

Переробка та зберігання сільськогосподарської продукції
Processing and storage of agricultural products

УДК 631.362:53

Определение абсолютных компонент скоростей
пузырьковой псевдооживленной зерновой смеси при движении по
цилиндрическим решетам виброцентробежных сепараторов

С.А. Харченко, Л.Н. Тищенко

*Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства
им. П. Василенко (г. Харьков, Украина)*

Эффективная реализация математического аппарата для моделирования динамики движущихся зерновых смесей по виброрешетам стала возможным вследствие применения аналогии с движением вязкой несжимаемой жидкости. Построенная теория осесимметрических движений кольцевого зернового слоя внутри цилиндрического виброрешета, совершающего равномерное вращательное движение вокруг вертикальной оси и продольные гармонические колебания требует дополнения и уточнения. В статье получены математические выражения для абсолютных компонент скоростей пузырьковой псевдооживленной смеси, которая моделирует динамику зерновой смеси по цилиндрическим решетам виброцентробежных сепараторов. Построенное осесимметричное решение начально-краевой задачи предполагает использование модифицированных бесселевых функций и функций Кельвина и имеет достаточно сложный вид. Определение этих функций требует применения соответствующих алгоритмов и программных сред. Полученные приближенные выражения для определения поля абсолютной скорости для установившегося режима движения слоя пузырьковой смеси. Полученные в результате развития теории выражения для компонент относительной скорости установившегося движения кольцевого зернового слоя позволяют управлять качеством и производительностью процессов просеивания на цилиндрических виброрешетах. Выражения могут быть использованы при моделировании процессов в вибрационных центробежных сепараторах как в установившемся, так и переходном режимах движения ЗС.

Ключевые слова: просеивание, сепарация, решето, эффективность.

Постановка проблемы. Разработанная модель динамики пузырьковой псевдооживленной смеси (ППС), моделирующей движение зерновой смеси (ЗС) по плоским структурным виброрешетам показала свою адекватность и работоспособность [1- 8]. Эффективная реализация математического аппарата для моделирования динамики движущихся ЗС по виброрешетам стала возможным из-за применения аналогии между движением вязкой несжимаемой жидкости и ЗС [9 -14].

Построенная теория осесимметрических движений кольцевого зернового слоя внутри цилиндрического виброрешета, совершающего равномерное вращательное движение вокруг вертикальной оси и продольные гармонические колебания [15 -17] требует дополнения и уточнения. Эффективные параметры ППС — коэф-

фициент динамической вязкости, определяется через характеристики осевых колебаний решета, физико-техническими параметрами ЗС и коэффициентом динамической вязкости газозерной среды пузырьков [18].

Полученные в результате развития теории выражения для компонент относительной скорости установившегося движения кольцевого зернового слоя [19] позволяют управлять качеством и производительностью процессов просеивания на цилиндрических виброрешетах.

Цель работы: получение математических выражений для определения абсолютных скоростей ППС при движении по цилиндрическим решетам виброцентробежных сепараторов с учетом конструктивно-кинематических параметров решета и свойств ЗС.

Основной материал. В результате исследований [15 -17, 19] получена начально-краевая задача, которая позволяет моделировать процесс просеивания кольцевого зернового слоя в цилиндрических виброцентробежных сепараторах (рис. 1). Для этого построена математическая модель процесса просеивания ППС на вертикальном цилиндрическом решете с радиусом R , совершающем равномерное вращательное движение вокруг вертикальной оси с угловой скоростью Ω , колебательное движение вдоль этой оси с круговой частотой ω и амплитудой A . Где $l_1 = R\Delta\phi$, $l_2 = \Delta z$ — размеры базовой ячейки цилиндрического решета; h^* — средняя толщина слоя ППС; V_0 — средняя скорость прохождения ППС через отверстия решета; ε — «живое» сечение цилиндрического виброрешета.

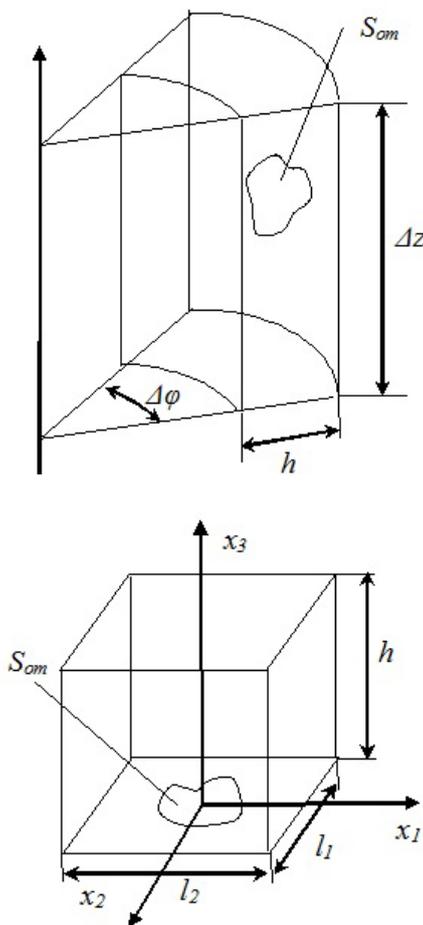


Рис. 1. Расчетные схемы цилиндрических виброрешет

Определены выражения для компонент относительной скорости установившегося движения ППС:

$$V_r = \frac{\delta V_0 (2R - h^*)}{2r}, \quad V_\phi = \frac{\delta V_0 R \Omega}{v} r \ln \frac{r}{R}, \quad (1)$$

$$V_z = \frac{g \left(r^2 - R^2 - 2(R - h^*)^2 \ln \frac{r}{R} \right)}{4v} - A\omega \cos \omega t + \frac{AR\omega^{3/2}}{\sqrt{v} \left(1 - \frac{h^*}{R} \right)} \times [L_1 \cos(\psi_1 + \omega t) - L_2 \cos(\psi_2 + \omega t)]. \quad (2)$$

где

$$\delta = \varepsilon \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{|B_{on}|^2}{|B_{oo}|^2} D_{on} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{|B_{no}|^2}{|B_{oo}|^2} D_{no} + \delta = + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{|B_{mn}|^2 + |B_{-mn}|^2}{|B_{oo}|^2} D_{mn} \right],$$

$$D_{mn} = \frac{\lambda_{mn} - 2}{\lambda_{mn} (\lambda_{mn} - 1)},$$

$$\lambda_{mn} = 2\pi h^* \sqrt{\frac{n^2}{l_1^2} + \frac{m^2}{l_2^2}},$$

$$B_{mn} = \int_{S_{om}} e^{-2\pi \left(\frac{n}{l_1} x_1 + \frac{m}{l_2} x_2 \right)} dx_1 dx_2,$$

$$L_1 = \sqrt{[ber_0^2(z) + bel_0^2(z)][ker_1^2(z_1) + kel_1^2(z_1)]},$$

$$L_2 = \sqrt{[ker_0^2(z) + kel_0^2(z)][ber_1^2(z_1) + bel_1^2(z_1)]},$$

$$\psi_1 = \frac{3\pi}{4} + \arctg \frac{bel_0(z)}{ber_0(z)} + \arctg \frac{kel_1(z_1)}{ker_1(z_1)},$$

$$\psi_2 = \frac{3\pi}{4} + \arctg \frac{kel_0(z)}{ker_0(z)} + \arctg \frac{bel_1(z_1)}{ber_1(z_1)},$$

$$z = \sqrt{\frac{\omega}{vr}}, \quad z_1 = \sqrt{\frac{\omega}{v}} (R - h^*),$$

$v = \mu / \rho$ — кинематический коэффициент вязкости ППС, моделирующей кольцевой зерновой слой.

Обозначим через $\vec{\Omega}$ вектор угловой скорости решета, направленной вдоль оси z цилиндрической системы координат r, ϕ, z с ортами $\vec{e}_r, \vec{e}_\phi, \vec{e}_z$. Согласно [20], абсолютное ускорение \vec{a}_a и скорость \vec{V}_a элемента ППС можно выразить через относительное ускорение \vec{a} и скорость \vec{V} следующим образом:

$$\vec{a}_a = \vec{a}_0 + 2\vec{\Omega} \times \vec{V} + \vec{\Omega} \times (\vec{\Omega} \times \vec{r}) + \vec{a}, \quad (3)$$

$$\vec{V}_a = \vec{V}_0 + \vec{\Omega} \times \vec{r} + \vec{V}, \quad (4)$$

где $\vec{a}_0 = -A\omega^2 \sin \omega t \vec{e}_z$; $\vec{V}_0 = A\omega \cos \omega t \vec{e}_z$ — ускорение и скорость продольных (вдоль оси z) колебаний решета; $\vec{r} = r\vec{e}_r$ — вектор, соответствующий радиусу рассматриваемого элемента ППС.

Если теперь подставить (1), (2) в уравнение (4) для абсолютной скорости, то получим:

$$\begin{aligned} V_r^a &= \frac{\delta V_0 (2R - h^*)}{2r}, \\ V_\phi^a &= \Omega r \left(1 + \frac{\delta V_0 R}{v} \ln \frac{r}{R} \right), \\ V_z^a &= \frac{g \left(r^2 - R^2 - 2(R - h^*)^2 \ln \frac{r}{R} \right)}{4v} \\ &+ \frac{AR\omega^{3/2}}{\sqrt{v} \left(1 - \frac{h^*}{R} \right)} \left[L_1 \cos(\psi_1 + \omega t) - L_2 \cos(\psi_2 + \omega t) \right]. \end{aligned} \quad (5)$$

С помощью (5), (6) можно получить выражения для определения производительности сходовой и проходовой фракций ЗС:

$$Q_{II} = 2\pi RL\delta V_0 \varepsilon_p, \quad Q_C = 2\pi R \int_{R-h}^R V_z^a r dr, \quad (7)$$

где ε_p — коэффициент живого сечения решета.

Построенное осесимметричное решение начально-краевой задачи предполагает использование модифицированных бесселевых функций и функций Кельвина и имеет достаточно сложный вид (см. (1) - (2)).

Определение этих функций требует применения соответствующих алгоритмов и программных сред. Однако в производственных условиях работы значения параметров цилиндрических виброрешет таковы, что выполняется неравенство:

$$\sqrt{\omega / \nu r} \geq 10, \quad (8)$$

где: ν — эффективный коэффициент кинематической вязкости ППС; r — текущий радиус элемента ППС, изменяющийся в интервале $R - h^* \leq r \leq R$.

Выполнение неравенства (8) позволяет без существенных погрешностей использовать для расчета модифицированных бесселевых функций и функций Кельвина приближенным асимптотическим выражениям [21]:

$$I_p(z) \approx \sqrt{\frac{\pi z}{2}} \left(e^z + (-1)^p i e^{-z} \right),$$

$$K_p(z) \approx \sqrt{\frac{\pi}{2z}} e^{-z}, \quad p = 0, 1. \quad (9)$$

С помощью (9) получаем следующие приближенные выражения для определения поля абсолютной скорости для установившегося режима движения слоя ППС:

$$\begin{aligned} V_r^a &= \frac{\delta V_0 (2R - h^*)}{2r}, \\ V_\phi^a &= \Omega r \left(1 + \frac{\delta V_0 R}{v} \ln \frac{r}{R} \right), \\ V_z^a &= \frac{g \left(r^2 - R^2 - 2(R - h^*)^2 \ln \frac{r}{R} \right)}{4v} \\ &+ A\omega \sqrt{r/R} e^{-\lambda(R-r)} \times \\ &\times \left[\cos(\lambda(r-R) + \omega t) \left(1 + \frac{R-r}{16rR\lambda} \right) + \right. \\ &\left. + \frac{R-r}{16rR\lambda} \sin(\lambda(r-R) + \omega t) \right], \end{aligned} \quad (10)$$

где $\lambda = \sqrt{\omega / 2\nu}$.

Из (10) имеем следующее уравнение для расчета производительности решета по объему сепарирующей ППС:

$$\begin{aligned} Q &= Q_{II} + Q_C = \\ &= 2\pi RL\delta V_0 + 2\pi \int_{R-h}^R r V_z^a dr = \\ &= 2\pi RL\delta V_0 + \frac{\pi g}{8v} \left[R^4 - 2h^2 (2R - h^*)^2 + \right. \\ &+ 4(R - h^*)^4 \ln \left(1 - \frac{h^*}{R} \right) \left. \right] + A\sqrt{\frac{\omega \nu}{2}} \times \\ &\times \left\{ \cos \omega t \left[1 + e^{-\lambda h^*} \left(\left(\frac{h^*}{R} - 1 \right) \cos \lambda h + \right. \right. \right. \\ &+ \left. \left. \left(\frac{1}{\lambda R} + \frac{h^*}{R} + 1 \right) \sin \lambda h^* \right) \right] + \sin \omega t \times \right. \\ &\times \left[1 - \frac{1}{\lambda R} - e^{-\lambda h^*} \left(\left(1 - \frac{1}{\lambda R} - \frac{h^*}{R} \right) \cos \lambda h^* + \right. \right. \\ &\left. \left. + \left(1 - \frac{h^*}{R} \right) \sin \lambda h^* \right) \right] \left. \right\}, \end{aligned} \quad (11)$$

где: L — длина решета в направлении оси z ; ε — коэффициент живого сечения решета; V_0

— средняя скорость прохождения ППС через отверстия решета.

Для определения поля скорости в переходном режиме движения ППС следует в (10) добавить слагаемое в виде интеграла:

$$\frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} e^{-qt} I_m(\bar{V}_{\phi}) dq, \quad \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} e^{-qt} I_m(\bar{V}_z) dq. \quad (12)$$

Выводы. Таким образом, построена теория осесимметрических движений кольцевого слоя ППС внутри цилиндрического виброрешета, совершающего равномерное вращательное движение вокруг вертикальной оси и продольные гармонические колебания.

Разработанные математические выражения позволяют определять компоненты абсолютной скорости ППС как функции от характеристик вибрационных колебаний решета, так и от ее физико-технологических параметров. Выражения могут быть использованы при моделировании процессов в вибрационных центробежных сепараторах как в установившемся, так и переходном режимах движения ЗС.

Література

1. Харченко С.А. К построению уравнений динамики стационарных потоков в псевдооживленном зерновом слое на структурных виброрешетах / С.А. Харченко // Вісник «Механізація сільськогосподарського виробництва» – Харків: ХНТУСГ, 2014. – №148. – С. 181 - 186.
2. Харченко С.А. Построение решений уравнений динамики зерновых смесей на плоских виброрешетах / С.А. Харченко // Вісник «Конструювання, виробництво і експлуатація с.-г. машин», вип. 43, ч. II. – Кіровоград: КНТУ, 2013. – С. 287 - 292.
3. Харченко С.А. К построению трехмерной гидродинамической модели динамики пузырьковой псевдооживленной зерновой смеси по структурному виброрешету / С.А. Харченко // «Праці ТДАТУ». – Мелітополь, 2014. – Вип. 14. Т. 2. – С. 80 - 85.
4. Тищенко Л.Н. К применению методов механики сплошных сред для описания движения зерновых смесей на виброрешетах / Л.Н. Тищенко, С.А. Харченко // MOTROL «Motorization and power industry in agriculture». Poland: Lublin, 2013. – Vol. 15D. №7. – P. 94 - 99.
5. Тищенко Л.Н. К построению модели динамики пузырьковой псевдооживленной зерновой смеси по структурному трехмерному виброрешету / Л.Н. Тищенко, С.А. Харченко, М.М. Абдуев // Вісник «Механізація сільськогосподарського виробництва». – Харків: ХНТУСГ, 2015. – Вип. 156. – С. 168 - 174.
6. Тищенко Л.Н. Решение уравнений динамики псевдооживленных зерновых смесей на структурных виброрешетах. / Л.Н. Тищенко, С.А. Харченко, Ф.М. Харченко // MOTROL «Motorization and power industry in agriculture». – Poland: Lublin, 2014. – Vol. 16. №7. – P. 111 - 117.
7. Тищенко Л.Н. Моделирование динамики зерновой смеси при сепарировании на рифленном решете вибросепаратора / Л.Н. Тищенко, В.П. Ольшанский, Ф.М. Харченко, С.А. Харченко // Інженерія природокористування. – Харків: ХНТУСГ, 2014. – Вип.2 (2). – С. 54 - 61.
8. Тищенко Л.Н. Уточнение уравнений динамики пузырьковой псевдооживленной зерновой смеси по структурному виброрешету / Л.Н. Тищенко, С.А. Харченко // Вібрації в техніці і технологіях. – Вінниця: ВНАУ, 2014. – №1 (73). – С. 50 - 53.
9. Тищенко Л.Н. Гидродинамика сепарирования зерна / Л.Н. Тищенко, В.П. Ольшанский, С.В. Ольшанский // – Харьков: «Міськдрук», 2010. – 174 с.
10. Brilliantov N. Hydrodynamics and transport coefficients for Granulose Gases / N. Brilliantov, T. Proschel. – Arxiv: cond-mat 0301152, 2003. – V. 1.10 Jan.
11. Тищенко Л.Н. Виброрешетная сепарация зерновых смесей / Л.Н. Тищенко, В.П. Ольшанский, С.В. Ольшанский. – Харьков: «Міськдрук», 2011. – 280 с.
12. Тищенко Л.Н. Колебания зерновых потоков на виброрешетах / Л.Н. Тищенко, В.П. Ольшанский, С.В. Ольшанский. – Харьков: «Міськдрук», 2012. – 267 с.
13. Тищенко Л.Н. Колебательные процессы в зерновых смесях на решетках виброцентробежных сепараторов / Л.Н. Тищенко // MOTROL «Motorization and power industry in agriculture». – Poland: Lublin. Vol. 14 D, 2012. – P. 30 - 39.
14. Тищенко Л.Н. Моделирование процессов зерновых сепараторов / Л.Н. Тищенко, Д.И. Мазоренко, М.В. Пивень, С.О. Харченко, В.В. Бредихин, А.В. Мандрыка. – Харьков: ХНТУСХ, 2010. – 360 с.
15. Харченко С.А. К разработке гидродинамической модели движения зерновой смеси по цилиндрическому решету виброцентробежных сепараторов / С.А. Харченко // Вісник «Технічний сервіс машин для рослинництва». – Харків: ХНТУСГ, 2015. – Вип. 159. – С. 60 - 69.
16. Харченко С.А. Осесимметричные колебания кольцевого зернового слоя при движении по структурному решету / С.А. Харченко // Вісник «Ресурсозберігаючі технології, матеріали і обладнання в ремонтному виробництві». – Харків: ХНТУСГ, 2015. – №158. – С. 72 - 80.

17. Харченко С.А. К исследованию осесимметричных колебаний кольцевого зернового слоя при движении по структурному цилиндрическому решету / С.А. Харченко // Молодой ученый. – Казань, 2015. – №7 (87). – С. 1091 - 1096.

18. Харченко С.А. Алгоритм расчета эффективного коэффициента динамической вязкости пузырьковой псевдо-жидкости, моделирующей сепарируемую зерновую смесь / С.А. Харченко, Л.Н. Тищенко // Вібрації в техніці і технологіях. – Вінниця: ВНАУ, 2013. – С.64 - 72.

19. Харченко С.А. Теория осесимметрических движений кольцевого зернового слоя внутри цилиндрического виброрешета / С.А. Харченко, Л.Н. Тищенко // MOTROL «Motorization and power industry in agriculture». – Poland: Lublin, 2015. – Vol. 17 D. №7. – P. 73 - 81.

20. Бэтчелор Дж. Введение в динамику жидкости / Дж. Бэтчелор. – М.: Мир, 1973. – 758 с.

21. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1970. – 720 с.

Анотація

Визначення абсолютних компонент швидкостей бульбашкової псевдозрідженої зернової суміші при русі по циліндричним решетам вібровідцентрових сепараторів

С.О. Харченко, Л.М. Тищенко

Ефективна реалізація математичного апарату для моделювання динаміки зернових сумішей що рухаються по віброрешетам стала можливим внаслідок використання аналогії з рухом в'язкої нестискаємої рідини. Побудована теорія вісесиметричних рухів кільцевого зернового шару всередині циліндричного віброрешета, яке здійснює рівномірний обертальний рух навколо вертикальної вісі і повздовжні гармонічні коливання потребує доповнень та уточнень. В статті отримані математичні вирази для абсолютних компонент швидкостей бульбашкової псевдозрідженої суміші, яка моделює динаміку зернової суміші по циліндричним решетам вібровідцентрових сепараторів. Побудоване вісесиметричне рішення початково-крайової задачі передбачає використання модифікованих беселевих функцій і функцій Кельвіна і має достатньо складний вигляд. Визначення цих функцій потребує використання відповідних алгоритмів і програмного середовища. Отримані приблизні вирази для визначення поля абсолютної швидкості для встановишогося режиму руху шару бульбашкової суміші. Отримані вирази дозволяють керувати якістю і продуктивністю процесів просіювання на циліндричних віброрешетах. Вирази можуть бути використанні при моделюванні процесів у вібраційновідцентрових сепараторах, як у встановившомуся, так і перехідному режимах руху зернової суміші.

Ключові слова: просіювання, сепарація, решето, ефективність.

Abstract

Definition of absolute components of speeds of esiculate fluidized grain mixture at motion on cylindrical sieves of vibro-centrifugal separators

S.A. Kharchenko, L.N. Tishchenko

Effective implementation of the mathematical apparatus for modeling the dynamics of moving grain mixers for vibrosieves became possible due to the use of the analogy with the motion of a viscous incompressible fluid. The theory constructed axially symmetric circular movements of the grain layer inside the cylindrical vibrosieve performing uniform rotational movement about a vertical axis and longitudinal harmonic oscillations require additions and clarifications. In the article mathematical expressions for the absolute components of speeds of the vesiculate pseudo fluidized mixture that designs the dynamics of grain mixture on cylindrical sieves vibrocentrifugal separators. Built axisymmetric solution of the initial-boundary value problem involves the use of modified Bessel functions and Kelvin and has a fairly complicated. The definition of these functions requires the use of appropriate algorithms and software environments. The resulting approximate expression for determining the absolute velocity field of steady-state motion of the layer of the vesiculate mixture. The resulting development of the theory of expression for the components of the relative velocity of steady motion of the circular grain layer can control the quality and productivity of the process of sifting cylindrical vibrosieves. Expressions can be used for modeling processes in vibratory centrifugal separators in both steady and transient modes of movement of the grain mixture.

Keywords: sifting, separation, sieve, efficiency.

Представлено: В.П. Ольшанський / Presented by: V.P. Olshansky

Рецензент: А.И. Завгородний / Reviewer: A.I. Zavhorodnii

Подано до редакції / Received: 18.03.2015