

Всеукраїнський науково-технічний журнал

Ukrainian Scientific & Technical Journal

ISSN 2306-8744

DOI: 10.37128/2306-8744-2024-3

Вібрації в техніці та технологіях



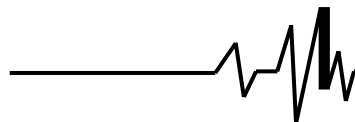
Всеукраїнський науково-технічний журнал

Ukrainian Scientific & Technical Journal

Вібрації в техніці та технологіях

№ 3 (114)

Вінниця 2024

**ВІБРАЦІЇ В
ТЕХНІЦІ ТА
ТЕХНОЛОГІЯХ**

Журнал науково-виробничого та навчального
спрямування Видавець: Вінницький національний
аграрний університет

Заснований у 1994 році під назвою “Вібрації в техніці та
технологіях”

Свідоцтво про державну реєстрацію засобів масової
інформації

КВ № 16643-5115 ПР від 30.04.2010 р.

Всеукраїнський науково-технічний журнал “Вібрації в техніці та технологіях” / Редколегія: Калетнік Г.М. (головний редактор) та інші. – Вінниця, 2024. – 3 (114) – 119 с.

Друкується за рішенням Вченої ради Вінницького національного аграрного університету (протокол № 6 від 24.12.2024 р.)

Періодичне видання включено до Переліку наукових фахових видань України з технічних наук (Категорія «Б» Наказ Міністерства освіти і науки України від 02.07.2020 р. № 886)

Згідно рішення Національної ради України з питань телебачення та радіомовлення від 25.04.2024 р. № 1337 науковому журналу «Вібрації в техніці та технологіях» присвоєно ідентифікатор медіа R30-05172.

*- присвоєно ідентифікатор цифрового об'єкта (Digital Object Identifier – DOI);
- індексується в CrossRef, Google Scholar;
- індексується в міжнародній наукометричній базі Index Copernicus Value з 2018 року.*

Головний редактор

Калетнік Г.М. – д.е.н., професор,
академік НААН України, Вінницький
національний аграрний університет

**Заступник головного
редактора**

Адамчук В.В. – д.т.н., професор, академік
НААН України, Інститут механіки та
автоматики агропромислового виробництва
НААН України

Відповідальний секретар

Солона О.В. – к.т.н., доцент, Вінницький
національний аграрний університет

Члени редакційної колегії

Булгаков В.М. – д.т.н., професор, академік
НААН України, Національний університет
біоресурсів і природокористування України

Деревенько І. А. – к.т.н., доцент,
Національний університет «Львівська
політехніка»

Купчук І.М. – к.т.н., доцент, Вінницький
національний аграрний університет

Матвеев В.В. – д.ф.-м.н., професор,
академік НАН, Інститут проблем міцності
імені Г.С. Писаренка НАН України

Полєвода Ю.А. – к.т.н., доцент, Вінницький
національний аграрний університет

Твердохліб І.В. – к.т.н., доцент, Вінницький
національний аграрний університет

Токарчук О.А. – к.т.н., доцент, Вінницький
національний аграрний університет

Цуркан О.В. – д.т.н. професор, Вінницький
національний аграрний університет

Яропуд В.М. – к.т.н., доцент, Вінницький
національний аграрний університет

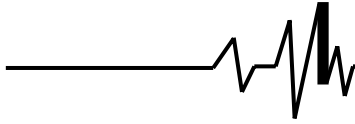
Зарубіжні члени редакційної колегії

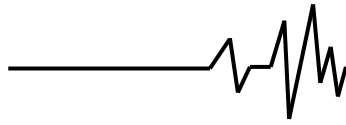
Максімов Джордан Тодоров – д.т.н., проф., Технічний Університет Габрово (Болгарія)

Технічний редактор **Замрій М.А.**

Адреса редакції: 21008, Вінниця, вул. Сонячна 3, Вінницький національний аграрний
університет, тел. 46 – 00– 03

Сайт журналу: <http://vibrojournal.vsau.org/> Електронна адреса: vibration.vin@ukr.net

**З М І С Т****I. ТЕОРІЯ ПРОЦЕСІВ ТА МАШИН***Цуркан О.В., Спірін А.В., Руткевич В.С., Дідик А.М.***ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ВОЛОСЬКИХ ГОРІХІВ В КОНВЕКТИВНО-ВІБРАЦІЙНІЙ СУШАРЦІ5***Головач І.В., Солона О.В., Мартиненко В.В.***МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РУХУ КОРЕНЕПЛОДУ БУРЯКА СТОЛОВОГО ПО СПІРАЛЯХ ВІБРАЦІЙНОГО ОЧИСНИКА.....13***Мельник В.М., Гнатейко Н.В., Бойко Г.В., Косова В.П.***МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ НАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ НАЗЕМНОГО БАЗУВАННЯ20***Slipchenko M., Polievoda Y., Zamrii M., Symonik B.***STUDY OF GRAIN FLOW IN A CYLINDRICAL VIBRATING SIEVE.....27***Возняк О.М., Ярошенко Л.В., Луц П.М., Тихоненко С.В.***АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ АПК34****II. МАШИНОБУДУВАННЯ ТА МАТЕРІАЛООБРОБКА***Михайлевич В.М., Колісник М.А., Штуць А.А.***ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ШТАМПУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ ТИПУ ФЛАНЕЦЬ НА ОСНОВІ ЗАСТОСУВАННЯ СПОСОБІВ КОМБІНОВАНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ.....46***Shargorodskiy S., Halanskyi V.***DEVELOPMENT THE MATHEMATICAL MODEL OF THE PROCESS OF STRIPED SOIL TREATMENT BY THE METHOD OF DISCRETE ELEMENTS.....58***Кондратюк Д.Г., Зозуляк І.А., Комаха В.П., Дмитренко В.П.***ВИТРАТИ ПОТУЖНОСТІ НА ПЛЮЩЕННЯ ТРАВИ ВАЛЬЦЬОВИМ ПЛЮЩИЛЬНИМ АПАРАТОМ66***Паладійчук Ю.Б., Стецюк П.М.***ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ КУТА НАХИЛУ ГРАБЛИНИ ВІДНОСНО ВОРУШІННЯ І ЗГРІБАННЯ СІНА РОТАЦІЙНИМИ ГРАБЛИНАМИ.....74****III. ПЕРЕРОБНІ ТА ХАРЧОВІ ВИРОБНИЦТВА***Цуркан О.В., Спірін А.В., Присяжнюк Д.В., Дідик А.М.***МЕТОДИКА ВИМІРЮВАННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ОЗОНУ ПРИ СУШІННІ ВОЛОСЬКИХ ГОРІХІВ У ВІБРАЦІЙНІЙ СУШАРЦІ83***Стаднік М.І., Бабин І.А., Луц П.М., Ріпа С.В.***АНАЛІЗ ТЕОРЕТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРИСТРОЇВ ДОЗУВАННЯ ТА ЗМІШУВАННЯ ЖИВИЛЬНИХ РОЗЧИНІВ.....90***Штуць А.А., Григоренко Н.В., Колісник М.А., Григоренко О.В.***АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ТРАНСПОРТУВАННЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ПРОДУКЦІЇ СПІРАЛЬНО-ГВИНТОВИМИ ТРАНСПОРТЕРАМИ.....97****IV. ДУМКА МОЛОДОГО ВЧЕНОГО***Лаверенюк П.П.***ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ВОЛОСЬКИХ ГОРІХІВ У КОНВЕКТИВНІЙ БУНКЕРНІЙ СУШАРЦІ.....111**

**Slipchenko M.**

Ph.D., Associate Professor

**Kharkiv State Vocational
and Pedagogical College
named after V.I. Vernadskyi****Polievoda Y.**

Ph.D., Associate Professor

Zamrii M.

postgraduate student

Symonik B.

postgraduate student

**Vinnitsia National Agrarian
University****Сліпченко М.В.**

к.т.н., доцент

**Харківський державний
професійно-педагогічний
фаховий коледж імені В.І.
Вернадського****Полевода Ю.А.**

к.т.н., доцент

Замрій М.А.

аспірант

Симонік Б.В.

аспірант

**Вінницький національний
аграрний університет****УДК 631.362:532****DOI: 10.37128/2306-8744-2024-3-4****STUDY OF GRAIN FLOW IN A
CYLINDRICAL VIBRATING SIEVE**

The paper proposes a modified hydrodynamic model of steady grain flow of a heterogeneous mixture on the surface of a vertical cylindrical vibrating sieve. The main hypothesis of the model is the dependence of the mixture's porosity in the moving annular layer on the particle velocity. A linear dependence is assumed, where an increase in velocity leads to an increase in the mixture's porosity. To determine the grain flow velocity, the problem is reduced to solving a non-homogeneous Bessel-type differential equation.

To simplify the solution, the "freezing" method of the variable coefficient is applied, which is permissible due to the relatively small thickness of the moving grain mixture layer compared to the sieve radius. As a result of this approximation, the velocity dependence on the radial coordinate is expressed using elementary functions. A compact formula for calculating the maximum grain flow velocity and the average velocity is derived by integrating the respective expression in elementary functions.

Additionally, an approximate formula for calculating the sieve's throughput based on the mass of the overflow fraction is proposed. Simpson's integration method is used to avoid complex calculations of special functions for large arguments via asymptotic formulas. The study shows that the sieve's throughput is significantly affected by the porosity of the grain mixture.

To assess the accuracy of the approximate formulas, numerical integration of the original Bessel-type differential equation was performed on a computer. Comparative analysis of the results confirmed that the proposed simplifications introduce minimal errors and ensure the adequacy of the theoretical results. Thus, by transitioning to the simplified differential equation, approximate formulas for calculating the key characteristics of grain flow in a vertical cylindrical vibrating sieve were developed and tested, taking into account the porosity variation of the mixture depending on the particle velocity.

The generalization of theoretical results obtained using hydrodynamic models of grain mixture flow in a pseudo-fluidized state under vibrations only slightly complicated the model but resulted in compact and practically convenient formulas for use.

Key words: vertical cylindrical vibrating sieve, porosity dependence on velocity, "freezing" coefficient method, Bessel differential equation, grain flow velocity, sieve throughput.

Introduction. The motion of the grain mixture on the vibrating sieve is described by various theories, starting from the simulation of motion in the form of a material point and ending with the model of a continuous medium. One of them is a hydrodynamic model that describes the motion of a fluidized medium. When the particles forming the mixture move, the porosity of the layer changes. This change affects the grain flow rate and, consequently, the performance of the vibrating sieves.

Analysis of recent research and publications. In the theory of motion of

vibroseparated mixtures on the surfaces of sieves, a hydrodynamic model of a fluidized mixture, initiated in [1, 2, 3, 4, 5], has become widespread. These works were about the steady motion of a homogeneous annular layer on the inner surface of a vertical cylindrical vibrating screen that rotates around its axis. A generalization of this theory in the case of variable vibration viscosity of the mixture along the thickness of the layer was carried out in [2, 4, 6]. In [2, 7, 8, 9], the generalization of hydrodynamic models was made taking into account the change in porosity in the thickness of the moving layer due to changes in



pressure. To do this, we compiled a separate differential equation describing the dependence of porosity on the spatial coordinate and solved it. Then the obtained solution was taken into account in the equation of motion of the mixture. But, as practice shows, the porosity of the mixture also depends on the speed of its movement. Based on this, an attempt is made to take into account this dependence, which is a kind of feedback, because the speed depends on the porosity, and the porosity - on the speed. The simplest variant of dependence is accepted in work, namely linear communication when porosity is big where the speed of movement is bigger. Previously, such a motion model was used when separating the mixture on a flat vibrating sieve [12, 13]. Here we consider the cylindrical shape of the sieve.

The purpose of article is the introduction and testing of approximate formulas for calculating the rate of steady motion of grain-mixed changes in porosity in the thickness of the layer during its movement on a vertically centrifugal cylindrical vibrating sieve.

Presentation of the main material. As in publications [1, 2], the original differential equation is:

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

Here $u = u(r)$ – vertical, averaged over the period of oscillations, the speed of the annular layer; r – radial coordinate; ρ – specific weight of the grain mixture g – free fall acceleration; μ – dynamic coefficient of vibration viscosity, which depends on the parameters of the oscillations of the sieve and the characteristics of the grain mixture [4] or the concentration of particles [4, 7, 11, 14]. Boundary conditions to equation (1) are:

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

where R_0, R – respectively, the inner radius of the annular layer of the mixture and the radius of the sieve (Fig. 1).

In addition to (2), other variants of boundary conditions are possible [2], in the presence of additional mixture segregators on the surface of the sieve: ribs, reefs, etc. Summarizing the known theories, we accept:

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

and: $\lambda > 0; \lambda \cdot u(R_0) < 1; \rho_*$ – specific weight of the grain mixture at rest.

Given (1), (3), we obtain a generalized differential equation of the Bessel type [15]:

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

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

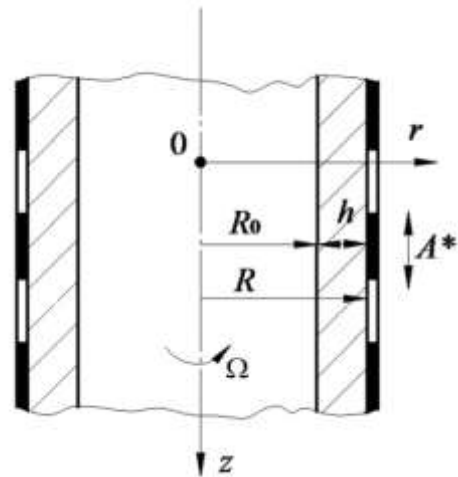


Fig. 1. Calculation scheme

The solution of equation (4) is expressed in cylindrical functions [16]. But in order not to calculate the values of special functions of a large argument by asymptotic formulas, we further construct approximate calculation formulas. To do this, instead of (4) we will solve the differential equation:

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

in which $r_* = 0,5(R_0 + R)$.

Replacement (4) by equation (5) does not give large errors due to the fact that in the practice of separation, the thickness of the moving layer of the grain mixture is much smaller than the radius of the sieve. The effectiveness of this simplification is confirmed in [2, 4].

The general solution of differential equation (5) has the form:

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

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

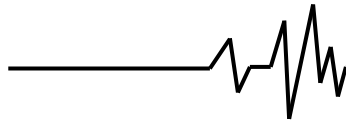
– arbitrary steels.

Substitution (6) in (2) gives a system of equations:

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

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

Solving this system, we obtain:



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

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

Given (6) and (7), we obtain the formula for grain flow rate:

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

The greatest value of speed is when $r = R_0$. Its calculation is reduced to the formula:

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

Here, as well as in formula (8), there is uncertainty of type $|0/0|$ when $\lambda \rightarrow 0$. Using the boundary transition in (8), we obtain for a homogeneous mixture ($\lambda = 0$):

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

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

after substitution (8) in (10), we obtain

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

Here

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

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

When $\lambda \rightarrow 0$ in (11) it is necessary to reveal the uncertainty of the species $|0/0|$. After performing this operation, we obtain:

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

This is an approximate formula for the average velocity of a homogeneous mixture ($\lambda = 0$).

Earlier, this formula was derived in [2]. If you specify in it $r = R_0$, you get the maximum value of speed $u(R_0)$.

In the practice of separation to assess the performance of the vibrating screen using the values of the average speed [2, 9, 10, 11, 26]:

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

Given that [16]:

When determining the mass productivity of the Q vibrating sieve by the stair fraction, it is necessary to calculate the integral:



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

For dependence (8), it is expressed in elementary functions, but the answer is cumbersome and not convenient in practice. Therefore, having received six precision, the integral (12) can be calculated approximately by Simpson's formula [15]:

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

The error of this approximation was due to the small thickness of the moving layer given by the difference $R - R_0$.

Results and Discussion. For calculations we accept $\rho_* = 750 \text{ kg/m}^3$; $R = 0,3075 \text{ m}$; $R_0 = 0,2975 \text{ m}$; $\mu = 0,6 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ and different λ . Obtained in two ways the values of velocity in the thickness of the annular layer at $\lambda = 0,1 \text{ s/m}$ are written in table. 1

Table 1

The value of speed at $\lambda = 0,1 \text{ s/m}$

$10u(r)$, m	Form. (8)	Numbers. integral	$10u(r)$, m	Form. (8)	Numbers. integral.
	Value $10u(r)$, m/s			Value $10u(r)$, m/s	
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

As can be seen from table. 1, the numerical computer integration of the differential equation (4) confirmed the small errors of its replacement by the differential equation (5), which has simple solutions.

This conclusion confirms the comparative analysis and numerical results in table. 2, which are obtained at $\lambda = 0,9 \text{ s/m}$.

Table 2

The value of speed at $\lambda = 0,9 \text{ s/m}$

$10u(r)$, m	Form. (8)	Numbers. integral	$10u(r)$, m	Form (8)	Numbers integral
	Value $10u(r)$, m/s			Value $10u(r)$, m/s	
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

Speeds in table. 2 are smaller than in table. 1, ie increasing the coefficient λ or porosity slows down the speed of the mixture.

Information on the effect of the coefficient λ on the average grain flow rate is given in table. 3, it is obtained by formula (11).

Table 3

Average grain flow rates at different λ

10λ , s/m	1	3	5	7	9
u_{av} , m/s	3,835	3,512	3,239	3,006	2,805

For comparison, in table. 4 records the speeds calculated approximately by Simpson's formula [15]:

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



as well as performance calculated by formula (13). According to the accepted numerical data $r_* = 0,3025$ m.

Calculations show that the value λ significantly affects the performance of the vibrating sieve Q by weight of the stair fraction.

Differences in the values of average speeds in table. 3 and table. 4 are quite small, ie Simpson's formula is quite suitable for an approximate definition

u_{av} .

Conclusions. The transition to a simplified differential equation derived and tested approximate formulas for calculating the main characteristics of grain flow on a vertical cylindrical vibrating screen, taking into account the change in porosity in the layer of the grain mixture from the speed of movement. This summarizes the known theoretical results obtained using hydrodynamic models of motion of grain mixtures, fluidized by vibrations. The generalization did not significantly complicate the theory, because the final calculation formulas are quite compact and convenient in practice.

Table 4

The results of calculations by formulas (13) and (14)

10λ , s/m	1	3	5	7	9
Q , kg/s	5,210	4,360	3,702	3,183	2,765
$10u_{av}$, m/s	3,835	3,510	3,237	3,004	2,802

References

- Adamchuk V., Bulgakov V., Ivanovs S., Holovach I., & Ilnatiev Y. (2021). Teoretychne doslidzhennya pnevmatichnoho rozdilennya hranovykh sumishey v nasypnomu pototsi. [Theoretical study of pneumatic separation of grain mixtures in vortex flow]. *In Engineering for Rural Development*. № 20. P. 657-664. [in English].
- Aliiev E., Gavrilchenko A., Tesliuk H., Tolstenko A., & Koshul'ko V. (2019). Pidvyshchennya efektyvnosti protsesu separatsiyi nasynnya sonyashnyku na vibratsiyiniy poverkhni [Improvement of the sunflower seed separation process efficiency on the vibrating surface]. *Acta Periodica Technologica*. № 50. P. 12-22. [in English].
- Stepanenko S. P., Kotov B. I., Kalinichenko R. A. (2021). Doslidzhennya rukhu chastynok zernovoho materialu u vertykal'nomu kanali v umovakh pul'satsiyi povitryanoho potoku. [Study of the movement of particles of grain material in a vertical channel under the conditions of pulsation of the air flow]. *Agricultural machinery*. № 47. P. 25-37. [in Ukrainian].
- Bredykhin V., Pak A., Gurskyi P., Denisenko S., & Bredykhina K. (2021). Udoskonalennya mekhaniko-matematychnoyi modeli pnevmovibratsiyinoho vidtsentrovoho fraktsionuvannya zernovykh materialiv za yikh hustynoyu. [Improving the mechanicalmathematical model of pneumatic vibration centrifugal fractionation of grain materials based on their density]. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. №4 1 (112). P. 54-60. [in English].
- Bulgakov V., Nikolaenko S., Holovach I., Adamchuk V., Kiurchev S., Ivanovs S. & Olt J. (2020). Teoriya rukhu chastynok zernovoyi sumishi pry aspiratsiyiniy separatsiyi. [Theory of grain mixture particle motion during aspiration separation]. *Agronomy Research*. № 18 (1). P. 18-37. [in English].
- Kotov B. I., Stepanenko S. P. (2023). Osnovy teorii ta tekhnolohiyi povitryanoyi separatsiyi zernovykh materialiv. [Basics of the theory and

- technology of air separation of grain materials]. Kyiv: CP Comprint, 427 p. [in Ukrainian].
- Kharchenko S., Borshch Y., Kovalyshyn S., Piven M., Abduev M., Miernik A., Popardowski E., & Kielbasa P. (2021). Modelyuvannya aerodynamichnoyi separatsiyi poperedn'o rozsharovanoyi zernovoyi sumishi u vertykal'nomu pnevmoseparatori. [Modeling of aerodynamic separation of preliminarily stratified grain mixture in vertical pneumatic separation duct]. *Applied Sciences*. № 11 (10). 4383 p. [in English].
- Rogovskii I., Titova L., Trokhaniak, V., Trokhaniak, O. & Stepanenko S. (2020) Eksperymental'ne doslidzhennya protsesu ochyshchennya zerna u vibropnevmatychnomu stiykomu separatori z pasyvnymy propolyuvachamy. [Experimental study of the process of grain cleaning in a vibro-pneumatic resistant separator with passive weeders]. *Series II: Forestry Wood Industry Agricultural Food Engineering*. № 13 62 (1). P. 117–128. [in English].
- Tishchenko L, Kharchenko S., Kharchenko F., Bredykhin V., & Tsurkan O. (2016). [Identification of a mixture of grain particle velocity through the holes of the vibrating sieves grain separators]. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, №2 7 (80). P. 63-69. [in English].
- Stepanenko S., Kotov B., Kuzmych A., Shvydia V., Kalinichenko R., Kharchenko S., Shchur T., Kocira S., Kwa'sniewski D., & Dziki D. (2022). Do teorii rukhu zerna pry nerivnomirnomu pototsi povitrya u vertykal'nomu pnevmoseparatsiyinomu kanali z protsesamy kil'tsevoho pererizu. [To the theory of grain motion in an uneven air flow in a vertical pneumatic separation channel with an annular cross section processes]. *Progress in Food Processing*. №10. 1929 p. [in English].
- Rebot D. P., Topilnytskyi V. G. (2022). Matematychna model' rukhu sypkoho materialu u vibratsiyinomu separatori. [Mathematical model of movement of loose material in a vibrating separator.] *Automation of production processes in mechanical*



engineering and instrument engineering. № 56. P. 67–74. [in Ukrainian].

12. Kotov B. I., Stepanenko S. P. (2020). Matematychnе modelyuvannya protsesiv podilu komponentiv zernovoho materialu v kombinovanomu vibratsiyno-povityranomu separatori. [Mathematical modeling of the processes of separation of grain material components in a combined vibration-air separator]. *Vibrations in engineering and technologies*. № 2 (97). P. 51-61. [in Ukrainian].

13. Reguła T., Fraczek J., & Fitas J. A (2021). Model' transportuvannya chastynek biomasy v pototsi ridyny. [Model of Transport of Particulate Biomass in a Stream of Fluid]. *Processes*. № 9 (1). 5 p. [in English].

14. Mykhailov Y., Zadosna N., Postnikova M., Pedchenko G., Khmelovskiy V., Bondar M., Ionichev A., Kozdęba M., & Tomaszewska-Górecka W. (2021). Enerhetychna otsinka pnevmatychnoho sytovoho separatora dlya sil'skohospodars'kykh kul'tur. [Energy Assessment of the Pneumatic Sieve Separator for Agricultural Crops]. *Agricultural Engineering*. № 25 (1). P. 147-156. [in English].

15. Stepanenko S., Kotov B., Kuzmych A., Kalinichenko R., & Hryshchenko V. (2023). Doslidzhennya protsesu povityranoyi separatsiyi zernovoho materialu u vertykal'nomu zyhzhahopodibnomu kanali. [Research of the process of air separation of grain material in a vertical zigzag channel]. *Journal of Central European Agriculture*. № 24 (1) P. 225-235. [in English].

16. Nesterenko A., Leshchenko S., Vasylykovskiy O., & Petrenko D. (2017). Analitichna otsinka yakosti pnevmoseparatsiyi v protsesi bahatosharovoho zhyvlennya zerna. [Analytical assessment of the pneumatic separation quality in the process of grain multilayer feeding]. *Agricultural Engineering*. № 53 (3). P. 65-70. [in English].

17. Stepanenko S. P., Kotov B. I. (2018). Osnovni kontseptual'ni polozhennya pnevmatychnoho fraktsionuvannya zernovykh materialiv. [Basic conceptual provisions of pneumatic fractionation of grain materials]. *Mechanization and electrification of agriculture*. № 8 (107). P. 80-88. [in Ukrainian].

18. Kotov B. I., Stepanenko S. P. (2020). Osnovni teoretychni polozhennya separatsiyi zernovoho materialu v povityranykh kanalakh z nerivnomirnoyu shvydkistyu povityranoho potoku. [Basic theoretical principles of grain material separation in air ducts with non-uniform air flow speed]. *Construction, production and operation of agricultural machines*. № 50. P. 122-133. [in Ukrainian].

19. Shvidia V. O., Stepanenko S. P., Kotov B. I., Spirin A. V., & Kucheruk V. Yu. (2022). Vplyv vakuumu na sushinnya nasinnya zernovykh kul'tur. [Influence of vacuum on drying of seeds of grain crops]. *Herald of Karaganda University «Physics» series*. № 3 (107). P. 90-98. [in English]. <https://DOI/10.31489/2022PH3/90-98>

20. Stepanenko S., Aneliak M., Kuzmych A., Kustov S., & Lysaniuk V. (2022) Pidvyshchennya

efektyvnosti zbyrannya nasinnya sonyashnyku. [Improving the efficiency of harvesting sunflower seed crops]. *Agricultural Engineering*. № 67 (2). P. 331-340. [in English].

21. Kotov B., Stepanenko S., Tsurkan O., Hryshchenko V., Pantsyr Y., Garasymchuk I., Spirin A., & Kupchuk I. (2023). Fraktsionuvannya zernovykh materialiv u vertykal'nomu kil'tsevomu povityranomu kanali pry nakladenni elektrychnoho polya. [Fractioning of grain materials in the vertical ring air channel during electric field imposition]. *Przegľad elektrotechniczny*. № 99 (1). P. 100-104. [in English].

22. Stepanenko S., Kotov B. I., Spirin A.V., & Kucheruk V.Yu. (2022). Naukovi osnovy rukhu komponentiv zernovoho materialu zi shtucho sformovanyim rozpodilom shvydkosti povityrya. [Scientific foundations of the movement of components of grain material with an artificially formed distribution of air velocity]. *Herald of Karaganda University. «Physics» series*. № 1 (105). P. 43-57. [in English].

23. Adamchuk V., Bulgakov V., Gadzalo I., Ivanovs S., Stepanenko S., Holovach I., & Ihnatiev Y. (2021). Teoretychnе doslidzhennya vibrovidsentrovoyi separatsiyi zernovykh sumishey na bezreshetny nasinnyeochysny mashyni. [Theoretical study of vibrocentrifugal separation of grain mixtures on a sieveless seed-cleaning machine]. *Rural sustainability research*. № 46 (341). P. 116-124. [in English].

24. Kotov B. I., Stepanenko S.P., Popadyuk I.S. (2021). Doslidzhennya protsesu pnevmovibratsiynoho podilu zerna za hustynoyu pid chas odnomirnogo peremishchennya zernovoho potoku. [Study of the process of pneumatic vibration separation of grain by density during onedimensional movement of the grain flow]. *Mechanization and electrification of agriculture*. № 14 (113). P. 77-87. [in Ukrainian].

25. Kotov B. I., Stepanenko S. P., Rud A. V., Zamrii M. A. (2022). Teoretychni doslidzhennya protsesu rukhu zernovoho materialu na poverkhni stupinchastoho vibrozhyvyl'nyka. [Theoretical studies of the movement of grain material on the surface of a stepped vibratory feeder]. *Vibrations in Engineering and Technologies*. № 2 (105). P. 25-32. [in Ukrainian]. <https://DOI:10.37128/2306-8744-2022-2-3>

26. Olshansky S. V., Slipchenko M. V., Kharchenko S. O., Polievoda Yu. A. (2021). Nablyzheny sposib rozrakhunku zernopotoku v vertykal'nomu tsylindrychnomu vibroresheti. [An approximate method of calculating grain flow in a vertical cylindrical vibrating sieve]. *Vibrations in Engineering and Technologies*. № 1 (100). P. 57-64. [in Ukrainian]. <https://DOI:10.37128/2306-8744-2021-1-6>

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗЕРНОПОТОКУ В ЦИЛІНДРИЧНОМУ ВІБРОРЕШЕТІ

У роботі запропоновано модифіковану гідродинамічну модель усталеного зернопотоку неоднорідної суміші на поверхні вертикального



циліндричного віброрешета. Основною гіпотезою моделі є залежність пористості суміші в рухомому кільцевому шарі від швидкості частинок. Прийнято лінійну залежність, де збільшення швидкості руху призводить до зростання пористості суміші. Для визначення швидкості зернопотоку задача зводиться до розв'язання неоднорідного диференціального рівняння типу Бесселя.

З метою спрощення розв'язку використано метод «заморожування» змінного коефіцієнта, що допустимо через відносно малу товщину рухомого шару зерноsumіші порівняно з радіусом віброрешета. В результаті такої апроксимації вдалося отримати залежність швидкості від радіальної координати у вигляді елементарних функцій. Було виведено компактну формулу для розрахунку максимальної швидкості зернопотоку, а також середньої швидкості, шляхом інтегрування відповідного виразу в елементарних функціях.

Крім того, запропоновано наближену формулу для обчислення продуктивності віброрешета за масою сходової фракції. Для цього використано метод інтегрування за формулою Сімпсона, що дозволяє уникнути складних обчислень значень спеціальних функцій для великих аргументів за допомогою

асимптотичних формул. Дослідження показало, що продуктивність віброрешета суттєво залежить від пористості зерноsumіші.

Для оцінки точності наближених формул було виконано чисельне інтегрування вихідного диференціального рівняння типу Бесселя на комп'ютері. Результати порівняльного аналізу підтвердили, що запропоновані спрощення мають незначні похибки і забезпечують адекватність теоретичних результатів. Таким чином, через перехід до спрощеного диференціального рівняння було розроблено та протестовано наближені формули для розрахунку основних характеристик зернопотоку на вертикальному циліндричному віброрешеті, з урахуванням зміни пористості суміші залежно від швидкості руху частинок.

Узагальнення теоретичних результатів, отриманих з використанням гіродинамічних моделей руху зерноsumішей у псевдозрідженому стані під впливом вібрацій, незначно ускладнило модель, але призвело до створення компактних і практично зручних для використання розрахункових формул.

Ключові слова: вертикальне циліндричне віброрешето, залежність пористості від швидкості, метод «заморожування» коефіцієнта, диференціальне рівняння Бесселя, швидкість зернопотоку, продуктивність віброрешета.

Відомості про авторів

Slipchenko Maksym – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, head of the department of professional education of Kharkiv State Vocational and Pedagogical College named after V.I. Vernadskyi (Kharkov, Ukraine, 61002, email: Slipchenko_M@ukr.net, phone: (066) 7120989).

Polievoda Yuriy – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Bioengineering, Bio- and Food Technologies Faculty of Production Technology, Processing and Robotics in Animal Husbandry of the Vinnytsia National Agrarian University (Sonyachna St., 3, Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: vinyura36@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2485-0611>).

Zamrii Mykhailo – recipient of the scientific degree of Doctor of Philosophy in the specialty 133 Industrial mechanical engineering, assistant of the Department of Labor Protection and Biotechnical Systems in Animal Husbandry, Faculty of Production Technology, Processing and Robotics in Animal Husbandry of the Vinnytsia National Agrarian University. Office address: Vinnytsia, str. Sonyachna 3, VNAU 21008, <https://orcid.org/0000-0002-9433-6714>).

Symonik Bohdan – recipient of a Doctor of Philosophy degree in specialty 181 Food Technologies of the Vinnytsia National Agrarian University.

Сліпченко Максим Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, завідувач відділення професійної освіти Харківського державного професійно-педагогічного фахового коледжу імені В.І. Вернадського (м. Харків, Україна, 61002, email: Slipchenko_M@ukr.net, тел.: (066) 7120989).

Полевода Юрій Алікович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри біоінженерії, біо- та харчових технологій факультету технології виробництва, переробки та робототехніки у тваринництві Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: vinyura36@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2485-0611>).

Замрій Михайло Анатолійович – здобувач наукового ступеня доктора філософії з галузевого машинобудування, асистент кафедри охорони праці та біотехнічних систем у тваринництві факультету технології виробництва, переробки та робототехніки у тваринництві Вінницького національного аграрного університету. Службова адреса: м. Вінниця, вул. Сонячна 3, ВНАУ 21008, <https://orcid.org/0000-0002-9433-6714>).

Симонік Богдан Володимирович – здобувач наукового ступеня доктора філософії з харчових технологій Вінницького національного аграрного університету.