

Ольшанський В.П.
д.ф.-м.н., професор

Харченко С.О.
к.т.н., доцент

**Харківський
національний технічний
університет сільського
господарства
імені П. Василенка**

Olshanskii V.

Kharchenko S.

**Kharkiv Petro Vasylenko
National Technical
University of Agriculture**

УДК 631.362:532

ПРО ДИНАМІКУ ЗЕРНОСУМІШІ ЗМІННОЇ ПОРИСТОСТІ В ЦИЛІНДРИЧНОМУ ВІБРОРЕШЕТІ

На підставі континуальної гідродинамічної моделі виведено замкнені формули для обчислення швидкості зернопотоку по поверхні вертикального циліндричного решета віброцентрифуги, в припущенні, що розподіл питомої маси по товщині шару дрібнозернистої суміші залежить від швидкості руху сипкого матеріалу. Складено лінійне диференціальне рівняння типу Бесселя для швидкості усталеного руху суміші та побудовано його аналітичний розв'язок в циліндричних функціях нульового індексу. Показано, що у граничному випадку, без урахування зміни пористості, виведена формула переходить у відомий вираз, одержаний раніше в рамках гідродинамічної моделі, для однорідної вібророзрідженої суміші. З'ясовано можливість використання в інженерних розрахунках також наближеного розв'язку, отриманого в результаті спрощення диференціального рівняння зернопотоку. На числових прикладах досліджено вплив різних чинників на швидкість руху суміші по решету та його продуктивність по сходовій фракції.

Ключові слова: вертикальне циліндричне віброрешето, усталений зернопотік, зміна пористості, диференціальне рівняння, функції Бесселя.

Постановка проблеми. Дослідження динаміки вібросепарованих сумішей з урахуванням зміни пористості по товщині рухомого шару проводили в роботах [1-6]. У названих публікаціях припускали, що розподіл концентрації зерен по товщині рухомого шару залежить від наявності активаторів сегрегації (ребер, рифлів, тощо) на поверхні решета, а також від амплітуди і частоти його коливань. У ході розрахунків, спочатку числовим інтегруванням нелінійного диференціального рівняння другого порядку зі змінними коефіцієнтами визначали розподіл пористості, а потім враховували його вплив на швидкість руху суміші й інші кінематичні характеристики, використовуючи теж числові методи інтегрування. При постановці задачі динаміки в згаданих публікаціях не враховували зворотній зв'язок, тобто вплив швидкості руху на розподіл пористості. Про цей недолік відомих континуальних моделей руху сипких матеріалів йдеться у монографії [7]. Тому тут пропонується математична модель зернопотоку, де значення питомої маси по товщині рухомого циліндричного

шару сепарованої дрібнозернистої суміші залежить від швидкості руху. Згідно з прийнятою залежністю, біля вільної поверхні суміші її питома маса менша, ніж біля поверхні віброрешета. Оскільки зі збільшенням радіальної координати зменшується швидкість зернопотоку, то більшій швидкості руху відповідає менша питома маса суміші і навпаки.

Формування мети дослідження. Метою даної статті є виведення та апробація розрахунками формул для обчислення швидкості зернопотоку, коли питома маса дрібнозернистої суміші залежить від швидкості її руху.

Виклад основного матеріалу дослідження. Використовуємо розрахункову схему зображену на рис. 1. Тут r – радіальна координата; R_0 – радіус вільної поверхні суміші; R – радіус решета; $h = R - R_0$ – товщина шару; oz – спрямована вниз вертикальна вісь, у напрямку якої відбувається рух суміші, зі швидкістю $u = u(r)$.

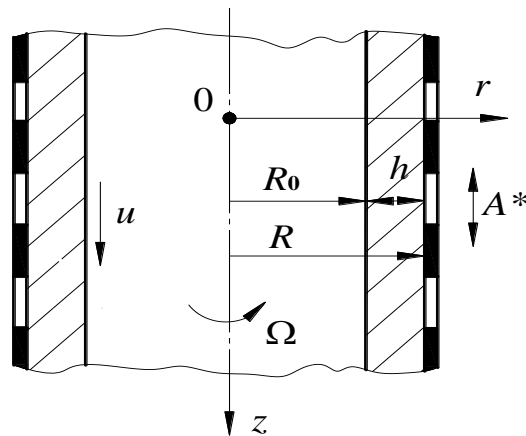
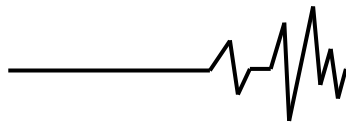


Рис. 1. Розрахункова схема вертикального циліндричного решета з сепарованою сумішшю

Розподіл концентрації зерен по радіальній координаті $v = v(r)$ описуємо виразом:

$$v(r) = v_* \frac{1 - \delta \cdot u(r)}{1 - \delta u_*}, \quad (1)$$

де якому $1 - \delta u(R_0) > 0$; $v_* = v(R)$ – концентрація зерен в суміші біля поверхні решета; δ – феноменологічна стала, що підлягає експериментальному визначенню; $u(r)$ – вертикальна швидкість усталеного зернопотоку; $u_* = u(R)$ – швидкість ковзання суміші по поверхні решета.

Стала δ залежить від параметрів коливань решета і наявності на його поверхні активаторів процесу сегрегації.

Оскільки $u(r)$ зменшується зі зростанням r , то згідно з (1), концентрація зерен біля вільної поверхні суміші менша, ніж біля поверхні решета. Якісно такий розподіл v по товщині рухомого шару мали і в роботах [1-6], але там v не залежало від $u(r)$.

Дотичне напруження в циліндричному шарі суміші $\tau = \tau(r)$ задовольняє диференціальному рівнянню [8, с. 25]:

$$\frac{d}{dr}(r\tau) = -\gamma g r v(r),$$

або

$$\frac{d\tau}{dr} + \frac{1}{r}\tau = -\gamma g v(r), \quad (2)$$

де γ – питома маса матеріалу зернин; g – прискорення вільного падіння.

Далі скористаємось залежністю Ньютона між дотичним напруженням і швидкістю деформацій зсуву:

$$\tau = \mu \frac{du}{dr}, \quad (3)$$

де μ – динамічний коефіцієнт в'язкості вібророзрідженої суміші.

Після підстановки (1) і (3) в (2), одержуємо диференціальне рівняння для визначення швидкості руху:

$$\frac{d^2u}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du}{dr} - a^2 u = -\frac{a^2}{\delta}. \quad (4)$$

$$\text{Тут } a^2 = \frac{\gamma g v_* \delta}{\mu(1 - \delta u_*)}.$$

Крайовими умовами до (4) приймаємо:

$$u(R) = u_*; \quad \left. \frac{du}{dr} \right|_{r=R_0} = 0. \quad (5)$$

Загальний розв'язок рівняння (4) має вигляд:

$$u(r) = \frac{1}{\delta} + A \cdot I_0(ar) + B \cdot K_0(ar), \quad (6)$$

де $I_0(ar)$ – модифікована функція Бесселя; $K_0(ar)$ – функція Макдональда; A, B – довільні сталі.

Підставивши (6) в (5), з урахуванням того, що [9, 10]:

$$\frac{d}{dr} I_0(ar) = a I_1(ar); \quad \frac{d}{dr} K_0(ar) = -a K_1(ar),$$

одержуємо систему рівнянь:

$$\frac{1}{\delta} + A \cdot I_0(aR) + B \cdot K_0(aR) = u_*,$$

$$A \cdot I_1(aR_0) - B \cdot K_1(aR_0) = 0. \quad (7)$$

Тут $I_1(aR_0), K_1(aR_0)$ – циліндричні функції індексу одиниця.



Після визначення сталих A і B з системи (7), одержуємо формулу швидкості зернопотоку:

$$u(r) = \frac{1}{\delta} + \left(u_* - \frac{1}{\delta}\right) \times \frac{K_1(aR_0)I_0(ar) + I_1(aR_0)K_0(ar)}{I_0(aR)K_1(aR_0) + I_1(aR_0)K_0(aR)}. \quad (8)$$

Обчислення швидкості дещо спрощується на вільній поверхні суміші, де вона максимальна, бо в чисельнику в (8), при $r = R_0$, маємо [9, 10]:

$$K_1(aR_0)I_0(aR_0) + I_1(aR_0)K_0(aR_0) = \frac{1}{aR_0}.$$

Тому:

$$\max u = u(R_0) = \frac{1}{\delta} + \frac{(u_* - 1/\delta)}{aR_0 [I_0(aR)K_1(aR_0) + I_1(aR_0)K_0(aR)]}.$$

Іноді, в інженерних розрахунках зернопотік характеризують середньою швидкістю u_{cp} :

$$u_{cp} = \frac{2}{R^2 - R_0^2} \int_{R_0}^R r u(r) dr. \quad (9)$$

Вона теж виражається через функції Бесселя. Дійсно, якщо врахувати, що [11, с. 697]:

$$\int_0^1 r I_0(ar) dr = \frac{1}{a} I_1(a); \quad \int_0^1 r K_0(ar) dr = \frac{1}{a^2} [1 - a \cdot K_1(a)],$$

то після підстановки (8) в (9), отримуємо:

$$u_{cp} = \frac{1}{\delta} + \frac{2(u_* - 1/\delta)R}{a(R^2 - R_0^2)} \times \frac{K_1(aR_0)I_1(aR) - K_1(aR)I_1(aR_0)}{I_0(aR)K_1(aR_0) + I_1(aR_0)K_0(aR)}.$$

Формула (8) непридатна для розрахунків при $\delta = 0$. Щоб здійснити граничний перехід $\delta \rightarrow 0$ в (8), використаємо асимптотичні подання циліндричних функцій малого аргументу [8]:

$$I_0(ax) \sim 1 + \frac{1}{4}(ax)^2; \quad I_1(ax) \sim \frac{1}{2}(ax); \quad K_0(ax) \sim -\ln ax; \quad K_1(ax) \sim \frac{1}{ax}. \quad (10)$$

Тоді, у відповідності з (8) і (10):

$$\begin{aligned} \lim_{\delta \rightarrow 0} u(r) &= u_* + \lim_{\delta \rightarrow 0} \times \frac{1 + \frac{a^2 R^2}{4} - (aR_0)^2 \ln(aR) - 1 - \frac{a^2 r^2}{4} + (aR_0)^2 \ln(ar)}{\delta \left[1 + \frac{a^2 R^2}{4} - (aR_0)^2 \ln aR \right]} = \\ &= u_* + \frac{\gamma g v_*}{4\mu} (R^2 - r^2) + \frac{\gamma g v_*}{2\mu} R_0^2 \ln \frac{r}{R}. \end{aligned}$$

Якщо далі позначити $\gamma v_* = \rho$, то, внаслідок граничного переходу, отримуємо:

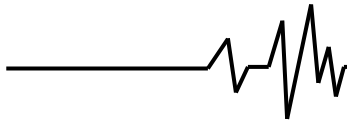
$$\lim_{\delta \rightarrow 0} u(r) = \frac{\rho g}{4\mu} \left(R^2 - r^2 + R_0^2 \ln \frac{r^2}{R^2} \right) + u_*,$$

що при $u_* = 0$ співпадає з формулою (2.35) в [12, с. 88], одержаною для швидкості зернопотоку однорідної суміші.

У випадку $\delta > 0$, для обчислення $u(r)$ по формулі (8), можна використовувати таблиці циліндричних функцій [8, 9].

Але в практиці сепарування значення розрахункових параметрів такі, що $aR_0 \gg 1$.

Тому зручніше $u(r)$ обчислювати за допомогою асимптотичних наближень циліндричних функцій при великих значеннях аргументу [9]:



$$I_s(ax) \sim \frac{e^{ax}}{\sqrt{2\pi ax}} \times \left[1 - \frac{\lambda - 1}{8ax} + \frac{(\lambda - 1)(\lambda - 9)}{2!(8ax)^2} - \frac{(\lambda - 1)(\lambda - 9)(\lambda - 25)}{3!(8ax)^3} \right]; \quad (11)$$

$$K_s(ax) \sim \frac{\sqrt{\pi} \cdot e^{-ax}}{\sqrt{2ax}} \times \left[1 + \frac{\lambda - 1}{8ax} + \frac{(\lambda - 1)(\lambda - 9)}{2!(8ax)^2} + \frac{(\lambda - 1)(\lambda - 9)(\lambda - 25)}{3!(8ax)^3} \right];$$

$$s = 0; 1; \lambda = 4s^2.$$

Уже при $ax \geq 4$ формули забезпечують високу точність обчислень значень спеціальних функцій. У цьому переконують результати, наведені в табл. 1. У чисельниках записано значення циліндричних функцій, обчислені по формулах (11), а в знаменниках – взяті з таблиць в [9, 10].

Враховуючи, що в практиці сепарування $R_0 \gg h$, побудуємо, для порівняння з точним, наближений розв'язок задачі руху. Оскільки r

змінюється на короткому проміжку $r \in [R_0; R_0 + h]$, замінимо множник $1/r$ в (4) його середнім значенням $1/(R - 0,5h)$. В результаті, замість (4), одержимо спрощене рівняння зі сталими коефіцієнтами:

$$\frac{d^2u}{dr^2} + \frac{1}{R - 0,5h} \frac{du}{dr} - a^2u = -\frac{a^2}{\delta}.$$

Таблиця 1

Значення циліндричних функцій великих аргументів

ax	2	3	4	5	6
$I_0(ax)e^{-ax}$	$\frac{0,30727}{0,30851}$	$\frac{0,24235}{0,24300}$	$\frac{0,20681}{0,20700}$	$\frac{0,18348}{0,18354}$	$\frac{0,16663}{0,16666}$
$I_1(ax)e^{-ax}$	$\frac{0,21732}{0,21527}$	$\frac{0,19766}{0,19683}$	$\frac{0,17899}{0,17875}$	$\frac{0,16405}{0,16397}$	$\frac{0,15208}{0,15205}$
$K_0(ax)e^{ax}$	$\frac{0,83830}{0,84157}$	$\frac{0,69714}{0,69776}$	$\frac{0,60911}{0,60930}$	$\frac{0,54773}{0,54781}$	$\frac{0,50183}{0,50189}$
$K_1(ax)e^{ax}$	$\frac{1,03779}{1,03348}$	$\frac{0,80738}{0,80656}$	$\frac{0,68182}{0,68158}$	$\frac{0,60037}{0,60027}$	$\frac{0,54222}{0,54220}$

Воно має загальний розв'язок:

$$u(r) = \frac{1}{\delta} + c_1 \exp(k_1 r) + c_2 \exp(k_2 r),$$

в якому $k_{1,2} = \pm \sqrt{a^2 + \left(\frac{1}{2R - h}\right)^2} - \frac{1}{2R - h};$

c_1, c_2 – довільні сталі.

Значення c_1 і c_2 визначаємо з крайових умов (5).

Після елементарних перетворень отримуємо наближену розрахункову формулу:

$$u(r) = \frac{1}{\delta} + \left(u_* - \frac{1}{\delta}\right) \times$$

$$\times \frac{k_1 \exp[k_2(r - R_0)] - k_2 \exp[k_1(r - R_0)]}{k_1 \exp(k_2 h) - k_2 \exp(k_1 h)} \quad (12)$$

Вона спрощується при обчисленні максимального значення швидкості, бо:

$$\max u = u(R_0) = \frac{1}{\delta} + \left(u_* - \frac{1}{\delta}\right) \frac{k_1 - k_2}{k_1 \exp(k_2 h) - k_2 \exp(k_1 h)}.$$

Отже, наближений розв'язок задачі виражається в елементарних функціях. До обчислення цих функцій зводиться і розрахунок продуктивності решета P по сходовій фракції. Дійсно, якщо взяти до уваги, що:

$$\int_0^1 r e^{k(r - R_0)} dr = \frac{1}{k^2} [(kR - 1)e^{kh} + 1 - kR_0], \quad \text{то}$$

$$P = 2\pi\gamma \int_{R_0}^R r v(r) u(r) dr = 2\pi\gamma \frac{cv_*}{\delta(\delta u_* - 1)} \times \left\{ \frac{k_1}{k_2^2} \cdot [(k_2 R - 1)e^{k_2 h} + 1 - k_2 R_0] - \right.$$

$$\left. - \frac{k_2}{k_1^2} \cdot [(k_1 R - 1)e^{k_1 h} + 1 - k_1 R_0] + \frac{ck_1^2}{4k_2^2} \times [(2k_2 R - 1)e^{2k_2 h} + 1 - 2k_2 R_0] - 2c \frac{k_1 k_2}{(k_1 + k_2)^2} \times \right.$$



$$\times \left[(k_1 R + k_2 R - 1) e^{(k_1 + k_2)h} + 1 - (k_1 + k_2) R_0 \right] + \frac{ck_2^2}{4k_1^2} \cdot \left[(2k_1 R - 1) e^{2k_1 h} + 1 - 2k_1 R_0 \right] \} \quad (13)$$

$$\text{Тут } c = \frac{\delta u_* - 1}{k_1 e^{k_2 h} - k_2 e^{k_1 h}}$$

Проведемо далі аналіз числових результатів, до яких приводять виведені формули. В розрахунках приймали: $R = 0,3075$ м; $\gamma = 1350$ кг/м³.

В табл. 2 записано значення швидкості зернопотоку, обчислені при $h = 0,02$ м; $\mu = 2$ Па·с; $u_* = 0,04$ м/с; $v_* = 0,5$ і різних δ, r . Результати в чисельниках одержано по формулах (8), (11), а в знаменниках по формулі (12).

Маємо гарну відповідність результатів, одержаних з використанням точного і

наближеного розв'язків. Це дає підставу вважати прийнятними для інженерних розрахунків не тільки формулу (12), а і формулу (13).

Одержані при $h = 0,016$ м; $\mu = 1,8$ Па·с; $v_* = 0,55$; $u_* = 0,03$ м/с профілі швидкості руху та розподіли пористості по координаті $r_* = (r - R_0)h^{-1}$ для трьох значень δ зображено на рис. 2 і рис. 3.

Як бачимо, від значення реологічної сталої δ суттєво залежать кінематичні характеристики зернопотоку.

Таблиця 2

Значення $u(r)$, обчислені двома способами

$\frac{r - R_0}{h}$	$\delta = 0,5$ с/м	$\delta = 1$ с/м	$\delta = 1,5$ с/м	$\delta = 2$ с/м
	Значення $10u(r)$ м/с			
0	<u>5,4744</u> 5,4744	<u>4,5311</u> 4,5311	<u>3,8537</u> 3,8537	<u>3,3441</u> 3,3441
0,2	<u>5,2785</u> 5,2785	<u>4,3802</u> 4,3802	<u>3,7345</u> 3,7345	<u>3,2483</u> 3,2483
0,4	<u>4,6893</u> 4,6892	<u>3,9220</u> 3,9219	<u>3,3690</u> 3,3689	<u>2,9515</u> 2,9514
0,6	<u>3,6960</u> 3,6957	<u>3,1352</u> 3,1350	<u>2,7296</u> 2,7294	<u>2,4221</u> 2,4219
0,8	<u>2,2772</u> 2,2768	<u>1,9809</u> 1,9806	<u>1,7657</u> 1,7655	<u>1,6019</u> 1,6017

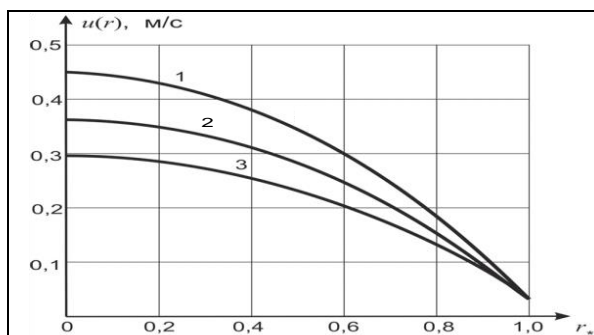


Рис. 2. Профілі швидкості при різних δ : 1 – $\delta = 0,5$ с/м; 2 – $\delta = 1,25$ с/м; 3 – $\delta = 2$ с/м

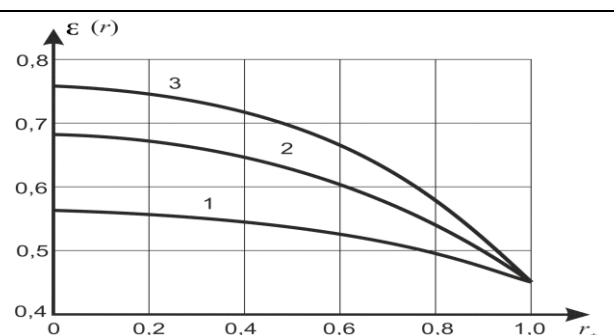


Рис. 3. Пористості суміші при різних δ : 1 – $\delta = 0,5$ с/м; 2 – $\delta = 1,25$ с/м; 3 – $\delta = 2$ с/м

На рис. 4 і рис. 5 зображено графіки зміни швидкості зернопотоку та пористості суміші в залежності від $r_* = (r - R_0)h^{-1}$ для трьох значень v_* . Обчислення проведено при $h = 0,016$ м; $\mu = 1,8$ Па·с; $u_* = 0$; $\delta = 1$ с/м.

Тут більшим v_* відповідає більша швидкість зернопотоку і менша пористість суміші.

Результати обчислень продуктивності віброрешета по формулі (12) записано в табл. 3 і табл. 4. Для проведення розрахунків задавали: $h = 0,012$ м; $u_* = 0$ та різні μ, δ, v_* .

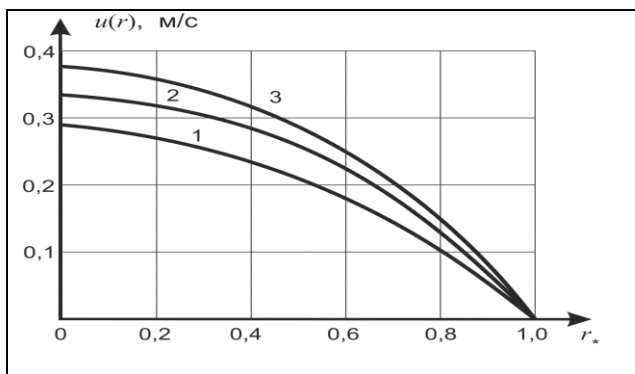
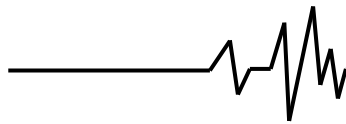


Рис. 4. Профілі швидкості при різних v_* : 1 – $v_* = 0,4$; 2 – $v_* = 0,5$; 3 – $v_* = 0,6$

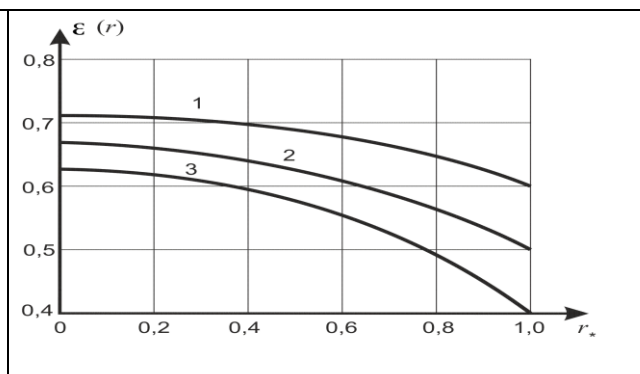


Рис. 5. Пористості суміші при різних v_* : 1 – $v_* = 0,4$; 2 – $v_* = 0,5$; 3 – $v_* = 0,6$

Таблиця 3

Продуктивність решета при $v_* = 0,55$

μ , Па·с	$\delta = 0,5$ с/м	$\delta = 1$ с/м	$\delta = 1,5$ с/м	$\delta = 2$ с/м
	Значення P , кг/с			
1,8	2,588	2,130	1,786	1,520
2,0	2,378	1,990	1,692	1,456
2,2	2,199	1,867	1,605	1,396

Таблиця 4

Продуктивність решета при $\delta = 1,5$ с/м

μ , Па·с	$v_* = 0,45$	$v_* = 0,50$	$v_* = 0,55$	$v_* = 0,6$
	Значення P , кг/с			
1,8	1,314	1,546	1,786	2,031
2,0	1,235	1,459	1,692	1,930
2,2	1,165	1,381	1,605	1,837

Розрахунки показують, що концентрація зерен суттєво впливає на масову продуктивність решета по сходовій фракції. Збільшення феноменологічної сталої супроводжується зменшенням продуктивності решета.

Висновки. Запропонована тут математична модель враховує залежність пористості суміші від швидкості її руху в циліндричному віброрешеті. Виведені формули дають можливість обчислювати швидкість зернопотоку і продуктивність решета по сходовій фракції. При цьому замість точного розв'язку задачі руху в циліндричних фракціях можна використовувати також наближений розв'язок в елементарних функціях.

Список використаних джерел

1. Пивень М.В. Обоснование параметров процесса решетного сепарирования зерновых смесей: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.11 / М.В. Пивень. – Харьков: ХНТУСГ им. П. Василенко, 2006. – 265 с.
 2. Тищенко Л.Н. Моделирование процессов зерновых сепараторов

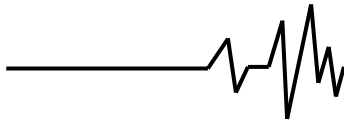
Л.Н. Тищенко, Д.И. Мазоренко и др. – Харьков: Миськдрук, 2010. – 360 с.

3. Тищенко Л.Н. Обоснование процесса сегрегации зерновых смесей при сепарировании виброцентробежными решетками / Л.Н. Тищенко, М.В. Пивень, В.В. Бредихин // Motrol. Motorization and power industry in agriculture. – Lublin, 2013. – Vol. 15, № 7. – P. 105-112.

4. Тищенко Л.Н. Экспериментальные исследования внутрислоевых процессов в зерновых смесях, сепарируемых цилиндрическими виброцентробежными решетками / Л.Н. Тищенко, М.В. Пивень // Механізація сільськогосподарського виробництва: Вісник ХНТУСГ. – Харків: ХНТУСГ, 2016. – Вип. 173. – С. 153-160.

5. Тищенко Л.Н. К применению методов механики сплошных сред для описания движения зерновых смесей на виброрешетах / Л.Н. Тищенко, С.О. Харченко // MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. – Lublin-Rzeszow, 2013. - Vol. 15, № 7. – P. 94-99.

6. Tishchenko L. Identification of a mixture of grain particle velocity through the holes of the



vibrating sieves grain separators / L. Tishchenko, S. Kharchenko, F. Kharchenko, V. Bredykhin, O. Tsurkan // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2016.- T.2.№7(80). – P.63-69.

7. Долгунин В.Н. Быстрые гравитационные течения зернистых материалов: техника измерения, закономерности, технологическое применение / В. Н. Долгунин, В. Я. Борщев. – М.: Машиностроение, 2005. – 73 с.

8. Ольшанський В.П. Математичні моделі зернопотоків по віброрешетах / В.П. Ольшанський, О.В. Ольшанський. – Харків: Міськдрук, 2016. – 140 с.

9. Абрамовиц А. Справочник по специальным функциям / А. Абрамовиц, И. Стиган. – М.: Наука, 1979. – 832 с.

10. Янке Е. Специальные функции / Е. Янке, Ф. Эмде, Ф. Лёш. – М.: Наука, 1977. – 344 с.

11. Градштейн И.С. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений / И.С. Градштейн, И.М. Рыжик. – М.: Наука, 1962. – 1100 с.

12. Тищенко Л. Н. Динамика виброцентробежной зерноочистки / Л.Н. Тищенко, В.П. Ольшанский, С.В. Ольшанский и др. – Харків : Міськдрук, 2013. – 440 с.

Список джерел у транслітерації

1. Pyven M.V. Obosnovanye parametrov protsessa reshetnoho sepyrovanyia zernovikh smesei: dys. ... kand. tekhn. nauk: 05.05.11 / M.V. Pyven. – Kharkov: KhNTUSH ym. P. Vasylenko, 2006. – 265 P.

2. Tyshchenko L.N. Modelyrovanye protsesov zernovikh separatorov / L.N. Tyshchenko, D.Y. Mazorenko i dr. – Kharkov: Miskdruk, 2010. – 360 P.

3. Tyshchenko L.N. Obosnovanye protsessa sehrehatsyy zernovikh smesei pry sepyrovanyu vybrotsentrobezhnomy reshetamy / L.N. Tyshchenko, M.V. Pyven, V.V. Bredykhin // Motrol. Motorization and power industry in agraculture. – Lublin, 2013. – Vol. 15, № 7. – P. 105-112.

4. Tyshchenko L.N. Eksperymentalnie yssledovanyia vnutryloevikh protsesov v zernovikh smesiakh, sepyruemikh tsylindrycheskymy vybrotsentrobezhnomy reshetamy / L.N. Tyshchenko, M.V. Pyven // Mekhanizatsiia silskohospodarskoho vyrobnytstva: Visnyk KhNTUSH. – Kharkiv: KhNTUSH, 2016. – Vyp. 173. – P. 153-160.

5. Tischenko L.N. K primeniyu metodov mehaniki sploshnyih sred dlya opisaniya dvizheniya zernovyih smesey na vibroreshetah / L.N. Tischenko, S.O. Kharchenko // MOTROL.

Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. – Lublin-Rzeszow, 2013. - Vol. 15, № 7. – P. 94-99.

6. Tishchenko L. Identification of a mixture of grain particle velocity through the holes of the vibrating sieves grain separators / L. Tishchenko, S. Kharchenko, F. Kharchenko, V. Bredykhin, O. Tsurkan // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2016.- T.2.№7(80). – P.63-69.

7. Dolhunyn V.N. Bistrie hravytatsyonnie techeniya zernystikh materyalov: tekhnika yzmerenyia, zakonornosty, tekhnolohycheskoe pryomenyie / V.N. Dolhunyn, V. Ia. Borshchev. – M.: Mashynostroenyie, 2005. – 73 P.

8. Olshanskiy V.P. Matematychni modeli zernopotokiv po vibroreshetakh / V.P. Olshanskiy, O.V. Olshanskiy. – Kharkiv: Miskdruk, 2016. – 140 P.

9. Abramovyts A. Spravochnyk po spetsyalnim funktsiyam / A. Abramovyts, Y. Styhan. – M.: Nauka, 1979. – 832 P.

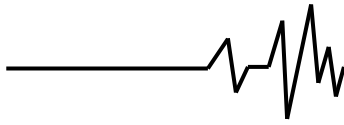
10. Yanke E. Spetsyalnie funktsyy / E. Yanke, F. Emde, F. Lesh. – M.: Nauka, 1977. – 344 P.

11. Hradshstein Y.S. Tablytsi yntehralov, summ, riadov y proyzvedenyi / Y.S. Hradshstein, Y.M. Rizhyk. – M.: Nauka, 1962. – 1100 P.

12. Tyshchenko L. N. Dynamyka vybrotsentrobezhnoi zernoochystky / L.N. Tyshchenko, V. P. Olshanskiy, S. V. Olshanskiy y dr. – Kharkiv : Miskdruk, 2013. – 440 P.

О ДИНАМИКЕ ЗЕРНОСМЕСИ ПЕРЕМЕННОЙ ПОРИСТОСТИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ВИБРОРЕШЕТЕ

Аннотация. На основе континуальной гидродинамической модели выведено замкнутые формулы для вычисления скорости зернопотока по поверхности вертикального цилиндрического решета виброцентрифуги, в предположении, что распределение плотности по толщине слоя мелкозернистой смеси зависит от скорости движения сыпучего материала. Составлено линейное дифференциальное уравнение типа Бесселя для скорости установившегося движения и построено его аналитическое решение в цилиндрических функциях нулевого индекса. Показано, что в граничном случае, без учета изменения пористости, выведенная формула переходит в известное выражение, полученное ранее в рамках гидродинамической модели для однородной виброоживленной смеси. Исследована возможность использования в инженерных расчетах также приближенного решения, полученного в результате упрощения дифференциального уравнения зернопотока.



На численних примерах исследовано влияние различных факторов на скорость движения смеси по решету и его производительность по сходовой фракции.

Ключевые слова: вертикальное цилиндрическое виброрешето, установившийся зернопоток, изменение пористости, дифференциальное уравнение, функции Бесселя.

ABOUT DYNAMICS OF GRAIN MIXTURE OF VARIABLE POROSITY IN THE CYLINDRICAL VIBROSIEVE

Summary. On the basis of continual hydrodynamic model it is removed the closed formulas for calculation of speed of grain stream on the surface of vertical cylindrical sieve of the vibrocentrifuge, in supposition, that distribution of closeness on the thickness of small particles

grainy mixture layer finely depends on the rate of movement of friable material. A linear differential equation of Bessel's type is comprised for the speed of the steady motion and his analytical solution in the cylindrical functions of zero index is built. It is shown that in border case, without accounting porosity change, the shown out formula passes to the well-known expression got before within the framework of hydrodynamic model for the homogeneous vibrofluidized mixture. Possibility of use in engineering calculations of also approximate decision received as a result of simplification of the differential equation of grain stream is investigated. On numerical examples, influence of various factors on the speed of the movement of mix on a sieve and its productivity on tails fraction is investigated.

Keywords: vertical cylindrical vibrosieve, established grain stream, porosity change, differential equation, Bessel's functions.

Відомості про авторів

Ольшанський Василь Павлович – д.ф.-м.н., професор кафедри теоретичної механіки та деталей машин Харківського національного університету сільського господарства.

Харченко Сергій Олександрович – кандидат технічних наук, доцент кафедри оптимізації технологічних систем імені Т.П. Євсюкова Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка (вул. Алчевських, 44, м. Харків, Україна, 61002, e-mail: kharchenko_mtf@ukr.net).

Ольшанский Василий Павлович – д.ф.-м.н., профессор кафедры теоретической механики и деталей машин Харьковского национального университета сельского хозяйства.

Харченко Сергей Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры оптимизации технологических систем имени Т.П. Евсюкова Харьковского национального технического университета сельского хозяйства имени Петра Василенко (ул. Алчевских, 44, г. Харьков, Украина, 61002, e-mail: kharchenko_mtf@ukr.net).

Olshansky Vasilii Pavlovich - Professor of the Department of Theoretical Mechanics and Machine Parts, Kharkiv National University of Agriculture, Dr. Sci. (Phys.-Math).

Kharchenko Serhii – Candidate of Technical Sciences, Lecturer of the Department of Technological Systems Optimization named after T. P. Evsyukov Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture (St. Alchevskih, 44, Kharkov, Ukraine, 61002, e-mail: kharchenko_mtf@ukr.net).