

**Ольшанський С. В.**

к.ф.-м.н., доцент

Сліпченко М. В.

к.т.н., доцент

Харченко С.О.

д.т.н., професор

*Харківський національний
технічний університет
сільського господарства
імені Петра Василенка***Полєвода Ю. А.**

к.т.н., доцент

*Вінницький національний
аграрний університет***Olshanskiy S.****Slipchenko M.****Kharchenko S.***Petro Vasilenko Kharkiv
National Technical
University of Agriculture***Polievoda Y.***Vinnitsia National Agrarian
University***УДК 631.362:532****DOI: 10.37128/2306-8744-2021-1-6****НАБЛИЖЕНИЙ СПОСІБ
РОЗРАХУНКУ ЗЕРНОПОТОКУ
В ВЕРТИКАЛЬНОМУ
ЦИЛІНДРИЧНОМУ
ВІБРОРЕШЕТІ**

Запропоновано модифіковану гідродинамічну модель усталеного зернопотоку неоднорідної суміші по поверхні вертикального циліндричного віброрешета в припущенні, що пористість суміші в рухомому кільцевому шарі залежить від швидкості руху. Прийнята лінійна залежність пористості суміші від швидкості руху, де більшій швидкості відповідає більша пористість. Розрахунок швидкості зведено до розв'язання неоднорідного диференціального рівняння типу Бесселя. Далі шляхом «заморожування» змінного коефіцієнта цього рівняння проведено спрощення задачі. Таке спрощення допустиме у зв'язку з тим, що товщина рухомого шару суміші значно менша радіуса віброрешета. У підсумку залежність швидкості від радіальної координати виражено через елементарні функції. Записана компактна формула для визначення максимальної швидкості зернопотоку. Інтегруванням, в елементарних функціях, одержана формула середньої швидкості в шарі. Виведено наближену формулу продуктивності віброрешета за масою сходової фракції. Для цього запропоновано обчислювати відповідний інтеграл наближено за формулою Сімпсона, щоб не обчислювати значень спеціальних функцій великого аргументу за асимптотичними формулами. Показано, що названа продуктивність суттєво залежить від пористості зерноsumіші. З метою отримання інформації про фактичні похибки наближених формул додатково проводилось чисельне інтегрування вихідного не спрощеного рівняння типу Бесселя на комп'ютері. Порівняльний аналіз результатів розрахунку підтвердив малі похибки введених спрощень у рівняння руху та адекватність одержаних теоретичних результатів.

Переходом до спрощеного диференціального рівняння виведено та апробовано наближені формули для розрахунку основних характеристик зернопотоку по вертикальному циліндричному віброрешету, з урахуванням зміни пористості в шарі зерноsumіші від швидкості руху. В роботі узагальнено відомі теоретичні результати, одержані з використанням гідродинамічних моделей руху зерноsumішей, псевдозріджених вібраціями. Проведене узагальнення не значно ускладнило теорію, бо підсумкові розрахункові формули досить компактні та зручні в практичній реалізації.

Ключові слова: вертикальне циліндричне віброрешето, залежність пористості суміші від швидкості її частинок, спосіб «заморожування» змінного коефіцієнта, формули швидкості зерно потоку та продуктивності віброрешета.



Вступ. Рух зернової суміші по віброрешету описуються різними теоріями, починаючи від моделювання руху у вигляді матеріальної точки і закінчуючи моделлю суцільного середовища. Однією з них є гідродинамічна модель, що описує рух псевдозрідженого середовища. При русі частинок, що утворюють суміш відбувається зміна пористості шару. Ця зміна впливає на швидкість зернопотоку і, відповідно, продуктивність віброрешет.

Аналіз останніх публікацій і постановка мети дослідження. В теорії руху вібросепарованих сумішей по поверхнях решіт набула поширення гідродинамічна модель псевдозрідженої суміші, започаткована в [1, 2]. У цих роботах йшлося про усталений рух однорідного кільцевого шару на внутрішній поверхні вертикального циліндричного віброрешета, яке обертається навколо своєї вісі. Узагальнення названої теорії на випадок змінної вібров'язкості суміші по товщині шару проведено в [3-5]. В роботах [3, 6-8] узагальнення гідродинамічних моделей здійснено врахуванням зміни пористості по товщині рухомого шару внаслідок зміни тиску. Для цього складали окреме диференціальне рівняння, що описує залежність пористості від просторової координати і розв'язували його. Потім одержаний розв'язок враховували в рівнянні руху суміші. Але, як свідчить практика, пористість суміші залежить також від швидкості її руху. Виходячи з цього, тут зроблена спроба врахувати цю залежність, яка є своєрідним зворотнім зв'язком, бо швидкість залежить від пористості, а пористість – від швидкості. В роботі прийнято найпростіший варіант залежності, а саме лінійний зв'язок, коли пористість більша там, де більша швидкість руху. Раніше така модель руху була використана при сепаруванні суміші на плоскому віброрешеті [9]. Тут розглядаємо циліндричну форму решета.

Метою статті є виведення та апробація наближених формул для розрахунку швидкості усталеного руху зернової суміші змінної пористості по товщині шару при її русі по поверхні вертикального відцентрового циліндричного віброрешета.

Викладення основного матеріалу.

Як і в публікаціях [1, 2], вихідним диференціальним рівнянням приймаємо:

$$\frac{d^2u}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du}{dr} = -\frac{\rho g}{\mu} \quad (1)$$

Тут $u = u(r)$ – вертикальна, осереднена за період коливань, швидкість кільцевого шару; r – радіальна координата; ρ –

питома маса зернової суміші; g – прискорення вільного падіння; μ – динамічний коефіцієнт вібров'язкості, що залежить від параметрів коливань решета і характеристик зернової суміші [10-12] чи концентрації частинок [4, 7, 13].

Крайовими умовами до рівняння (1) служать:

$$u(R) = 0; \left. \frac{du}{dr} \right|_{r=R_0} = 0, \quad (2)$$

де R_0, R – відповідно внутрішній радіус кільцевого шару суміші та радіус решета (рис. 1).

Крім (2), можливі й інші варіанти крайових умов [14], при наявності на поверхні решета додаткових сегрегаторів суміші: ребер, рифів, тощо.

Узагальнюючи відомі теорії, приймаємо:

$$\rho = \rho_* (1 - \lambda \cdot u), \quad (3)$$

причому: $\lambda > 0$; $\lambda \cdot u(R_0) < 1$; ρ_* – питома маса зернової суміші в стані спокою.

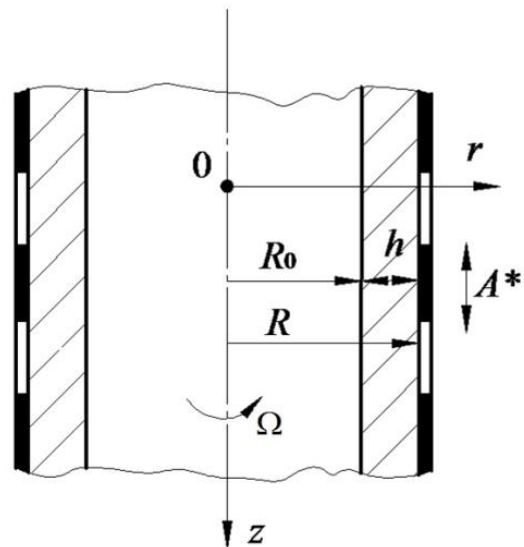


Рис. 1. Розрахункова схема

Враховуючи (1), (3), одержуємо узагальнене диференціальне рівняння типу Бесселя [15]:

$$\frac{d^2u}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du}{dr} - \gamma^2 u = -\frac{\gamma^2}{\lambda}, \quad (4)$$

де $\gamma = \sqrt{\rho_* g \lambda / \mu}$.

Розв'язок рівняння (4) виражається в циліндричних функціях [16]. Але, щоб не обчислювати значень спеціальних функцій



великого аргументу за асимптотичними формулами, далі побудуємо наближені розрахункові формули. Для цього замість (4) будемо розв'язувати диференціальне рівняння:

$$\frac{d^2 u}{dr^2} + \frac{1}{r_*} \frac{du}{dr} - \gamma^2 u = -\frac{\gamma^2}{\lambda}, \quad (5)$$

в якому $r_* = 0,5(R_0 + R)$.

Заміна (4) рівнянням (5) не дає великих похибок в зв'язку з тим, що в практиці сепарування товщина рухомого шару зерноsumіші значно менша радіуса решета. Ефективність вказаного спрощення підтверджена в [4].

Загальний розв'язок диференціального рівняння (5) має вигляд:

$$u(r) = \frac{1}{\lambda} + C_1 \exp(k_1 r) + C_2 \exp(k_2 r), \quad (6)$$

$$\Delta(R_0, R) = k_1 \exp(k_1 R_0) \exp(k_2 R) - k_2 \exp(k_1 R) \exp(k_2 R_0).$$

Враховуючи (6) і (7), одержуємо формулу швидкості зернопотоку:

$$u(r) = \frac{1}{\lambda} \left[1 - \frac{k_1 \exp(k_1 R_0 - k_2 r) - k_2 \exp(k_2 R_0 - k_1 r)}{k_1 \exp(k_1 R_0 - k_2 R) - k_2 \exp(k_2 R_0 - k_1 R)} \right]. \quad (8)$$

Найбільше значення швидкості має при $r = R_0$. Її обчислення зводиться до формули:

$$u(R_0) = \frac{1}{\lambda} \left[1 - \frac{(k_1 - k_2) \cdot \exp(k_1 R_0 + k_2 R)}{\Delta(R_0, R)} \right].$$

$$u(r) = \frac{\rho g r_*^2}{\mu} \left[\exp\left(\frac{R_0 - R}{r_*}\right) - \exp\left(\frac{R_0 - r}{r_*}\right) + \frac{R - r}{r_*} \right]. \quad (9)$$

Раніше цю формулу вивели в [4, с. 146]. Якщо задати в ній $r = R_0$, то одержимо максимальне значення швидкості $u(R_0)$.

В практиці сепарування для оцінки продуктивності віброрешета використовують значення середньої швидкості [2]:

$$\int_{R_0}^R r \cdot \exp(kr) dr = \frac{1}{k^2} \left[\exp(kR) \cdot (kR - 1) - \exp(kR_0) \cdot (kR_0 - 1) \right]$$

де $k_{1,2} = -\frac{1}{2r_*} \pm \sqrt{\gamma^2 + \left(\frac{1}{2r_*}\right)^2}$; C_1, C_2 – довільні сталі.

Підстановка (6) в (2) дає систему рівнянь:

$$C_1 k_1 \exp(k_1 R_0) + C_2 k_2 \exp(k_2 R_0) = 0,$$

$$C_1 \exp(k_1 R) + C_2 \exp(k_2 R) = -\frac{1}{\lambda}.$$

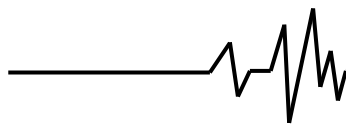
Розв'язавши цю систему, отримуємо:

$$C_1 = \frac{1}{\lambda} \frac{k_2 \exp(k_2 R_0)}{\Delta(R_0, R)}; \quad C_2 = -\frac{1}{\lambda} \frac{k_1 \exp(k_1 R_0)}{\Delta(R_0, R)}; \quad (7)$$

Тут, а також в формулі (8), виникає невизначеність типу $|0/0|$ при $\lambda \rightarrow 0$. Використавши граничний перехід в (8), отримуємо для однорідної суміші ($\lambda = 0$):

$$u_{cp} = \frac{2}{R^2 - R_0^2} \int_{R_0}^R r \cdot u(r) dr. \quad (10)$$

Враховуючи, що [17]:



після підстановки (8) в (10), отримуємо:

$$u_{cp} = \frac{1}{\lambda} \left\{ 1 + \frac{2 \exp[(k_1 + k_2)R_0]}{(R^2 - R_0^2)(k_1 k_2)^2 \Delta(R_0, R)} [k_2^3 f_1(R_0, R) - k_1^3 f_2(R_0, R)] \right\}. \quad (11)$$

Тут

$$f_1(R_0, R) = (k_1 R - 1) \exp[k_1(R - R_0)] + 1 - k_1 R_0;$$

$$f_2(R_0, R) = (k_2 R - 1) \exp[k_2(R - R_0)] + 1 - k_2 R_0.$$

При $\lambda \rightarrow 0$ в (11) треба розкрити невизначеність виду $|0/0|$. Виконавши цю операцію, одержуємо:

$$u_{cp} = \frac{\rho g r_*^2}{\mu} \left\{ \left[1 + \frac{2r_*(R + r_*)}{R^2 - R_0^2} \right] \exp \frac{R_0 - R}{r_*} - 2 \frac{r_*(R_0 + r_*)}{R^2 - R_0^2} + \frac{R}{r_*} - \frac{2(R^2 + RR_0 + R_0^2)}{3r_*(R + R_0)} \right\}$$

Це наближена формула середньої швидкості однорідної суміші ($\lambda = 0$).

При визначенні масової продуктивності Q віброрешета за сходовою фракцією доводиться обчислювати інтеграл:

$$Q = 2\pi \rho_* \int_{R_0}^R [1 - \lambda \cdot u(r)] u(r) r dr. \quad (12)$$

Для залежності (8) він виражається в елементарних функціях, але відповідь громізка і не зручна в практичній реалізації. Тому, поступив шість точністю, інтеграл (12) можна обчислювати наближено за формулою Сімпсона [15]:

$$Q \approx \frac{\pi \rho_* (R - R_0)}{3} \times \{ [1 - \lambda \cdot u(R_0)] u(R_0) R_0 + 4 [1 - \lambda \cdot u(r_*)] u(r_*) r_* \}. \quad (13)$$

Похибка цього наближення мала із-за малої товщини рухомого шару, поданої різницею $R - R_0$.

Числові результати. Для проведення розрахунків приймаємо: $\rho_* = 750 \text{ кг/м}^3$; $R = 0,3075 \text{ м}$; $R_0 = 0,2975 \text{ м}$; $\mu = 0,6 \text{ Па}\cdot\text{с}$ і різні λ . Одержані двома способами значення швидкості по товщині кільцевого шару при $\lambda = 0,1 \text{ с/м}$ записано в табл. 1.

Таблиця 1.

Значення швидкості при $\lambda = 0,1 \text{ с/м}$

$10r, \text{ м}$	Форм. (8)	Чисел. інтегр.	$10r, \text{ м}$	Форм. (8)	Чисел. інтегр.
	Значення $10u(r), \text{ м/с}$			Значення $10u(r), \text{ м/с}$	
2,975	5,7727	5,7727	3,025	4,3326	4,3327
2,985	5,7150	5,7150	3,035	3,6989	3,6990
2,995	5,5420	5,5420	3,045	2,9494	2,9495
3,005	5,2539	5,2540	3,055	2,0836	2,0837
3,015	4,8509	4,8509	3,065	1,1007	1,1008

Як видно з табл. 1, чисельне комп'ютерне інтегрування диференціального рівняння (4) підтвердило малі похибки заміни його

диференціальним рівнянням (5), яке має прості розв'язки.



Цей висновок підтверджує порівняльний аналіз і числових результатів в табл. 2, які

одержані при $\lambda = 0,9$ с/м.

Таблиця 2.

Значення швидкості при $\lambda = 0,9$ с/м

$10r$, м	Форм. (8)	Чисел. інтегр.	$10r$, м	Форм. (8)	Чисел. інтегр.
	Значення $10u(r)$, м/с			Значення $10u(r)$, м/с	
2,975	4,1569	4,1569	3,025	3,1806	3,1807
2,985	4,1185	4,1185	3,035	2,7385	2,7385
2,995	4,0031	4,0031	3,045	2,2054	2,2055
3,005	3,8098	3,8098	3,055	1,5760	1,5760
3,015	3,5365	3,5365	3,065	0,8434	0,8434

Швидкості в табл. 2 менші, ніж в табл. 1, тобто збільшення коефіцієнта λ або пористості сповільнює швидкість руху суміші.

Інформація про вплив коефіцієнта λ на середню швидкість зернотоку надана в табл. 3, вона одержана за формулою (11).

Таблиця 3.

Середні швидкості зернотоку при різних λ

10λ , с/м	1	3	5	7	9
$10u_{cp}$, м/с	3,835	3,512	3,239	3,006	2,805

Для порівняння, в табл. 4 записано швидкості, обчислені наближено за формулою Сімпсона [15]:

а також продуктивності, обчислені за формулою (13).

$$u_{cp} \approx \frac{1}{6r_*} [R_0 u(R_0) + 4u(r_*)], \quad (14)$$

Згідно з прийнятими числовими даними $r_* = 0,3025$ м.

Таблиця 4.

Результати обчислень за формулами (13) і (14)

10λ , с/м	1	3	5	7	9
Q , кг/с	5,210	4,360	3,702	3,183	2,765
$10u_{cp}$, м/с	3,835	3,510	3,237	3,004	2,802

Розрахунки показують, що від значення λ суттєво залежить продуктивність віброрешета Q за масою сходової фракції.

гідродинамічних моделей руху зерноsumішей, псевдозріджених вібраціями. Проведене узагальнення не значно ускладнило теорію, бо підсумкові розрахункові формули досить компактні та зручні в практичній реалізації.

Розбіжності значень середніх швидкостей в табл. 3 і табл. 4 досить малі, тобто формула Сімпсона цілком придатна для наближеного визначення u_{cp} .

Список використаних джерел

Висновки. Переходом до спрощеного диференціального рівняння виведено та апробовано наближені формули для розрахунку основних характеристик зернотоку по вертикальному циліндричному віброрешету, з урахуванням зміни пористості в шарі зерноsumіші від швидкості руху. Цим узагальнено відомі теоретичні результати, одержані з використанням

1. Тищенко Л. Н. Гидродинамические характеристики псевдооживленных сыпучих сред при виброцентробежном сепарировании на зерноперерабатывающих предприятиях. *Вісник ХДТУСГ. Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв.* 2001. Вип. 5. С. 13-33.



2. Тищенко Л. Н. Интенсификация сепарирования зерна. Харьков : Основа, 2004. 224 с.

3. Моделирование процессов зерновых сепараторов / Л. Н. Тищенко и др. Харьков : Миськдрук, 2010. 360 с.

4. Динамика виброцентробежной зерноочистки / Л. Н. Тищенко и др. Харьков : Миськдрук, 2013. 440 с.

5. Tishchenko L. N., Olshanskiy V. P., Olshanskiy S. V. On velocity profiles of an inhomogeneous vibrofluidized grain bed on a shaker. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2011. 84 (3). P. 509-514. doi.org/10.1007/s10891-011-0498-4.

6. Пивень М. В. Исследование процесса сегрегации зерновой смеси при виброцентробежном сепарировании. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2004. № 4 (36). С. 23-26.

7. Теорія сепарування зерна / В. П. Ольшанський та ін. Харків : ХНТУСГ, 2017. 803 с.

8. Тищенко Л. Н., Пивень М. В. Исследование внутрислового движения частиц зерновой смеси при виброцентробежном сепарировании. *Вибрационные машины и технологии*. 2003. С. 150-156.

9. Ольшанський В. П. Про рух неоднорідної дрібнозернистої суміші по плоскому віброрешеті. *Інженерія переробних і харчових виробництв*. 2017. 2(1). С. 17-22.

10. Тищенко Л. Н., Пивень М. В., Харченко С. А., Бредихин В. В. Исследование закономерностей вибровязкости зерновых смесей при сепарировании цилиндрическими виброцентробежными решётами. *Вісник ХНТУСГ. Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв*. 2009. Вип. 88. С. 34-44.

11. Тищенко Л. М., Абдуева Ф. М., Ольшанський В. П. Сравнение двух способов вычисления коэффициента вибровязкости псевдооживленной зерновой смеси при виброцентробежном сепарировании. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2008. № 1 (50). С. 96-100.

12. Тищенко Л. М., Карнодуд Р. В., Ольшанський В. П. Идентификация коэффициентов вибровязкости зерновых смесей в цилиндрических решётах виброцентрифуги. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2012. № 3 (67). С. 134-137.

13. Тищенко Л. М., Слипченко М. В. Экспериментальное определение коэффициента динамической вязкости засоренного воздушного потока при очистке зерновых смесей пневмосепарирующим устройством. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2012. № 3 (67). С. 138-143.

14. Тищенко Л. М., Ольшанський В. П., Харченко С. А., Харченко Ф. М. Моделирование динамики зерновой смеси при сепарировании на

рифленом решете вибросепаратора. *Інженерія природокористування*. 2014. № 2 (2). С. 134-137.

15. Абрамовиц М., Стиган И. Справочник по специальным функциям (с формулами, графиками и математическими таблицами). Москва : Наука, 1979. 832 с. Сметанкина Н. В. Нестационарное деформирование, термоупругость и оптимизация многослойных пластин и цилиндрических оболочек. Харьков : Миськдрук, 2011. 376 с.

16. Янке Е., Эмде Ф., Лёш Ф. Специальные функции. Москва : Наука, 1977. 344 с.

17. Градштейн И. С., Рыжик И. М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. Москва : Наука, 1962. 1100 с.

Список джерел у транслітерації

1. Tishchenko, L.N. (2001). *Gidrodinamicheskie harakteristiki psevdoozhivennyh sypuchih sred pri vibrocentrobeznom separirovanii na zernopererabatyvayushhih predpriyatijah* [Hydrodynamic characteristics of fluidized loose media during vibrocentrifugal separation at grain processing plants]. *Visnyk KhDTUSG. Suchasni napriamky tehnologii ta mehanizacii procesiv pererobnyh i harchovyh vyrobnyctv* [Bulletin of the KhSTUA. Modern directions of technology and mechanization of processes of processing and food production]. 2001, 5. 13-33. [In Russian].

2. Tishchenko, L.N. (2004) *Intensifikacija separirovanija zerna* [Intensification of grain separation]. Kharkov : Osнова.. [In Russian].

3. Tishchenko, L.N., Mazorenko, D.I., Piven, M.V., Kharchenko, S.A., Bredikhin, V.V., & Mandryka A.V. (2010). *Modelirovanie processov zernovyh separatorov* [Modeling the processes of grain separators]. Kharkov : Miskdruk. [In Russian].

4. Tishchenko, L.N., Olshanskiy, V.P., Olshanskiy, S.V., Kharchenko, F.M., & Slipchenko, M.V. (2013) *Dinamika vibrocentrobeznoj zernoochistki* [Dynamics of vibro-centrifugal grain cleaning]. Kharkov, Miskdruk. [In Russian].

5. Tishchenko, L.N., Olshanskiy, V.P., & Olshanskiy, S.V. (2011) On velocity profiles of an inhomogeneous vibrofluidized grain bed on a shaker. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 84 (3), 509-514. doi.org/10.1007/s10891-011-0498-4.

6. Piven, M.V. (2004) *Issledovanie processa segregacii zernovoj smesi pri vibrocentrobeznom separirovanii*. *Vibracii v tehnike i tehnologijah*. 4 (36), 23-26. [In Russian].

7. Olshanskiy, V.P., Bredikhin, V.V., Lukyanenko, V.M., Piven, M.V., Slipchenko, M.V., & Kharchenko, S.O. (2017). *Teorija separuvannja zerna* [Theory of the grain separation]. Kharkiv, Miskdruk. [In Ukrainian].



8. Tishchenko, L.N., & Piven, M.V. (2003) Issledovanie processa segregacii zernovoj smesi pri vibrocentrobeznom separirovanii [Investigation of the intra-layer motion of grain mixture particles during vibrocentrifugal separation]. *Vibracii v tehnikе i tehnologijah [Vibrating machines and technologies]*. 4 (36), 23-26. [In Russian].

9. Olshanskiy, V.P. (2017). Pro ruh neodnorodnoi' dribnozernystoi' sumishi po ploskomu vibroreshetu [About the motion of an inhomogeneous fine-grained mixture on a flat vibrating sieve.]. *Inzhenerija pererobnyh i harchovyh vyrobnyctv [Processing and food production engineering]*. 2(1), 17-22. [In Ukrainian].

10. Tishhenko, L.N., Piven, M.V., Kharchenko, S.A. & Bredikhin, V.V. (2009). Issledovanie zakonomernostej vibrovjazkosti zernovyh smesej pri separirovanii cilindricheskimi vibrocentrobezhnyimi reshjotami [Investigation of the patterns of vibration viscosity of grain mixtures during separation by cylindrical vibrocentrifugal sieves]. *Visnik KhNTUSG. Suchasni naprjamki tehnologii ta mehanizacii procesiv pererobnih i harchovyh virobnyctv [Modern directions of technology and mechanization of processes of processing and food production]*. 88, 24-44. [In Russian].

11. Tishhenko, L.N., Abdueva, F.M., & Olshanskiy, V.P. (2008). Sravnenie dvuh sposobov vychislenija koefficienta vibrovjazkosti psevdoozhizhennoj zernovoj smesi pri vibrocentrobeznom separirovanii [Comparison of two methods for calculating the coefficient of vibroviscosity of a fluidized grain mixture during vibrocentrifugal separation]. *Vibracii v tehnikе ta tehnologijah [Vibrations in engineering and technology]*. 1 (50), 96-100. [In Russian].

12. Tishhenko, L.N., Karnodud, R.V., & Olshanskiy, V.P. (2012). Identifikacija koefficientnov vibrovjazkosti zernovyh smesej v cilindricheskikh reshjotah vibrocentrifugi [Identification of the coefficient of vibration viscosity of grain mixtures in cylindrical sieves of a vibrocentrifuge]. *Vibracii v tehnikе ta tehnologijah [Vibrations in engineering and technology]*. 3 (67), 134-137. [In Russian].

13. Tishhenko, L.N., & Slipchenko M.V. (2012). Eksperimentalnoe opredelenie koefficienta dinamicheskoi vjazkosti zasorenogo vozdušnogo potoka pri ochistke zernovyh smesej pnevmoseparirujushhim ustrojstvom [Experimental determination of the dynamic viscosity coefficient of a impurity air flow when cleaning grain mixtures with a pneumatic separating device]. *Vibracii v tehnikе ta tehnologijah [Vibrations in engineering and technology]*. 3 (67), 138-143. [In Russian].

14. Tishhenko, L.N., Olshanskiy, V.P., Kharchenko, F.M., & Kharchenko, S.A. (2014). Modelirovanie dinamiki zernovoj smesi pri separirovanii na riflenom reshete vibroseparatora [Simulation of the dynamics of the grain mixture during separation on the grooved sieve of the

vibration separator]. *Inzhenerija prirodokoristuvannja [Engineering of nature management]*. 2(2), 54-60. [In Russian].

15. Abramovic, M., & Stigan. I. (1979) Spravochnik po specialnym funkcijam (s formulami, grafikami i matematcheskimi tablicami) [Special functions reference (with formulas, graphs and math tables)]. Moskva, Nauka. [In Russian].

16. Janke, E., Jemde, F., & Ljosh, F. (1977) Specialnye funkcii [Special functions]. Moskva, Nauka. [In Russian].

17. Gradshtejn, I. S., & Ryzhik, I.M. (1962) Tablitsy integralov, summ, rjadov i proizvedenij [Tables of integrals, sums, series and products]. Moskva, Nauka. [In Russian].

ПРИБЛИЖЕННЫЙ СПОСОБ РАСЧЕТА ЗЕРНОПОТОКА В ВЕРТИКАЛЬНОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ВИБРОРЕШЕТЕ

Предложена модифицированная гидродинамическая модель устойчивого зерно потока неоднородной смеси по поверхности вертикального цилиндрического виброрешета в предположении, что пористость смеси в подвижном кольцевом слое зависит от скорости движения. Принятая линейная зависимость пористости смеси от скорости движения, где большей скорости соответствует большая пористость. Расчет скорости сведен к решению неоднородного дифференциального уравнения типа Бесселя. Далее путем «замораживания» переменного коэффициента этого уравнения проведено упрощения задачи. Такое упрощение допустимо в связи с тем, что толщина подвижного слоя смеси значительно меньше радиуса виброрешета. В итоге, зависимость скорости от радиальной координаты выражена через элементарные функции. Получена компактная формула для определения максимальной скорости зерно потока. Интегрированием, в элементарных функциях, получена формула средней скорости в слое. Выведена приближенная формула производительности виброрешета по массе сходовой фракции. Для этого предложено вычислять соответствующий интеграл приближенно по формуле Симпсона, чтобы не вычислять значений специальных функций большого аргумента при помощи асимптотических формул. Показано, что названная производительность существенно зависит от пористости зерно смеси. С целью получения информации о фактических погрешности приближенных формул дополнительно проводилось численное интегрирование исходного не упрощенного уравнения типа Бесселя на компьютере. Сравнительный анализ результатов расчета подтвердил



малые погрешности введенных упрощений в уравнение движения, а также адекватность полученных теоретических результатов.

Переходом к упрощенному дифференциальному уравнению выведены и апробированы приближенные формулы для расчета основных характеристик зернопотока по вертикальному цилиндрическому виброрешету, с учетом изменения пористости в слое зерносмеси от скорости движения. В работе обобщены известные теоретические результаты, полученные с использованием гидродинамических моделей движения зерносмесей, псевдооживленных вибрациями. Проведенное обобщение незначительно усложнило теорию, потому что итоговые расчетные формулы достаточно компактные и удобные в практической реализации.

***Ключевые слова:** вертикальное цилиндрическое виброрешето, зависимость пористости смеси от скорости ее частиц, способ «замораживания» переменного коэффициента, формулы скорости зернопотока и производительности виброрешета.*

AN APPROXIMATE METHOD FOR CALCULATING GRAIN FLOW IN A VERTICAL CYLINDRICAL VIBROSIEVE

A modified hydrodynamic model of a stable grain flow of an inhomogeneous mixture over the surface of a vertical cylindrical vibrating sieve is proposed under the assumption that the porosity of the mixture in the moving annular layer depends on the velocity of movement. A linear dependence of the porosity of the mixture on the velocity of movement are accepted, where higher speed corresponds to higher porosity. The calculation of the velocity is reduced to solving an inhomogeneous differential equation of the Bessel type. Further, by "freezing" the variable coefficient of this equation, the problem has been simplified. This simplification is permissible due to the fact that the thickness of the moving layer of the mixture is much less than the radius of the vibrating sieve. As a result, the dependence of the

velocity on the radial coordinate is expressed through the elementary functions. A compact formula for determining the maximum grain flow velocity is obtained. By integrating, in elementary functions, the formula for the average velocity in the layer is obtained. An approximate formula for the performance of the vibrating sieve by the mass of the exit fraction is derived. For this, it is proposed to calculate the corresponding integral approximately by the Simpson formula, so as not to calculate the values of special functions of large argument using the asymptotic formulas. It is shown that the named productivity significantly depends on the porosity of the grain mixture. In order to obtain information about the actual errors of the approximate formulas, we additionally carried out the numerical integration of the original non-simplified Bessel-type equation on a computer. A comparative analysis of the calculation results confirmed the small errors of the simplifications introduced into the equation of motion, as well as the adequacy of the theoretical results obtained.

By passing to a simplified differential equation, approximate formulas were derived and tested for calculating the main characteristics of the grain flow along a vertical cylindrical vibrating sieve, taking into account the change in porosity in the grain mixture layer from the velocity of movement. The work summarizes the known theoretical results obtained using hydrodynamic models of the motion of grain mixtures fluidized by vibrations. The generalization carried out slightly complicated the theory, because the final calculation formulas are quite compact and convenient in practical implementation.

Key words: vertical cylindrical vibrating sieve, the dependence of the porosity of the mixture on the velocity of its particles, the method of "freezing" the variable coefficient, formulas for the grain flow rate and the productivity of the vibrating sieve.

Keywords: free oscillations, dissipative oscillator, quadratic viscous resistance, dry friction, Lambert function, identification of resistance characteristics, energy balance method.

Відомості про авторів

Ольшанський Станислав Васильович – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри фізики і теоретичної механіки Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка, вул. Алчевських, 44, м. Харків, Україна, 61002; OlshanskiyVP@gmail.com тел.: (066) 0100955

Ольшанский Станислав Васильевич – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры физики и теоретической механики Харьковского национального технического университета сельского хозяйства им. Петра Василенко, ул. Алчевских, 44, г. Харьков, Украина, 61022; OlshanskiyVP@gmail.com, тел.: (066) 0100955



Olshanskiy Stanislav Vasilyonych – Candidate of Physical and Mathematical Sciences (Ph. D.), Associate Professor, Associate Professor at the Department of Physics and Theoretical Mechanics Petro Vasilenko Kharkiv National Technical University of Agriculture, Alchevskikh str. 44, Kharkiv, Ukraine; 61022; OlshanskiyVP@gmail.com, тел.: (066) 0100955

Сліпченко Максим Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, виконуючий обов'язки завідувача кафедри фізики і теоретичної механіки Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка, вул. Алчевських, 44, м. Харків, Україна, 61002; Slipchenko_M@ukr.net, тел.: (066) 7120989

Слипченко Максим Владимирович – кандидат технических наук, доцент, исполняющий обязанности заведующего кафедры физики и теоретической механики Харьковского национального технического университета сельского хозяйства им. Петра Василенко, ул. Алчевских, 44, г. Харьков, Украина, 61022; Slipchenko_M@ukr.net, тел.: (066) 7120989

Slipchenko Maksym Volodymyrovych – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Associate Professor, Acting head of the Department of Physics and Theoretical Mechanics Petro Vasilenko Kharkiv National Technical University of Agriculture, Alchevskikh str. 44, Kharkiv, Ukraine; 61022; Slipchenko_M@ukr.net, тел.: (066) 7120989

Харченко Сергій Олександрович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри оптимізації технологічних систем імені Т.П. Євсюкова Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка, вул. Алчевських, 44, м. Харків, Україна, 61002; kharchenko_mtf@ukr.net, тел.: (099) 1703477

Харченко Сергей Александрович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры оптимизации технологических систем имени Т.П. Евсюкова Харьковского национального технического университета сельского хозяйства им. Петра Василенко, ул. Алчевских, 44, г. Харьков, Украина, 61022; kharchenko_mtf@ukr.net, тел.: (099) 1703477

Kharchenko Sergiy Oleksandrovych – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Professor at the Department of Optimization of Technological Systems named after T.P. Yevsukov Petro Vasilenko Kharkiv National Technical University of Agriculture, Alchevskikh str. 44, Kharkiv, Ukraine; 61022; kharchenko_mtf@ukr.net, тел.: (099) 1703477

Полевода Юрій Алікович – кандидат технічних наук, доцент кафедри технологічних процесів та обладнання переробних і харчових виробництв Вінницького національного аграрного університету: м. Вінниця, вул. Сонячна 3, 21008, e-mail: vinyura36@gmail.com.

Полевода Юрий Аликович – кандидат технических наук, доцент кафедры технологических процессов и оборудования перерабатывающих и пищевых производств Винницкого национального аграрного университета г. Винница, ул. Солнечная 3, 21008, email: vinyura36@gmail.com.

Polievoda Yurii – candidate of technical sciences, associate professor of the department of technological processes and equipment for processing and food production, Vinnytsia National Agrarian University: Vinnytsia, st. Sonyachna 3, 21008, e-mail: vinyura36@gmail.com.