносної швидкості руху частинки по лопатці:

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

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

де r – поточний радіус положення частинки на лопатці, м; λ_1, λ_2 – корені характеристичного рівняння, с^{-1} ; t – час повороту барабана, с; g – прискорення земного тяжіння, $\text{м}/\text{с}^2$; w – кутова швидкість обертання барабана, $\text{рад}/\text{с}$; k_1 – коефіцієнт пропорційності при ламінарному обтіканні частинки повітрям, с^{-1} ; f – коефіцієнт тертя частинки по матеріалу лопатки, відн. од.; B – початковий кут повороту лопатки барабана, рад.; v_R – відносна швидкість руху частинки по лопатці, $\text{м}/\text{с}$.

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

менших 5. Виходячи з цього, можемо записати [4]:

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

де η – динамічна в'язкість середовища, Н с/м²; d_E – розміри частинки через діаметр еквівалентного шару, м; m – маса частинки, кг; ρ – щільність матеріалу частинки, $\text{кг}/\text{м}^3$; V – об'єм частинки, м³.

При початкових умовах:

$$t = 0; \quad r = R_{II} = R - 0,5d_E; \quad v_R = v_{RII} = 0, \quad (4)$$

значення постійних величин становитимуть:

$$C_1 = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \left[R_{II} - \frac{g}{w\sqrt{(4w^2 + k_1^2)}} \sqrt{1 + \frac{w^2}{\lambda_2^2}} \times \sin\left(B + \operatorname{arctg} \frac{4fw + k_1(1-f^2)}{2[w(1-f^2) - fk_1]} - \operatorname{arctg} \frac{w}{\lambda_2}\right) \right], \quad (5)$$

$$C_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \left[\frac{g}{w\sqrt{(4w^2 + k_1^2)}} \sqrt{1 + \frac{w^2}{\lambda_1^2}} \times \sin\left(B + \operatorname{arctg} \frac{4fw + k_1(1-f^2)}{2[w(1-f^2) - fk_1]} - \operatorname{arctg} \frac{w}{\lambda_1}\right) - R_{II} \right]. \quad (6)$$

Якщо опір повітря відсутній, коефіцієнт пропорційності при ламінарному обтіканні частинки повітрям дорівнює нулю, а рівняння

(1–6) набувають вигляду, який найчастіше застосовується у дослідженнях:

$$r = C_1 \exp(\lambda_1 t) + C_2 \exp(\lambda_2 t) + \frac{g}{2w^2} \sin\left(B + wt + \operatorname{arctg} \frac{2f}{1-f^2}\right); \quad (7)$$

$$v_R = \frac{dr}{dt} = \lambda_1 C_1 \exp(\lambda_1 t) + \lambda_2 C_2 \exp(\lambda_2 t) + \frac{g}{2w} \cos\left(B + wt + \operatorname{arctg} \frac{2f}{1-f^2}\right). \quad (8)$$

Значення постійних величин при цьому мають значення:

$$C_1 = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \left[R_{II} - \frac{g}{2w^2} \sqrt{1 + \frac{w^2}{\lambda_2^2}} \sin\left(B + \operatorname{arctg} \frac{2f}{1-f^2} - \operatorname{arctg} \frac{w}{\lambda_2}\right) \right]; \quad (9)$$

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

Для встановлення та усвідомлення різниці в значеннях поточного радіусу положення частинки на лопатці та відносної швидкості руху частинки по лопатці, за наявності опору повітря та без нього, доцільно провести додаткові дослідження.

Мета, завдання та методика досліджень

Метою досліджень є встановлення різниці в значеннях поточного радіусу положення частинки на лопатці та відносної швидкості її руху по лопатці при наявності опору повітря та без нього.

Для досягнення мети було сформовано наступне завдання: дослідити вплив сил, що

виникають упродовж руху матеріальної частинки по радіальній лопатці обертового барабану на радіальну швидкість та переміщення частинки з урахуванням опору повітря та без нього.

Дослідження проводилися з використанням методів аналізу руху частинок по шорстких обертових поверхнях.

Результати досліджень

Із урахуванням початкових умов, розрахуємо параметри руху матеріальної частинки, що відцентрово рухається по радіальних лопатках в обертовому барабані при вихідних параметрах, наведених у табл. 1.

Таблиця 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
Еквівалентний діаметр частинки	м	0,001
Щільність частинки	кг/м ³	1200
Динамічна в'язкість повітря	Н с/м ²	0,0000182

Результати розрахунку параметрів руху матеріальної частинки, що відцентрово рухається по радіальних лопатках в обертовому барабані

при вищенаведених вихідних параметрах наведені на рис. 1–4.

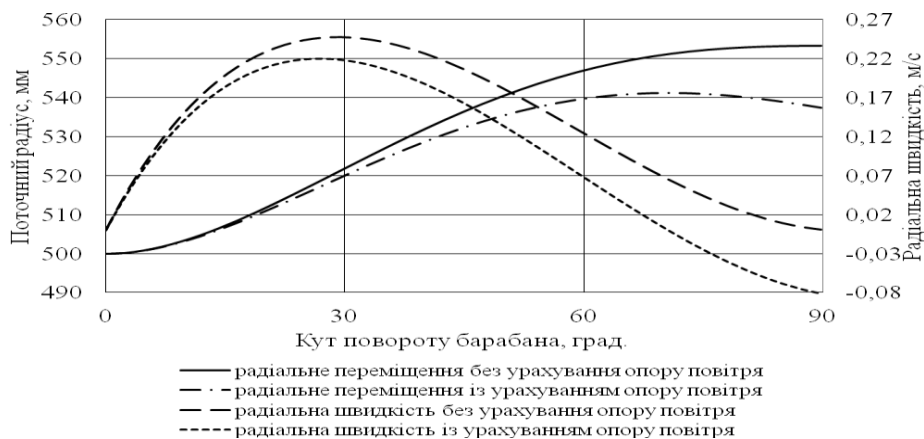


Рис. 1. Параметри руху частинки в 1-ому квадранті (0–90 град.)

Із рис. 1 видно, що опір повітря впливає як на переміщення, так і на швидкість матеріальної частинки по радіальній лопатці в 1-ому квадранті. Причому радіальна швидкість як з урахуванням, так і без урахування опору повітря зі зростанням кута повороту барабана змінюється по-різному. При зміні кута повороту барабана від 0 до 30 градусів відбувається зростання радіальної швидкості, хоча крива, що описує рух з урахуванням опору повітря, має меншу швидкість. Це говорить про те, що відцентрова сила переважає силу тертя, а при зростанні кута

повороту барабана швидкість її починає знижуватись, оскільки сила тяжіння більше притискає матеріальну частинку до лопатки. А при знаходженні лопатки в межах від 80 до 90 градусів матеріальна частинка з врахуванням опору повітря навіть має вже від'ємну радіальну швидкість і починає рухатися у протилежну сторону. Лінія, що відображає радіальне переміщення, підтверджує те, що матеріальна частинка із врахуванням опору повітря, починає рухатись по лопатці до центру барабана.



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

При знаходженні матеріальної частинки в 2-ому квадранті (рис. 2) її рух по радіальній лопатці знову стає направленим від центру обертання, але при повороті лопатки на кут від 90 до 120 градусів радіальне переміщення та швидкість майже не змінюються. При повороті лопатки на кут від 120 до 150 градусів радіальна швидкість та переміщення починають зростати, а

при повороті лопатки на кут вже від 150 градусів до 180 відбувається різкий зріст даних показників. Це пояснюється тим, що сумарна сила тертя від сили тяжіння та від коріолісової сили стають незначними, а безпосередньо сила тяжіння суттєво впливає на переміщення.

У третьому квадранті (рис. 3) швидкість матеріальної частинки зростає пропорційно при

повороті лопатки на кут від 180 до 270 градусів, а радіальне переміщення починає різко зростати починаючи вже при повороті лопатки на кут більше 210 градусів. Це пояснюється тим, що

при таких кутах повороту лопатки збільшується вага частинки направлена у сторону її руху, а сумарна сила тертя від сили тяжіння та від коріолісової сили зменшується.



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

У четвертому квадранті (рис. 4) радіальна швидкість матеріальної частинки значно зростає при повороті лопатки на кут від 270 до 300 градусів, а при повороті лопатки на кут від 300 до 360 градусів ріст швидкості відбувається з меншою інтенсивністю. Це пояснюється тим, що при знаходженні частинки при повороті лопатки на кут від 270 до 300 градусів сила тяжіння меншою мірою впливає на швидкість її руху.

Радіальне переміщення матеріальної частинки по радіальній лопатці також починає зростати при повороті лопатки на кут від 300 градусів, тому що з цього моменту зменшується притискання частинки до лопатки силою тяжіння, до того ж, складова сили тяжіння, яка направлена від центру обертання, також впливає на дане радіальне переміщення.



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

Аналізуючи рух матеріальної частинки в усіх квадрантах, ми бачимо, що найбільша радіальна швидкість розвивається саме в третьому та четвертому квадрантах. При цьому, зі зростанням швидкості радіального переміщення опір повітря також збільшує свій вплив на радіальне переміщення.

Висновки та перспективи подальших досліджень

Аналіз руху матеріальної частинки по радіальній лопатці з урахуванням опору повітря в усіх квадрантах показав, що він незначно, але уповільнює швидкість частинки по лопатці та впливає на радіальне її переміщення. Тому, враховуючи опір повітря, можна більшою мірою

наблизити теоретичні дослідження до реальних умов руху матеріальної частинки.

Подальші дослідження в напрямку руху матеріальної частинки по радіальній лопатці в обертовому барабані потрібно розширювати із врахуванням вентиляторного ефекту.

References

1. Vasilenko, P. M. (1960). Teoriya dvizheniya chastitsy po sherokhovatym poverkhnostyam selskokhozyaystvennykh mashin [Theory of particle motion on the rough surfaces of agricultural machinery]. Kiyev: UASKhN [in Russian].

2. Marchenko, N. M., Lichman, G. I. & Shebalkin, A. E. (1990). Mekhanizatsiya vneseniya organicheskikh udobreniy [Mechanization of organic fertilizer]. Moskva: Agropromizdat [in Russian].

3. Yakubauskas, V. I. (1973). Tekhnologicheskiye osnovy mekhanizirovannogo vneseniya udobreniy [Technological basis of mechanized fertilization], Moskva: Kolos [in Russian].

4. Holub, H. A. (2007). Ahropromyslove vyrobnytstvo yistivnykh hrybiv. Mekhaniko-tehnolohichni osnovy [Agro-industrial production of edible fungi. Mechanical and technological bases]. Kyiv: Ahrarna nauka [in Ukrainian].

5. Holub, H. A. & Kukharets, S. M. (2015). Vyznachennia parametriv rukhu chastynok biomasy pid chas obertannia metantenka [Determination of parameters of motion of biomass particles during rotation of methane tin]. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy. Ser. Tekhnika ta enerhetyka APK*, 212 (2), 254–264 [in Ukrainian].

6. Kukharets, S. M. (2016). Pidvyshchennia enerhetychnoi avtonomnosti ahroekosystem. Mekhaniko-tehnolohichni osnovy [Increase of energy autonomy of agroecosystems. Mechanical and technological bases]. Zhytomyr: ZhNAEU [in Ukrainian].

7. Holub, H. A., Kukharets, S. M., Marus, O. A. & Yarosh, Ya. D. (2016). Mekhanika rukhu chastynok po obertovykh lopatkakh reaktoriv zbrodzhuvannia [Mechanics of motion of particles by rotating blades of fermentation reactors]. *Tekhnika i tekhnolohii APK*, 3 (78), 10–13 [in Ukrainian].

8. Kukharets, S. M. (2016). Dynamika rukhu

skladovykh substratu v obertovykh reaktorakh [Dynamics of motion of substrate constituents in rotary reactors], *Visnyk Zhytomirskoho natsionalnoho ahroekolohichnoho universytetu*, 1 (53), t. 1, 249–258 [in Ukrainian].

9. Golub, G. A., Szalay, K., Kukharets, S. M. & Marus O. A. (2017). Energy efficiency of rotary digesters. *Progress in Agricultural Engineering Sciences*, 13 (1), 35–49.

10. Holub, H. A. & Marus, O. A. (2016). Mekhanika rukhu chastynky po radialnii lopatsi obertovoho barabana [Mechanics of motion of a particle on a radial blade of a rotating drum]. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy. Ser. Tekhnika ta enerhetyka APK*, 241, 350–358 [in Ukrainian].

11. Golub, G. A. & Marus, O. A. (2016). Analiz rivnian rukhu materialnoi chastynky po radialnii lopatsi obertovoho barabana [Analysis of equations of motion of a material particle on a radial blade of a rotating drum]. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy. Ser. Tekhnika ta enerhetyka APK*, 251, 43–53 [in Ukrainian].

12. Golub, G. A., Marus, O. A. & Yarosh, Ya. D. (2017). Analiz rukhu chastynky po radialnii lopatsi obertovoho barabana z urakhuvanniam oporu seredovyshcha [Analysis of the motion of a particle on a radial blade of a rotating drum, taking into account the resistance of the medium]. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy. Ser. Tekhnika ta enerhetyka APK*, 258, 28–39 [in Ukrainian].

INFLUENCE OF AIR SUPPLY ON THE ROPE OF PARTS ON THE RADIAL LOADS OF REDBURG

G. Golub¹, O. Marus¹, J. Cesna¹

mail: gagolub@ukr.net, jonas.cesna@asu.lt

¹National University of Life

and environmental sciences of Ukraine

Kyiv, Heroev Oborony str., 15, 03041, Ukraine, e-

²Faculty of Agricultural Engineering, Aleksandras Stulginskis University, Studentu str.

15, LT-53362 Akademija Kauno r., Lithuania

The devices for mixing on the basis of rotary drums are increasingly used in the development of biotechnological processes of fermentation, and therefore, increasing the efficiency of their work by

substantiating methods for determining the parameters of the centrifugal movement of particles on a radial shovel in a rotating drum that will allow the establishment of rational angular velocity and structural parameters of rotary drums, needs further improvement.

In this work the motion of a material particle on a radial shovel in a rotating drum with the consideration of the following parameters: the diameter and radius of the drum, the initial radius of the position of the material on the shoulder blade, the acceleration of gravity, the coefficient of friction of the material on the shaft, the equivalent diameter and particle density, and also the dynamic 'air quality'. The use of particle motion parameters on a radial shovel in a rotating drum, as shown above, allowed to determine and compare the patterns of particle motion, taking into account and without taking into account the air resistance, depending on the quadrant in which it is located.

The trajectories of the material particle in motion along the radial shovel in a rotating drum have allowed to determine the effect of the air resistance on radial displacement and the radial velocity of the particle in 4 quadrants. These studies show that the trajectory of the motion of a material particle in different quadrants is influenced by the centrifugal force, the friction force that occurs due to the coriolis force, the frictional force due to the gravitational force, and also the force of gravity. But each force influences differently, depending on the location of the material particle, that is, the angle of the vane of the radial blade.

Keywords: *drum, radial blade, the movement of particles, air resistance.*

**ВЛИЯНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ
ВОЗДУХА НА ДВИЖЕНИЕ ЧАСТИЦЫ
ПО РАДИАЛЬНОЙ ЛОПАТКЕ
ВРАЩАЮЩЕГОСЯ БАРАБАНА**

Г. А. Голуб¹, О. А. Марус¹, Й. Чесна²
mail: gagolub@ukr.net, jonas.cesna@asu.lt

¹Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины
г. Киев, ул. Героев Оборона,
15, 03041, Украина,

²Факультет сельскохозяйственного
машиностроения, Университет им. Aleksandras
Stulginskis, Studentu str. 15, LT-53362
Akademija Kauno г., Lithuania

Устройства для перемешивания на основе вращающихся барабанов находят все большее распространение при разработке биотехнологических процессов ферментации, а потому 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 совершенствования.

Исследовано движение материальной частицы по радиальной лопатке во вращающемся барабане с учетом следующих параметров: диаметра и радиуса барабана, начального радиуса положения материальной частицы на лопатке, ускорение силы тяжести, коэффициента трения материала по лопатке, эквивалентного диаметра и плотности частицы, а также динамической вязкости воздуха. Использование параметров движения материальной частицы по радиальной лопатке во вращающемся барабане, которые были приведены ранее, позволили определить и сравнить закономерности движения частицы с учетом и без учета сопротивления воздуха в зависимости от квадранта в котором она находится.

Полученные траектории материальной частицы при движении по радиальной лопатке во вращающемся барабане позволили определить влияние сопротивления воздуха на радиальное перемещение и радиальную скорость частицы в 4-х квадрантах. Данные исследования показывают, что на траекторию движения материальной частицы в различных квадрантах влияет центробежная сила, сила трения, возникающая за счет кориолисовой силы, сила трения за счет силы тяжести, а также непосредственно сила тяжести. Но каждая сила воздействует по-разному в зависимости от места нахождения материальной частицы, то есть угла поворота радиальной лопатки.

Ключевые слова: *барабан, радиальная лопатка, движение частицы, сопротивление воздуха.*