

Про рух неоднорідної зерноsumіші по вертикальному віброрешету

В.П. Ольшанський¹, М.В. Сліпченко²,
С.О. Харченко³, С.Й. Ковалишин⁴, А.С. Барсук⁵

^{1, 2, 3, 5} Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка (м.Харків, Україна)

⁴ Львівський національний аграрний університет (м.Львів, Україна)

email: ¹ OlshanskiyVP@gmail.com; ² Slipchenko_M@ukr.net;

³ kharchenko_mtf@ukr.net; ⁴ stkovalyshyn@gmail.com; ⁵ texncentr@gmail.com

⁴ ORCID: ¹ 0000-0003-1407-4476, ² 000-0002-9728-661X; ³ 0000-0002-4883-2565;

⁴ 0000-0002-7118-9360; ⁵ 0000-0001-7978-4407

Розроблено математичну гідродинамічну модель усталеного руху неоднорідної дрібнозернистої зерноsumіші по поверхні вертикального циліндричного віброрешета, в припущенні, що питома маса суміші залежить від швидкості її руху. Прийнята лінійна залежність пористості суміші від швидкості, коли більша пористість там, де більша швидкість руху. Визначення швидкості, як функції радіальної координати, зведено до розв'язування неоднорідного диференціального рівняння типу Бесселя. При заданих крайових умовах аналітичний розв'язок виражено через модифіковану функцію Бесселя та функцію Макдональда нульових індексів. Інтегруванням цього розв'язку одержано в циліндричних функціях формулу середньої швидкості сходової фракції на поверхні решета. Використовуючи асимптотичні подання спеціальних функцій при великих значеннях аргументів, виведено в елементарних функціях наближені формули швидкості зерно потоку, як кільцевого шару. Показано, що із виведених теоретичних залежностей, як окремих випадок, впливають відомі формули в гідродинамічній моделі для швидкості однорідного шару зерноsumіші. Наведено приклади розрахунків, в яких показано вплив зміни пористості на швидкість зернопотоку. Проведено порівняння і встановлено повну відповідність числових результатів, до яких призводять одержані аналітичні розв'язки та чисельне комп'ютерне інтегрування вихідного диференціального рівняння руху. Розроблена математична модель дає можливість враховувати залежність пористості зерноsumіші від її швидкості руху по вертикальному циліндричному віброрешету. Отримана залежність узагальнює одержані раніше теоретичні результати. Для розрахунку швидкості зерно потоку в реальних умовах можна використовувати виведені наближені асимптотичні формули, без обчислень циліндричних функцій великих аргументів.

Ключові слова: неоднорідна зерноsumіш, змінна пористість, вертикальне циліндричне віброрешето, кільцевий шар, швидкість зернопотоку, аналітичний розв'язок, функції Бесселя.

Вступ. Рух зернової суміші по поверхні циліндричного віброрешета являє собою складний фізичний процес. Його моделювання проводили різними способами. Одна з більш адекватних моделей є гідродинамічна модель. Встановлення швидкості зерноsumіші необхідно для визначення технологічних параметрів процесу сепарування та підвищення ефективності процесу.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Гідродинамічна модель усталеного руху однорідної зерноsumіші у вигляді кільцевого шару по вертикальному циліндричному віброрешету вперше була запропонована в [1, 2]. Узагальнення цієї теорії на випадок неоднорідної зерноsumіші проведено в [3, 4], де задавали різні залежності коефіцієнта кінематичної вібров'язкості від радіальної координати. Зокрема лінійну залежність коефіцієнта по товщині шару використано також в [5, 6] при моделюванні руху зерноsumіші по плоскому віброрешету.

Тут розглядаємо теоретичну модель в якій змінна не вібров'язкість, а пористість неоднорідної дрібнозернистої зерноsumіші, причому вона залежить від швидкості руху, яка в свою чергу залежить від радіальної координати. Модель такого типу для циліндричного віброрешета розроблена в [7]. Теорії руху суміші, в яких використана пряма залежність пористості зерноsumіші від однієї з просторових координат висвітлена також в [8-11].

Метою статті є отримання математичної моделі, що враховуватиме залежність пористості зерноsumіші від її швидкості руху по вертикальному циліндричному віброрешету. Для наближених обчислень, ставиться додаткова задача з отримання наближених асимптотичних формул.

Викладення основного матеріалу. Згідно з [1, 2], осереднена в часі за період коливань швидкість $u(r)$ усталеного руху кільцевого шару віброрешета визначається формулою:

$$u(r) = \frac{\rho g}{2\mu} \left(R_0^2 \ln \frac{r}{R} + \frac{R^2 - r^2}{2} \right). \quad (1)$$

Тут ρ – питома маса однорідної суміші; g – прискорення вільного падіння; μ – динамічний коефіцієнт вібров'язкості зерноsumіші; R_0 – радіус вільної поверхні кільцевого шару; R – радіус вертикального віброрешета; r – радіальна координата (рис. 1).

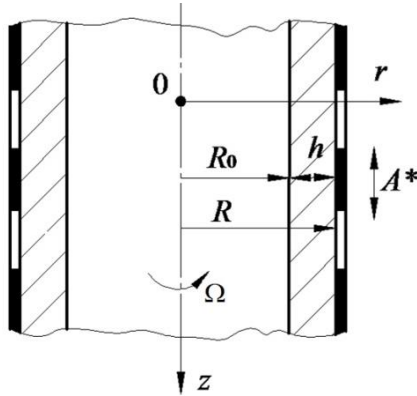


Рис. 1. Розрахункова схема

Формула (1) одержана внаслідок побудови розв'язку крайової задачі:

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

$$u(R) = 0; \quad \left. \frac{du}{dr} \right|_{r=R_0} = 0. \quad (3)$$

Узагальнюючи цю теорію, припустимо, що:

$$\rho = \rho_* (1 - \lambda \cdot u(r)), \quad (4)$$

де $\lambda > 0$ деяка стала; $\lambda \cdot u(R_0) < 1$; ρ_* – питома маса зерноsumіші в стані спокою.

Підстановкою (4) в (2), отримуємо більш загальне диференціальне рівняння:

$$\frac{d^2 u}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{du}{dr} - \gamma^2 u = -\frac{\gamma^2}{\lambda}; \quad (5)$$

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

Рівняння (5) має загальний розв'язок:

$$u(r) = \frac{1}{\lambda} + C_1 I_0(\gamma r) + C_2 K_0(\gamma r), \quad (6)$$

де C_1, C_2 – довільні сталі; $I_0(\gamma r), K_0(\gamma r)$ – відповідно модифікована функція Бесселя і функція Макдональда нульових індексів.

Для визначення сталих використовуємо крайові умови (3). Підстановкою (6) в (3) отримуємо систему:

$$\begin{aligned} C_1 I_1(\gamma R_0) - C_2 K_1(\gamma R_0) &= 0; \\ C_1 I_0(\gamma R) + C_2 K_0(\gamma R) &= -\frac{1}{\lambda}. \end{aligned} \quad (7)$$

Тут $I_1(\gamma R_0), K_1(\gamma R_0)$ – відповідно модифікована функція Бесселя і функція Макдональда індексів одиниця.

При записі (7) враховано, що [12]:

$$\frac{d}{dz} I_0(z) = I_1(z); \quad \frac{d}{dz} K_0(z) = -K_1(z).$$

Розв'язавши систему (7), одержуємо:

$$\begin{aligned} C_1 &= -\frac{1}{\lambda} \cdot \frac{K_1(\gamma R_0)}{\Delta(R, R_0)}; \\ C_2 &= -\frac{1}{\lambda} \cdot \frac{I_1(\gamma R_0)}{\Delta(R, R_0)} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\Delta(R, R_0) = I_1(\gamma R_0) \cdot K_0(\gamma R) + I_0(\gamma R) \cdot K_1(\gamma R_0).$$

Таким чином, швидкість зернопотоку визначається виразами (6), (8). При цьому динамічний коефіцієнт вібров'язкості суміші μ залежить від амплітуди і частоти коливань решета, а також від параметрів зерноsumіші [2, 4, 13].

Найбільше значення швидкості шар має при $r = R_0$. Для неї:

$$u(R_0) = \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda \Delta(R, R_0)} \times [K_1(\gamma R_0) \cdot I_0(\gamma R_0) + I_1(\gamma R_0) \cdot K_0(\gamma R_0)].$$

Цей вираз можна спростити, бо в [14]:

$$K_1(\gamma R_0) \cdot I_0(\gamma R_0) + I_1(\gamma R_0) \cdot K_0(\gamma R_0) = \frac{1}{\gamma R_0}$$

Тому:

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

Для оцінки продуктивності віброрешета по сходовій фракції іноді використовують середнє значення швидкості [2]:

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

бо об'ємна продуктивність його становить

$$Q = \pi(R^2 - R_0^2) u_{cp}.$$

Формула (9), з урахуванням (6) набуває вигляд:

$$u_{cp} = \frac{1}{\lambda} + \frac{2}{R^2 - R_0^2} \times \left[C_1 \int_{R_0}^R r I_0(\gamma r) dr + C_2 \int_{R_0}^R r K_0(\gamma r) dr \right].$$

Далі приймемо до уваги, що [12]:

$$\begin{aligned} \int_0^1 z I_0(az) dz &= \frac{1}{a} I_1(a); \\ \int_0^1 z K_0(az) dz &= \frac{1}{a^2} - \frac{1}{a} K_1(a). \end{aligned}$$

Тоді

$$u_{cp} = \frac{1}{\lambda} + \frac{2}{\gamma(R^2 - R_0^2)} \times \{ C_1[R \cdot I_1(\gamma R) - R_0 \cdot I_1(\gamma R_0)] + \} \\ \times \{ + C_2[R_0 \cdot K_1(\gamma R_0) - R \cdot K_1(\gamma R)] \}$$

або з урахуванням (8):

$$u_{cp} = \frac{1}{\lambda} - \frac{2R}{\lambda \gamma (R^2 - R_0^2) \Delta(R, R_0)} \times \\ \times [I_1(\gamma R) K_1(\gamma R_0) - I_1(\gamma R_0) K_1(\gamma R)] \quad (10)$$

Оскільки циліндричні функції відносяться до затабульованих, то їх таблиці [14, 15] можна використовувати в розрахунках швидкості зернопотоку. Але з малими похибками для великих значень аргументів, що відповідає реальним умовам сепарування, простіше задіяти асимптотичні наближення:

$$I_0(\gamma R) \approx \frac{e^{\gamma R}}{\sqrt{2\pi\gamma R}} \left(1 + \frac{1}{8\gamma R}\right); \quad (11) \\ I_1(\gamma R_0) \approx \frac{e^{\gamma R_0}}{\sqrt{2\pi\gamma R_0}} \left(1 - \frac{3}{8\gamma R_0}\right); \\ K_0(\gamma R) \approx \frac{\sqrt{\pi} e^{-\gamma R}}{\sqrt{2\gamma R}} \left(1 - \frac{1}{8\gamma R}\right); \\ K_1(\gamma R_0) \approx \frac{\sqrt{\pi} e^{-\gamma R_0}}{\sqrt{2\gamma R_0}} \left(1 + \frac{3}{8\gamma R_0}\right).$$

Щоб мати інформацію про похибки цих формул, коли аргументи циліндричних функцій дорівнюють трьом, наводимо умовно точні, взяті з таблиць в [14], значення функції Бесселя і наближені (в дужках) значення, обчислені за формулами (11):

$$I_0(3) = 4,88079(4,81905); \\ I_1(3) = 3,95337(4,04800); \\ K_0(3) = 0,03474(0,03453); \\ K(3) = 0,04016(0,04053)$$

яка є в [2, 4].

Числові результати. Для проведення розрахунків приймаємо: $\rho_* = 750 \text{ кг/м}^3$; $\mu = 0,4 \text{ Па} \cdot \text{с}$; $R = 0,3075 \text{ м}$; $R_0 = 0,2995 \text{ м}$ і різні значення $\lambda = 0,1; 0,5; 0,9 \text{ с/м}$.

Одержані двома способами значення швидкості зернопотоку при $\lambda = 0,1 \text{ с/м}$ записано в табл. 1.

Розбіжності результатів розрахунку за формулами (6), (8) і (12) невеликі, тобто асимптотичні наближення забезпечують досить високу точність.

Інформація про вплив коефіцієнта λ на швидкість зернопотоку надана в табл. 2.

Як бачимо, при збільшенні коефіцієнта λ зменшується швидкість потоку по решету.

Це підтверджують і профілі швидкості, одержані чисельним інтегруванням диференціального рівняння (5) на комп'ютері. Вони подані на рис. 2.

Таблиця 1. Швидкості руху при $\lambda = 0,1 \text{ с/м}$ і різних r

10r, м	Форм. (6)	Форм. (12)	10r, м	Форм. (6)	Форм. (12)
	Значення 10u(r), м/с			Значення 10u(r), м/с	
2,995	5,5641	5,5632	3,035	4,1773	4,1768
3,005	5,4774	5,4766	3,045	3,3965	3,3962
3,015	5,2173	5,2166	3,055	2,4409	2,4407
3,025	4,7840	4,7834	3,065	1,3092	1,3091

Таблиця 2. Швидкості руху при $\lambda = 0,5$ і $\lambda = 0,9 \text{ с/м}$

10r, м	$\lambda = 0,5$ с/м	$\lambda = 0,9$ с/м	10r, м	$\lambda = 0,5$ с/м	$\lambda = 0,9$ с/м
	Значення 10u(r), м/с			Значення 10u(r), м/с	
2,995	4,6896	4,0477	3,035	3,5543	3,0957
3,005	4,6192	3,9893	3,045	2,9054	2,5434
3,015	4,4077	3,8131	3,055	2,1015	1,8511
3,025	4,0537	3,5168	3,065	1,1359	1,0078

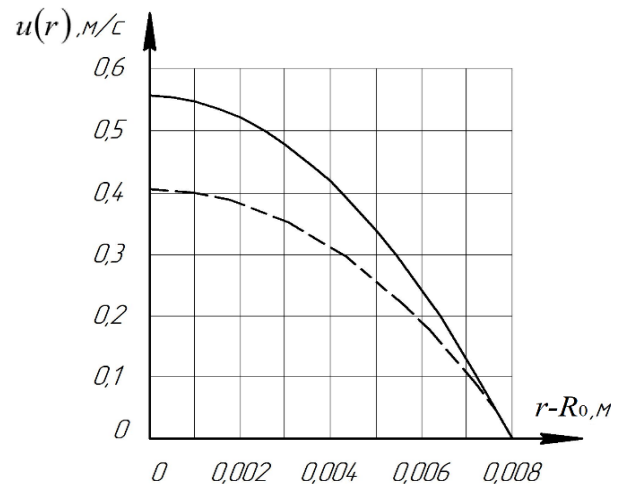


Рис. 2. Графік $u(r)$: — $\lambda = 0,1 \text{ с/м}$; - - - $\lambda = 0,9 \text{ с/м}$;

Спостерігаємо повну відповідність результатів, одержаних різними методами: за допомогою аналітичних розв'язків в таблицях і чисельним методом на рис. 2.

Про похибки формули (12) для u_{cp} надана інформація в табл. 3.

Таблиця 3. Значення u_{cp} при різних λ

10λ, с/м	1	5	9
10u _{cp} , м/с	3,70	3,14	2,73
	3,59	3,14	2,73

Результати в чисельниках одержано за формулою (10), а в знаменниках – за формулою (12). Точність асимптотичної формули (12) підвищується при збільшенні λ .

Висновки. Розроблена математична модель дає можливість враховувати залежність порис-

тості зерноsumіші від її швидкості руху по вертикальному циліндричному віброрешету. Вона узагальнює одержані раніше теоретичні результати. Для розрахунку швидкості зернопотоку в реальних умовах можна використовувати виведені наближені асимптотичні формули, без обчислень циліндричних функцій великих аргументів. Порівняння числових результатів, одержаних різними методами, підтвердило адекватність запропонованих аналітичних розв'язків.

Література:

1. Тищенко Л.Н. К определению гидродинамических характеристик псевдооживленных сыпучих сред при работе виброцентробежных сепараторов. Экология и с.х. техника. 2001. Т.1. С. 70-73.
2. Тищенко Л. Н. Интенсификация сепарирования зерна. Харьков : Основа, 2004. 224 с.
3. Моделирование процессов зерновых сепараторов / Л.Н. Тищенко и др. Харьков : Мисьдрук, 2010. 360 с.
4. Динамика виброцентробежной зерноочистки /Л.Н. Тищенко и др. Харьков: Мисьдрук, 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. Тищенко Л.Н., Ольшанский В.П., Ольшанский С.В. Колебания зерновых потоков на виброрешетах. Харьков : Мисьдрук, 2012. 267 с.
7. Ольшанський В. П., Харченко С. О. Про динаміку зерноsumіші змінної пористості в циліндричному віброрешеті. Вібрації в техніці та технології. 2018. № 1 (88). С. 60-67.
8. Пивень М. В. Исследование процесса сегрегации зерновой смеси при виброцентробежном сепарировании. Вибрации в технике и технологиях. 2004. № 4 (36). С. 23-26.
9. Тищенко Л. Н., Пивень М. В. К исследованию движения зерновой смеси на решете под действием вибраций. Науковий вісник НАУ. 2002. Вип. 49. С. 329-336.
10. Тищенко Л. Н., Пивень М. К исследованию движения зерновой смеси по внутренней оребренной поверхности цилиндрического виброцентробежного решета. Вибрации в технике и технологиях. 2003. № 6 (32). С. 23-26.
11. Тищенко Л. М., Ольшанський В. П., Харченко С. О., Харченко Ф. М. Моделирование динамики зерновой смеси при сепарировании на рифленом решете вибросепаратора. Інженерія природокористування. 2014. 2(2). С. 54-60.
12. Градштейн И.С., Рыжик И.М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. Москва : Наука, 1962. 1100 с.
13. Тищенко Л.Н., Ольшанский В.П., Абдуева Ф.М. Сравнение двух способов вычисления коэффициента вибровязкости псевдооживленной зерновой смеси при виброцентробежном сепарировании. Вибрации в технике и технологиях. 2008. № 1 (50). С. 96-100.

14. Абрамовиц М., Стиган И. Справочник по специальным функциям (с формулами, графиками и математическими таблицами). Москва : Наука, 1979. 832 с.

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

References:

1. Tishchenko, L.N. (2001) K opredeleniju gidrodinamicheskikh karakteristik psevdoozhivennykh sypuchih sred pri rabote vibrocentrobeznykh separatorov. Ekologija i s.h. tehnika. 1, 70-73.
2. Tishchenko, L.N. (2004) Intensifikacija separirovaniya zerna. Kharkov : Osнова.
3. Tishchenko, L.N., Mazorenko, D.I., Piven, M.V., Kharchenko, S.A., Bredixin V.V., & Mandryka A.V. (2010) Modelirovanie processov zernovykh separatorov. Kharkov, Miskdruk
4. Tishchenko, L.N., Olshanskiy, V.P., Olshanskiy, S.V., Kharchenko, F.M., & Slipchenko, M.V. (2013) Dinamika vibrocentrobeznoy zernoochistki. Kharkov, Miskdruk.
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. Tishchenko, L.N., Olshanskiy, V.P., & Olshanskiy, S.V. (2012). Kolebanija zernovykh potokov na vibroreshetah. Kharkov, Miskdruk.
7. Olshanskiy, V.P., & Kharchenko, S.A. (2018) Pro dynamiku zernosumishi zminnoi' porystosti v cylindrychnomu vibroresheti. Vibracii v tehnicі ta tehnologijah. 1 (88), 60-67.
8. Piven, M.V. (2004) Issledovanie processa segregacii zernovoy smesi pri vibrocentrobeznom separirovanii. Vibracii v tehnicі i tehnologijah. 4 (36), 23-26.
9. Tishchenko, L.N., & Piven, M.V. (2003). K issledovaniju dvizhenija zernovoy smesi na reshete pod dejstviem vibracij. Naukovij visnik NAU. 49, 329-336.
10. Tishchenko, L.N., & Piven, M.V. (2002). K issledovaniju dvizhenija zernovoy smesi po vnutrennej orebrennoj poverhnosti cilindricheskogo vibrocentrobeznoy resheta. Vibracii v tehnicі i tehnologijah. 6(32), 23-26.
10. Tishchenko, L.N., Olshanskiy, V.P., Kharchenko, S.A. & Kharchenko, F.M. (2014) Modelirovanie dinamiki zernovoy smesi pri separirovanii na riflenom reshete vibroseparatora. Inzhenerija pryrodokorystuvannja. 2(2), 54-60.
12. Gradshtejn, I.S., & Ryzhik, I.M. (1962) Tablicy integralov, summ, rjadov i proizvedenij. Moskva, Nauka
13. Tishchenko, L.N., Olshanskiy, V.P., & Abdueva, F.M. (2008) Sravnenie dvuh sposobov vychislenija koeficienta vibrovjazkosti psevdoozhivlennoj zernovoy smesi pri vibrocentrobeznom separirovanii. Vibracii v tehnicі i tehnologijah. 1 (50), 96-100.
14. Abramovic, M., & Stigan. I. (1979) Spravochnik po specialnym funkcijam (s formulami, grafikami i matematicheskimi tablicami). Moskva, Nauka.
15. Janke, E., Jemde, F., & Ljosh, F. (1977) Specialnye funkcii. Moskva, Nauka.

Аннотация

О движении неоднородной зерносмеси по вертикальному виброрешету

В.П. Ольшанский, М.В. Слипченко, С.А. Харченко, С.Й. Ковалишин, А.С. Барсук

Разработана математическая гидродинамическая модель установившегося движения неоднородной мелкозернистой зерносмеси по поверхности вертикального цилиндрического виброрешета, в предположении, что удельная масса смеси зависит от скорости ее движения. Принята линейная зависимость пористости смеси от скорости, когда больше пористость там, где большая скорость движения. Определение скорости, как функции радиальной координаты, сведено к решению неоднородного дифференциального уравнения типа Бесселя. При заданных граничных условиях аналитическое решение выражено через модифицированную функцию Бесселя и функцию Макдональда нулевых индексов. Интегрированием этого уравнения получено в цилиндрических функциях формулу средней скорости сходовой фракции на поверхности решета. Используя асимптотические представления специальных функций при больших значениях аргументов, выведено в элементарных функциях приближенные формулы скорости зернопотока, как кольцевого слоя. Показано, что из выведенных теоретических зависимостей, как частный случай, следуют известные формулы в гидродинамической модели для скорости однородного слоя зерносмеси. Приведены примеры расчетов, в которых показано влияние изменения пористости на скорость зернопотока. Проведено сравнение и установлено полное соответствие численных результатов, к которым приводят полученные аналитические решения и численное компьютерное интегрирование исходного дифференциального уравнения движения. Разработанная математическая модель позволяет учитывать зависимость пористости зерносмеси от ее скорости движения по вертикальному цилиндрическому виброрешету. Полученная зависимость обобщает полученные ранее теоретические результаты. Для расчета скорости зернопотока в реальных условиях можно использовать выведенные приближенные асимптотические формулы, без вычислений цилиндрических функций больших аргументов.

Ключевые слова: *неоднородная зерносмесь, переменная пористость, вертикальное цилиндрическое виброрешето, кольцевой слой, скорость зернопотока, аналитическое решение, функции Бесселя.*

Abstract

About motion of inhomogeneous grain mixture on vertical vibrosieve

V.P. Olshanskiy, M.V. Slipchenko, S.O. Kharchenko, S.Y. Kovalyshyn, A.S. Barsuk

A mathematical hydrodynamic model has been developed for the steady motion of an inhomogeneous fine-grained grain mixture on the surface of a vertical cylindrical vibrating sieve, under the assumption that the specific gravity of the mixture depends on the velocity of its movement. A linear dependence of the porosity of the mixture from the velocity is accepted when the porosity is higher where the velocity of movement is higher. Determining the velocity as a function of the radial coordinate is reduced to solving an inhomogeneous differential equation of the Bessel type. For the given boundary conditions, the analytical solution is expressed in terms of the modification Bessel function and the Macdonald function of zero indices. By integrating this equation, a formula for the average velocity of the throw out fraction on the sieve surface is obtained in cylindrical functions. Using asymptotic representations of special functions for large values of the arguments, approximate formulas for the velocity of a grain of a flow, as an annular layer, are derived in elementary functions. It is shown that the derived theoretical dependences, as a special case, follow the well-known formulas in the hydrodynamic model for the velocity of a homogeneous layer of a grain mixture. Examples of calculations are given, in which the influence of changes in porosity on the grain flow rate is shown. A comparison is carried out and full correspondence is established between the numerical results, to which the obtained analytical solutions and numerical computer integration of the output differential equation of motion. The developed mathematical model makes it possible to take into account the dependence of the porosity of a grain mixture on its velocity of movement along a vertical cylindrical vibrating sieve. The resulting dependence generalizes the previously obtained theoretical results. To calculate the grain flow velocity in real conditions, one can use the derived approximate asymptotic formulas, without calculating the cylindrical functions of large arguments.

Keywords: *inhomogeneous grain mixture, variable porosity, vertical cylindrical vibrating sieve, annular layer, grain flow rate, analytical solution, Bessel functions.*

Бібліографічне посилання/ Bibliography citation: Harvard

Olshanskiy, V. P. et al. (2021) 'About motion of inhomogeneous grain mixture on vertical vibrosieve', *Engineering of nature management*, (2(20)), pp. 27 - 31.

Подано до редакції / Received: 12.03.2021