

Тіщенко Л. М.

Ольшанський В. П.

Ольшанський С. В.

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

Tishchenko L. N.

Olshanskii V. P.

Olshanskii S. V.

*Kharkiv Petro Vasylenko
National Technical
University of Agriculture*

УДК 631.362:532

ПРО РУХ ПО РЕШЕТУ ВІБРОРОЗРІЖЕНИХ ЗЕРНОВИХ СУМІШЕЙ З ВНУТРІШНІМ В'ЯЗКО-СУХИМ ТЕРТЯМ

Розглянуто усталений рух шару сепарованої суміші по нахиленому плоскому віброрешету при спільній дії дотичних внутрішніх сил в'язкого та сухого тертя. Виведено компактні формули для обчислення швидкості потоку суміші та об'ємної продуктивності віброрешета. Запропоновано способи ідентифікації значень коефіцієнтів вібров'язкості та коефіцієнта залишкового внутрішнього сухого тертя за результатами експериментального вимірювання кінематичних параметрів потоку суміші.

Ключові слова: зернова суміш, сепарування, плоске віброрешето, розрахункові формули, швидкість потоку, продуктивність, ідентифікація коефіцієнтів.

Вступ. У поширених гідродинамічних моделях руху зернових сумішей по поверхнях решіт припускають, що в умовах механічних коливань сипке середовище повністю набуває ті властивості, що має в'язка рідина. Тому для опису руху вібророзділювачів на решеті сумішей використовують рівняння гідродинаміки в'язкої нестисливої рідини [1-4]. Але не в любых умовах вібрації можна досягти повного вібророзділення сипкого середовища, тобто повністю позбавити його внутрішніх сил сухого тертя, які воно мало в стані спокою. Тому є сенс розробити квазігідродинамічні моделі руху сепарованих сумішей при неповному вібророзділенні, в умовах спільної дії дотичних сил внутрішнього в'язкого й сухого тертя. Про одну з найпростіших теорій такого типу йде мова в даній статті.

Метою роботи є розробка моделі усталеного руху шару зернової суміші по нахиленому плоскому віброрешету, яка узагальнює відомі гідродинамічні теорії додатковим урахуванням дії сили залишкового внутрішнього сухого тертя. Ставиться також задача ідентифікації двох реологічних параметрів моделі за результатами вимірювання кінематичних характеристик потоку суміші.

Основна частина роботи.

Дотримуючись [2, 3], припускаємо, що рухомий шар суміші має сталу товщину h , а профіль швидкості потоку в напрямі вісі ox залежить лише від поперечної координати y , як показано на рисунку.

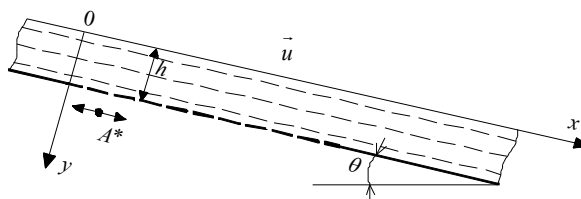
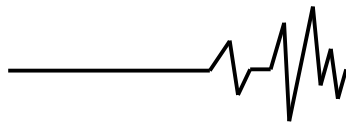


Рис. 1. Розрахункова схема руху зернової суміші по решету

Дотичне напруження в суміші визначаємо диференціальним рівнянням:

$$\frac{d\tau}{dy} = -\rho g \sin \theta, \quad (1)$$

у якому ρ – питома маса суміші; g – прискорення вільного падіння; θ – кут нахилу решета до горизонту.



Враховуючи відсутність напруження на вільній поверхні суміші $y = 0$, інтегруванням (1) отримуємо:

$$\tau = -\rho g \sin \theta \cdot y. \quad (2)$$

Зв'язок дотичного напруження зі швидкістю потоку $u = u(y)$ подаємо у вигляді:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} - f \cdot p \cdot \text{sign}(u). \quad (3)$$

Тут μ – коефіцієнт вібров'язкості суміші; f – коефіцієнт залишкового сухого тертя; p – внутрішній надлишковий тиск в суміші.

Останній лінійно залежить від y [2, 3]:

$$p = \rho g \cos \theta \cdot y. \quad (4)$$

Оскільки $u \geq 0$; $\frac{du}{dy} < 0$, використовуючи

вирази (2-4), приходимо до диференціального рівняння:

$$\frac{du}{dy} = -\frac{\rho g}{\mu} (\sin \theta - f \cdot \cos \theta) \cdot y. \quad (5)$$

При цьому вважаємо, що $\sin \theta - f \cdot \cos \theta > 0$.

Проінтегрувавши (5), при граничній умові $u(h) = 0$, одержуємо:

$$u(y) = \frac{\rho g}{2\mu} (\sin \theta - f \cdot \cos \theta) \cdot (h^2 - y^2). \quad (6)$$

Такому розподілу швидкості відповідає наступна об'ємна продуктивність решета Q з шириною перфорованої частини H :

$$Q = H \int_0^h u(y) dy = \frac{\rho g H h^3}{3\mu} (\sin \theta - f \cdot \cos \theta). \quad (7)$$

Середня швидкість потоку суміші становить:

$$u_{cp} = \frac{Q}{Hh} = \frac{\rho g h^2}{3\mu} (\sin \theta - f \cdot \cos \theta) = \frac{2}{3} u_{\max},$$

бо згідно з (6):

$$u_{\max} = u(0) = \frac{\rho g h^2}{2\mu} (\sin \theta - f \cdot \cos \theta). \quad (8)$$

Розрахункові формули децю ускладнюються, якщо (5) проінтегрувати при граничній умові:

$$\lambda_1 u(h) + \lambda_2 = -\tau(h),$$

де $\lambda_1, \lambda_2 = \text{const}$.

Тоді:

$$u(y) = \frac{\rho g}{2\mu} (\sin \theta - f \cdot \cos \theta) \cdot (h^2 - y^2) + \frac{\rho g h}{\lambda_1} \sin \theta - \frac{\lambda_2}{\lambda_1}; \quad (9)$$

$$Q = \frac{\rho g H}{3\mu} (\sin \theta - f \cdot \cos \theta) \cdot h^3 + \frac{hH}{\lambda_1} (\rho g h \sin \theta - \lambda_2).$$

Формули для обчислення сталих λ_1, λ_2 надруковано в [2, 3]

При $\lambda_1 = \infty$ вирази (9) переходять відповідно в (6) і (7).

Щоб отримати інформацію про величини реологічних сталих μ і f , побудуємо розв'язок оберненої задачі. Нехай за даними вимірювань при куті нахилу решета $\theta = \theta_1$ одержано значення $h = h_1$; $u(0) = u_1$, а при куті нахилу $\theta = \theta_2$ – $h = h_2$; $u(0) = u_2$. Тоді, використовуючи (8), запишемо два рівняння:

$$\frac{2u_1}{\rho g h_1^2} \mu + \cos \theta_1 \cdot f = \sin \theta_1,$$

$$\frac{2u_2}{\rho g h_2^2} \mu + \cos \theta_2 \cdot f = \sin \theta_2.$$

Ця система має розв'язок:

$$\mu = \frac{\rho g}{2} \frac{\sin(\theta_1 - \theta_2)}{v_1 \cos \theta_2 - v_2 \cos \theta_1}; \quad (10)$$

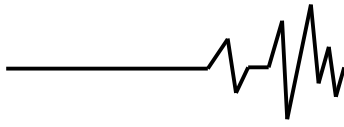
$$f = \frac{v_1 \sin \theta_2 - v_2 \sin \theta_1}{v_1 \cos \theta_2 - v_2 \cos \theta_1},$$

де $v_1 = u_1 / h_1^2$; $v_2 = u_2 / h_2^2$.

При проведенні ідентифікації значень μ і f можна, замість $u(0)$, вимірювати об'ємну продуктивність решета Q . Нехай при $\theta = \theta_1$ вона дорівнює Q_1 , а при $\theta = \theta_2$ – дорівнює Q_2 . За цими даними із (7) одержуємо систему:

$$\frac{3Q_1}{\rho g H h_1^3} \mu + f \cdot \cos \theta_1 = \sin \theta_1,$$

$$\frac{3Q_2}{\rho g H h_2^3} \mu + f \cdot \cos \theta_2 = \sin \theta_2,$$



що має розв'язок:

$$\mu = \frac{\rho g}{3} \frac{\sin(\theta_1 - \theta_2)}{\omega_1 \cos \theta_2 - \omega_2 \cos \theta_1}; \quad (11)$$

$$f = \frac{\omega_1 \sin \theta_2 - \omega_2 \sin \theta_1}{\omega_1 \cos \theta_2 - \omega_2 \cos \theta_1}.$$

Тут $\omega_1 = Q_1 / (Hh_1^3)$; $\omega_2 = Q_2 / (Hh_2^3)$.

Отже, для обчислень значень μ і f можна використовувати формули (10) або (11).

З метою аналізу впливу значень реологічних сталих на розрахункові $u(0)$ і Q проведено обчислення цих величин по формулах (7), (8) при $\rho = 750 \text{ кг/м}^3$; $\theta = 7^\circ$; $h = 0,008 \text{ м}$ та різних μ і f . Одержані результати записано в табл. 1 і табл. 2.

Таблиця 1

Максимальні швидкості потоку

μ , Па·с	$f = 0$	$f = 0,02$	$f = 0,04$	$f = 0,06$	$f = 0,08$
	Значення $10u(0)$, м/с				
0,05	5,74	4,80	3,87	2,93	2,00
0,06	4,78	4,00	3,22	2,45	1,67
0,07	4,10	3,43	2,76	2,10	1,43
0,08	3,59	3,00	2,42	1,83	1,25
0,09	3,19	2,67	2,15	1,63	1,11

Таблиця 2

Продуктивність решета одиначної ширини

μ , Па·с	$f = 0$	$f = 0,02$	$f = 0,04$	$f = 0,06$	$f = 0,08$
	Значення $10^3 Q / H$, м ² /с				
0,05	3,061	2,562	2,064	1,565	1,066
0,06	2,550	2,135	1,720	1,304	0,889
0,07	2,186	1,830	1,474	1,118	0,762
0,08	1,913	1,601	1,290	0,978	0,667
0,09	1,700	1,423	1,146	0,869	0,592

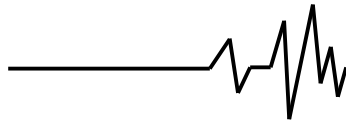
Як бачимо, обидві реологічні сталі суттєво впливають на кінематичні характеристики потоку. При збільшенні залишкового сухого внутрішнього тертя зменшуються швидкість потоку і об'ємна продуктивність решета.

Далі розглянемо приклади ідентифікації реологічних сталей.

Приклад 1. Питому масу суміші ρ приймаємо рівною 750 кг/м^3 . Нехай за даними вимірювань, при $\theta = \theta_1 = 6^\circ$; $h = h_1 = 0,008 \text{ м}$; $u(0) = u_1 = 0,14 \text{ м/с}$; а при $\theta = \theta_2 = 9^\circ$; $h = h_2 = 0,007 \text{ м}$; $u(0) = u_2 = 0,21 \text{ м/с}$. Підставивши ці дані в формули (10) знаходимо:

$\mu \approx 0,0916 \text{ Па·с}$; $f \approx 0,0503$. Точність одержаних результатів ідентифікації перевіряємо підстановкою їх в (8). Одержуємо: $u_1 \approx 0,1401 \text{ м/с}$; $u_2 \approx 0,2101 \text{ м/с}$, що підтверджує високу точність реалізації розв'язку оберненої задачі.

Приклад 2. Нехай за даними вимірювань, при $\theta = \theta_1 = 6^\circ$; $h = h_1 = 0,008 \text{ м}$; $Q/H = Q_1/H = 7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$; а при $\theta = \theta_2 = 9^\circ$; $h = h_2 = 0,007 \text{ м}$; $Q/H = Q_2/H = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$. Для цих вихідних даних по формулах (11) знаходимо:



$\mu \approx 0,0829$ Па·с; $f \approx 0,0587$. Підстановка ідентифікованих значень в (7) дає: $Q_1 / H \approx 6,99 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$; $Q_2 / H \approx 9,99 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$, що близько до тих значень продуктивності, які використали для ідентифікації.

Висновки:

1. Запропонований варіант теорії дає можливість досить просто врахувати наявність залишкових сил сухого тертя при русі сепарованої суміші, як частково вібророзрідженого сипкого середовища, по нахиленому плоскому решету.

2. Одержаний аналітичний розв'язок оберненої задачі можна використовувати для ідентифікації двох реологічних констант, щоб поліпшити адекватність математичної моделі.

Список використаних джерел

1. Тищенко Л.Н. Интенсификация сепарирования зерна / Л.Н. Тищенко. – Харьков: Основа, 2004. – 224 с.

2. Тищенко Л. Н. Гидродинамика сепарирования зерна / Л. Н. Тищенко, В. П. Ольшанский, С. В. Ольшанский. – Харків : Міськдрук, 2010. – 174 с.

3. Тищенко Л. Н. Виброрешетная сепарация зерновых смесей / Л. Н. Тищенко, В. П. Ольшанский, С. В. Ольшанский. – Харків : Міськдрук, 2011. – 280 с.

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

Список джерел в транслітерації

1. Tischenko L.N. Intensifikatsiya separirovaniya zerna / L.N. Tischenko. – Harkov: Osнова, 2004. – 224 s.

2. Tischenko L. N. Gidrodinamika separirovaniya zerna / L. N. Tischenko, V. P. Olshanskiy, S. V. Olshanskiy. – Harklv : Mlskdruk, 2010. – 174 s.

3. Tischenko L. N. Vibroreshetnaya separatsiya zernovyih smesey / L. N. Tischenko, V. P. Olshanskiy, S. V. Olshanskiy. – Harklv : Mlskdruk, 2011. – 280 s.

4. Tischenko L. N. Dinamika vibro-tsentrobeznoy zernoochistki / L. N. Tischenko, V. P. Olshanskiy, S. V. Olshanskiy i dr. – Harklv : Mlskdruk, 2013. – 440 s.

О ДВИЖЕНИИ ПО РЕШЕТУ ВИБРООЖИЖЕННЫХ ЗЕРНОВЫХ СМЕСЕЙ С ВНУТРЕННИМ ВЯЗКО-СУХИМ ТРЕНИЕМ

Аннотация. Рассмотрено установившееся движение слоя сепарированной смеси по наклонному плоскому виброрешету при совместном действии касательных внутренних сил вязкого и сухого трения. Выведены компактные формулы для вычисления скорости потока смеси и объемной производительности виброрешета. Предложено способы идентификации значений коэффициента вибровязкости и коэффициента остаточного внутреннего сухого трения по результатам экспериментальных измерений кинематических параметров потока смеси.

Ключевые слова: зерновая смесь, сепарирование, плоское виброрешето, расчетные формулы, скорость потока, производительность, идентификация коэффициентов.

FLOW IN THE SIEVE VIBRO-LIQUEFIED GRAIN MIXES WITH INTERNAL VISCOUS-DRY FRICTION

Annotation. The steady motion of a layer of separated mixture on the inclined plane vibrating screen under the joint action of tangential internal forces of viscous and dry friction were considered. The compact formulas to calculate the flow rate of the mixture and the volumetric productivity of the vibrating screen were derived. The methods for identifying the vibrating viscosity index and coefficient of residual domestic dry friction on the basis of the results of experimental measurements of the kinematic parameters of the mixture flow were proposed.

Key words: grain mixture, separation, flat vibrating screen, formulas, flow rate, efficiency, identification of the coefficients.