

УДК 631.362:53

К ПОСТРОЕНИЮ ТРЕХМЕРНОЙ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ПУЗЫРЬКОВОЙ ПСЕВДООЖИЖЕННОЙ ЗЕРНОВОЙ СМЕСИ ПО СТРУКТУРНОМУ ВИБРОРЕШЕТУ

Харченко С. А., к.т.н.

Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко

Тел.(057) 732-86-40

Аннотация – в статье обоснованы пути построения уравнений динамики зерновых смесей на виброрешетах в трехмерном виде. Определены начальные и краевые условия, приняты допущения, учитывающие структурность решет и пузырьковость псевдооживленной зерновой смеси.

Ключевые слова – модель, динамика, зерновая смесь, виброрешето.

Постановка проблемы. Применение гидродинамического моделирования динамики зерновой смеси (ЗС), которая находится в псевдооживленном состоянии под воздействием вибрационных колебаний решета показало свою эффективность [1, 2].

Проведенное моделирование процессов динамики зерновой смеси по виброрешету в двухмерном виде [3-5] позволяет получить адекватные результаты. Однако данное моделирование не учитывает всех параметров отверстий, от которых зависит просеиваемость решет. Применение гидродинамики более полно описывает динамику ЗС, но значимым является и учет параметров отверстий, что определяет эффективность решет.

Анализ последних исследований. Трехмерное моделирование динамики псевдооживленных ЗС дает возможность учесть форму, кромки отверстий, что позволит оптимизировать параметры виброрешет и увеличить эффективность процесса сепарирования.

Формулирование целей статьи (постановка задания). Установить возможности построения трехмерной модели динамики пузырьковой зерновой смеси по виброрешету, определить граничные условия и допущения.

Основная часть. Будем рассматривать движение ЗС, находящейся в псевдооживленном состоянии, как движение псевдожидкости,

содержащей пузырьки газообразной среды (область пространства между твердыми частицами зерновой смеси). С точки зрения механики многофазных систем, такая пузырьковая псевдожидкость, характеризуется двумя эффективными коэффициентами вязкости, обусловленными как взаимодействием твердых частиц между собой, так и взаимодействием твердых частиц с газообразной средой пузырьков. Однако, предполагая, что объемная концентрация твердых частиц значительно больше аналогичной величины для пузырьков (область между твердыми частицами), можно считать, что вязкость, связанная с взаимодействием твердых частиц и газообразной средой, достаточно мала. Тогда на основании результатов из работ [6, 7], получаем, что эффективный коэффициент динамической вязкости, усредненный по толщине слоя ЗС, можно аппроксимировать с достаточной для практики точностью по формуле

$$\mu = \bar{\mu} \left(1 + \delta_{\Pi} \frac{2.5\mu_{\Pi} + \bar{\mu}}{\mu_{\Pi} + \bar{\mu}} \right), \quad (1)$$

где μ_{Π} - коэффициент динамической вязкости газообразной среды пузырьков, δ_{Π} - коэффициент объемной концентрации пузырьков, $\bar{\mu}$ - эффективный коэффициент динамической вязкости, усредненный по толщине слоя ЗС, обусловленный взаимодействием твердых частиц смеси; согласно формуле [8]:

$$\bar{\mu} = \frac{a^2 \rho_p (2 + \delta_p) \omega \sqrt{A - \sqrt{A^2 - D^2}}}{9(\bar{y} - a)B}, \quad (2)$$

где ρ_p и δ_p - соответственно плотность и объемная концентрация твердых частиц ЗС, a - радиус сферической частицы, объем которой совпадает со средним объемом твердых частиц:

$$\bar{y} = h - \frac{4atg\theta}{3\xi f \delta_p \pi}, \quad \bar{A} = \frac{2\rho_p (1 - \delta_p) A \omega^2}{\pi},$$

$$D = \frac{3\xi f \rho_p \delta_p \pi g (h - a) \cos\theta}{4a}, \quad B = \frac{3\xi f g \pi \rho_p \delta_p \cos\theta}{4a},$$

где h - средняя высота слоя ЗС, A и ω - амплитуда и частота колебаний виброрешета (рис.1), ξ - коэффициент, учитывающий поправку на пористость ЗС, f - коэффициент внутреннего сухого трения между твердыми частицами, g - ускорение свободного падения, θ - угол наклона виброрешета к горизонтальной плоскости.

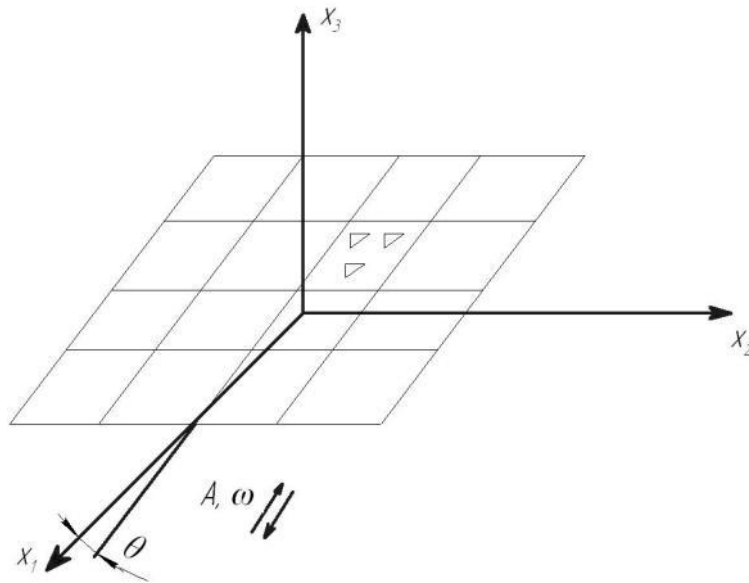


Рис. 1. Схема структурного виброрешета

Решето состоит из базовых ячеек (рис.2), которые содержат отверстия площадью S и характеризуются размерами l_1 и l_2 .

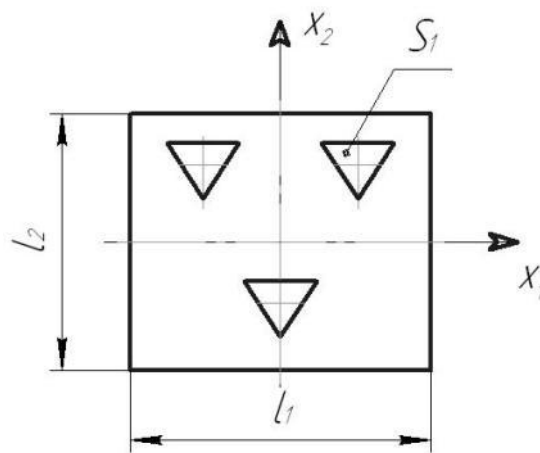


Рис. 2. Схема базовой ячейки структурного решета

Таким образом, на основании выше изложенного можно рассматривать движение пузырьковой псевдожидкости, как движение вязкой сплошной среды с коэффициентом динамической вязкости, определяемым по формулам (1) и (2).

Введем декартову систему координат x_1, x_2, x_3 так, чтобы плоскость x_1x_2 совпадала с плоскостью виброрешета, а ось x_3 была направлена вверх перпендикулярно этой плоскости (рис.1). Предполагается, что виброрешето (ось x_1) составляет угол θ с горизонтальной плоскостью. Поверхность виброрешета рассматривается, как двумер-

но периодическая структура с периодом l_1 вдоль оси x_1 и с периодом l_2 вдоль оси x_2 (рис.2). Базовой ячейкой такой структуры является прямоугольник $-\frac{l_1}{2} \leq x_1 \leq \frac{l_1}{2}$, $-\frac{l_2}{2} \leq x_2 \leq \frac{l_2}{2}$, на котором расположено N отверстий S_1, S_2, \dots, S_N (рис. 2). Периодическая структура (виброрешето) получается трансляцией базовой ячейки вдоль осей x_1 и x_2 , соответственно, на nl_1 и nl_2 , где n – произвольное целое число.

Предполагается, что виброрешето совершает вдоль оси x_1 гармонические колебания с амплитудой A и круговой частотой ω . Под воздействием этих колебаний слой ЗС находится в псевдооживленном состоянии. Введем плотность ЗС ρ согласно[7], а именно:

$$\rho = \bar{\rho}(1 - \delta_p) + \rho_p, \quad (3)$$

где $\bar{\rho}$ - плотность газообразной среды пузырьков, ρ_p и δ_p - плотность и объемная концентрация твердых частиц ЗС.

Тогда поле скорости \vec{V} ЗС, рассматриваемой как пузырьковая псевдожидкость, должно удовлетворять следующим уравнениям:

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V}, \nabla) \vec{V} \right) = -\nabla P + \mu \Delta \vec{V} + \rho \vec{f}, \quad (4)$$

$$\text{div} \vec{V} = 0. \quad (5)$$

Здесь μ - эффективный коэффициент динамической вязкости, определяемый по формулам (1) и (2), P - избыточное давление в псевдожидкости, \vec{f} - внешняя сила, действующая на единицу массы псевдожидкости (в качестве силы выбираем силу тяжести):

$$\vec{f} = g \sin \theta \vec{e}_1 - g \cos \theta \vec{e}_3, \quad (6)$$

где $\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3$ - орты декартовой системы координат x_1, x_2, x_3 (рис.3).

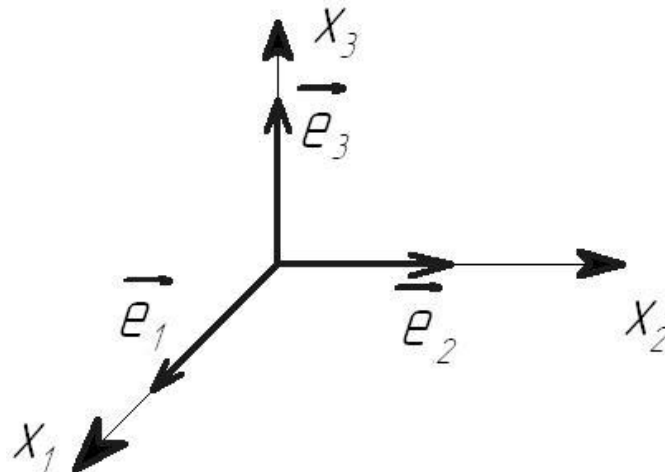


Рис. 3. Схема декартовой системы координат

Наряду с уравнениями (4), (5) поле скорости \vec{V} и избыточное давление P должны удовлетворять начальным условиям и краевым условиям на поверхности структурного виброрешета и свободной поверхности псевдожидкости. Не ограничивая общности, в качестве начальных условий выбираем

$$\vec{V}|_{t<0} = 0, \quad P|_{t<0} = 0. \quad (7)$$

Потребуем, чтобы на свободной поверхности псевдожидкости ($x_3 = h$) избыточное давление P и тензор напряжений $(\sigma_{ij})_{i,j=1}^3$ обращались в нуль:

$$P|_{x_3=h} = 0, \quad \sigma_{ij}|_{x_3=h} = 0, \quad i, j = 1, 2, 3. \quad (8)$$

Здесь тензор напряжений выражается через компоненты скорости $\vec{V} = V_1\vec{e}_1 + V_2\vec{e}_2 + V_3\vec{e}_3$:

$$\sigma_{ij} = -\rho\delta_{ij} + \mu\left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i}\right). \quad (9)$$

Из (8) и (9) следует, что на свободной поверхности псевдожидкости поле скорости удовлетворяет условиям:

$$\left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i}\right)\Big|_{x_3=h} = 0, \quad i, j = 1, 2, 3. \quad (10)$$

Рассмотрим теперь краевые условия на поверхности структурного виброрешета. Как указывалось выше, виброрешето совершает гармонические колебания вдоль оси x_1 . Введем скорость, усредненную по координатам x_1 и x_2 , именно:

$$\vec{V}_{cp} = \frac{1}{S} \iint \vec{V}(x_1, x_2, x_3, t) dx_1 dx_2, \quad (11)$$

где S - площадь поверхности виброрешета.

Потребуем, чтобы эта скорость на поверхности виброрешета ($x_3 = 0$) удовлетворяла условию

$$\vec{V}_{cp}|_{x_3=0} = A\omega \sin \omega t \vec{e}_1. \quad (12)$$

Это условие хорошо известно в гидродинамике [6], и при малых углах наклона поверхности виброрешета к горизонту эквивалентно условию отсутствия проскальзывания твердых частиц зерновой смеси по поверхности виброрешета [1].

Кроме условия (12), поле скорости должно удовлетворять условию, моделирующему процесс прохождения твердых частиц смеси через отверстия виброрешета [1, 2]. Будем полагать, что компонента скорости $V_3 = (\vec{V}, \vec{e}_3)$ на отверстиях виброрешета совпадает с некоторой средней скоростью U_0 , а вне отверстий обращается в нуль

$$V_3|_{x_3=0} = U_0 \begin{cases} 1, & (x_1, x_2) \in \bigcup_{P=1}^N S_P, \\ 0, & (x_1, x_2) \notin \bigcup_{P=1}^N S_P. \end{cases} \quad (13)$$

Здесь $\bigcup_{P=1}^N S_P$ - множество отверстий на базовой ячейке виброрешета.

Выводы. Таким образом, в результате исследований установлена начально-краевая задача (4) - (13), которая позволяет моделировать процесс движения слоя пузырьковой псевдожидкости (ЗС с пузырьками) вдоль плоской поверхности виброрешета, совершающего гармонические колебания. Решение полученных уравнений и применение трехмерного моделирования позволяют определить с допустимой погрешностью скорости движения смеси, производительность и полноту разделения при сепарировании зерновых смесей на виброрешетах.

Литература:

1. *Тищенко, Л.Н.* Гидродинамика сепарирования зерна [Текст] / Л.Н. Тищенко, В.П. Ольшанский, С.В. Ольшанский.- Харьков: Міськдрук, 2010. - 174 с.
2. *Тищенко, Л.Н.* Интенсификация сепарирования зерна [Текст] / Л.Н. Тищенко.- Харьков: Основа, 2004.- 224с.
3. *Тищенко, Л.Н.* К применению методов механики сплошных сред для описания движения зерновых смесей на виброрешетах [Текст] / Л.Н. Тищенко, С.А.Харченко // MOTROL «Motorization and power industry in agriculture». – Poland: Lublin, 2013. – Vol. 15 D. – №7. – P. 94-99.
4. *Харченко, С.А.* Построение решений уравнений динамики зерновых смесей на плоских виброрешетах [Текст] / С.А. Харченко // Конструювання, виробництво та експлуатація с.г. машин, вип.43, ч.ІІ.- Кіровоград: КНТУ, 2013. - С.287-292.
5. *Харченко, С.А.* К построению уравнений динамики стационарных потоков в псевдооживленном зерновом слое на структурных виброрешетах [Текст] / С.А. Харченко // Вісник ХНТУСГ: Механізація сільськогосподарського виробництва. – Харків: ХНТУСГ, 2014. – С.181-186.
6. *Бэтчелор, Дж.* Введение в динамику жидкости. - М.: Мир, 1973. – 758с.
7. *Tsken, С.М.,* Dissertation, Delft, MartinusNijhoff, Nijhoff, TheHague (1947).
8. *Харченко, С.А.* Алгоритм расчёта эффективного коэффициента динамической в'язкості пузырьковой псевдожидкости, моделирующей сепарируемой зерновую смесь / С.А. Харченко, Л.Н. Тищенко

// Вибрации в технике и технологиях. – Винница: ВНАУ, 2013. – Р. 64-72.

**ДО ПОБУДОВИ ТРИВИМІРНОЇ ГІДРОДИНАМІЧНОЇ МОДЕЛІ
ДИНАМИКИ БУЛЬБАШКОВОЇ ПСЕВДОЗРІДЖЕНОЇ
ЗЕРНОВОЇ СУМІШІ ПО СТРУКТУРНОМУ ВІБРОРЕШЕТУ**

Харченко С.А.

Анотація – у статті обґрунтовано шляхи побудови рівнянь динаміки зернових сумішей на віброрешетах в тривимірному вигляді. Визначено початкові і крайові умови, прийняті допущення враховують структурність решіт і бульбашковість псевдозрідженої зернової суміші.

**BUILDING A THREE-DIMENSIONAL HYDRODYNAMIC
MODEL OF THE DYNAMICS OF BUBBLE FLUIDIZED
GRAIN MIXTURE ON A STRUCTURAL VIBRATING SIEVE**

S. Kharchenko

Summary

The article is justified ways of building dynamics equations of grain mixtures on vibrating sieves in three-dimensional form. Initial and boundary conditions are defined, assumptions taking account of structure of sieves and bubbles in the fluidized grain mixture are accepted.