

УДК 631.362:53

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАССЛОЕНИЯ
ПСЕВДООЖИЖЕННОЙ ЗЕРНОВОЙ СМЕСИ НА
ВОЗДУХОПРОНИЦАЕМОЙ СКАТНОЙ ПЛОСКОСТИ ТИПА
«ЧЕШУЙЧАТОЕ» РЕШЕТО**

Харченко С.А., к.т.н.,

Борщ Ю.П., асп.*

Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко

Тел. (057) 732-86-40

Аннотация –получена математическая модель процесса расслоения зерновой смеси, которая движется по наклонной воздухопроницаемой поверхности типа «чешуйчатое» решето. В модели учтены конструктивные параметры чешуйчатой поверхности, подача зернового материала и воздушного потока.

Ключевые слова –математическая модель, зерновая смесь, решето.

Постановка проблемы. В результате исследований предложен способ повышения эффективности пневмосепарирования [1], который заключается в предварительном расслоении зерновых смесей (ЗС) при помощи воздухопроницаемой чешуйчатой поверхности. Для построения модели динамики зерновой смеси в разработанном пневмосепарирующем устройстве рационально использовать гидродинамические аналогии с движением несжимаемой неньютоновской жидкости.

Анализ последних исследований. В результате исследований предложен подход к моделированию динамики псевдоожигенных зерновых смесей, который учитывает гидродинамические аналогии с движением несжимаемой неньютоновской жидкости, реологический закон, условия на свободной и на скатной поверхности [2].

Формулирование целей статьи (постановка задания). Обосновать математическую модель процесса расслоения зерновой смеси, которая движется по наклонной воздухопроницаемой поверхности типа «чешуйчатое» решето, с учетом конструктивно-технологических параметров чешуйчатой поверхности пневмосепарирующего устройства.

Основная часть. Для исследований принимаем чешуйчатую по-

© Харченко С. А., Борщ Ю. П.

*Научный руководитель - к.т.н., доц. Харченко С. А.

Машины і засоби механізації сільськогосподарського виробництва

верхность и направление подачи воздушного потока (рис.1). При движении зерновой смеси по такой скатной поверхности слой испытывает вибрацию, что приводит к уменьшению его эффективной вязкости [3].

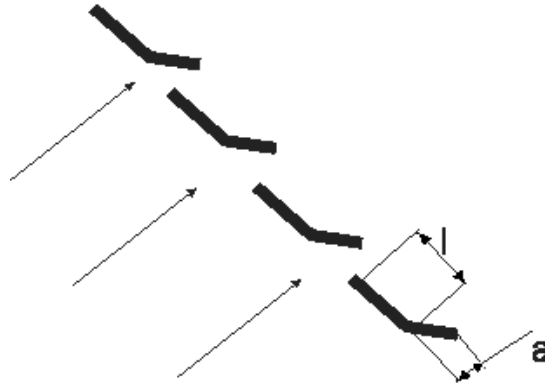


Рис.1. Схема подачи псевдоожижающего воздуха

Вязкость уменьшается при увеличении амплитуды колебаний, которая определяется высотой «чешуек», их частоты, которая зависит от расстояния между «чешуйками» и скорости движения зернового слоя [4]. Поэтому целесообразно стремиться к увеличению отношения высоты «чешуек» к расстоянию между ними. С другой стороны, для исключения появления застойных зон в потоке расстояние между «чешуйками» не было слишком большим. Поэтому близкой к оптимальной будет структура «чешуйчатой» поверхности, у которой соотношение между высотой «чешуек» и расстоянием между ними близко к равенству:

$$\frac{a}{l} \leq \frac{\operatorname{tg} \theta - k_r}{1 + k_r \cdot \operatorname{tg} \theta},$$

где k_r - коэффициент трения зерновой смеси о скатную поверхность, a - высота, l - расстояние между «чешуйками», θ - угол наклона поверхности.

Учитывая [5] значения величины коэффициента трения для разных зерновых культур получим, что для пшеницы $\frac{a}{l} \approx 0,1 \div 0,15$, для кукурузы и подсолнечника $\frac{a}{l} \approx 0,30 \div 0,35$. Для этих культур высота «чешуек» может быть несколько больше, чем для пшеницы. Заметим, что в примененной конструкции это отношение $\frac{a}{l} \approx 0,08$, что весьма

близко к оптимальному [6].

Так как количество частиц примесей относительно невелико, то, очевидно, можно пренебречь их взаимодействием друг с другом. Направим ось x вдоль скатной поверхности, а ось y – перпендикулярно ей и запишем уравнение Ланжевена движения частицы примесей под действием гравитации, Архимедовой силы и силы вязкого сопротивления [7]:

$$\begin{cases} \frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{18\mu_0}{\rho_p d_p^2} \left[u - \frac{dx}{dt} \right] + \left(1 - \frac{\rho}{\rho_p} \right) \cos \theta \\ \frac{d^2 y}{dt^2} = \frac{18\mu_0}{\rho_p d_p^2} \left[-\frac{dy}{dt} \right] + \left(1 - \frac{\rho}{\rho_p} \right) g \sin \theta \end{cases} \quad (1)$$

где d_p – эквивалентный диаметр частицы примесей ЗС; ρ , ρ_p – плотность частиц ЗС и частицы примесей, соответственно; μ_0 – вязкость псевдооживленного слоя при малых скоростях сдвига (в соответствии с принятой реологической моделью при малых скоростях зерновой поток ведет себя как ньютоновская жидкость).

Так как длина скоростной релаксации частиц примесей мала, то можно считать, что они двигаются со средней скоростью, определяемой из условия баланса действующих на частицу сил, т.е. “легкие” частицы примесей “всплывают”, двигаясь по вертикали и при этом смещаются за счет увлечения их движущимся псевдооживленным зерновым слоем.

Тогда уравнение Ланжевена (15) можно переписать в виде

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = u - w \sin \theta \\ \frac{dy}{dt} = w \cos \theta \end{cases}, \quad (2)$$

где w – скорость “всплывания” частиц примесей, а $u = u(y)$ – скорость движения зернового слоя [1]. Интегрированием системы (2) получим уравнение траекторий движения частиц примесей в зерновом слое

$$x = x_0 + \frac{1}{w \cos \theta} \int_{y_0}^y u(y) dy - tg \theta \cdot (y - y_0), \quad (3)$$

где x_0, y_0 – координаты частицы примесей в начальный момент времени.

Подставив теперь в (3) полученные ранее [1] выражения для скорости зернового потока, запишем (3) в виде:

$$\begin{aligned}
x - x_0 = & -tg\theta \cdot (y - y_0) - \frac{1}{w \cos \theta} \frac{\mu_0}{4\mu_\infty} (y^2 - y_0^2) + \\
& + \frac{2}{3w} \sqrt{\frac{\rho g \cdot tg\theta}{\mu_\infty}} \left[\left(\frac{\mu_0^2}{4\mu_\infty \rho g \sin \theta} + H \right)^{\frac{3}{2}} y + \frac{2}{5} \left(\frac{\mu_0^2}{4\mu_\infty \rho g \sin \theta} + (H - y) \right)^{\frac{5}{2}} \right] - \\
& - \frac{2}{3w} \sqrt{\frac{\rho g \cdot tg\theta}{\mu_\infty}} \left[\left(\frac{\mu_0^2}{4\mu_\infty \rho g \sin \theta} + H \right)^{\frac{3}{2}} y_0 + \frac{2}{5} \left(\frac{\mu_0^2}{4\mu_\infty \rho g \sin \theta} + (H - y_0) \right)^{\frac{5}{2}} \right] + \\
& + \frac{\beta}{w \cos \theta} \cdot \frac{-\mu_0 + \sqrt{\mu_0^2 + 4\mu_\infty \rho g H \sin \theta}}{2\mu_\infty} \cdot (y - y_0).
\end{aligned} \quad (4)$$

Так как скорость зернового потока в основном определяется значением μ_∞ [1], то выражение (4) можно упростить:

$$\begin{aligned}
x - x_0 = & -tg\theta \cdot (y - y_0) + \\
& + \frac{1}{w \cos \theta} \sqrt{\frac{\rho g H \sin \theta}{\mu_\infty}} \left\{ \beta(y - y_0) + \frac{2H}{3} \left[(y - y_0) + \frac{2}{5} \left(1 - \frac{y}{H} \right)^{\frac{5}{2}} - \frac{2}{5} \left(1 - \frac{y_0}{H} \right)^{\frac{5}{2}} \right] \right\}.
\end{aligned} \quad (5)$$

Из (19) получим, что частица примесей, находившаяся в начальный момент времени внизу зернового слоя, в конце движения по скатной поверхности поднимется на высоту h , которую можно найти из уравнения

$$L = -tg\theta \cdot h + \frac{1}{w \cos \theta} \sqrt{\frac{\rho g H \sin \theta}{\mu_\infty}} \left\{ \beta h + \frac{2H}{3} \left[h + \frac{2}{5} \left(1 - \frac{h}{H} \right)^{\frac{5}{2}} - \frac{2}{5} \right] \right\}, \quad (6)$$

где $x = L$ длина скатной поверхности.

Уравнение (6) нелинейно и определение величины h может быть проведено численными методами, в частности – методом итераций. Однако, для получения приближенного аналитического выражения можно ограничиться усредненной скоростью движения зернового слоя.

Тогда

$$h \approx \frac{w \cos \theta}{\bar{u} - w \sin \theta} L, \quad (7)$$

где $\bar{u} = \frac{1}{H} \int_0^H u(y) dy \approx \sqrt{\frac{\rho g H \sin \theta}{\mu_\infty}} \left[\beta + \frac{2}{5} H \right]$ – средняя по сечению скорость движения зернового слоя [1].

На рисунке 2 представлены траектории частиц примесей в слое зерновой смеси, которая движется по скатной чешуйчатой поверхности. Из рисунка видно, что движение частиц примесей внутри слоя зависит от их плотности. При плотности 100-200 кг/м³ координаты частиц примесей повышаются на 10-15% по сравнению с частицами плотности 600 кг/м³, по мере движения по чешуйчатой поверхности.

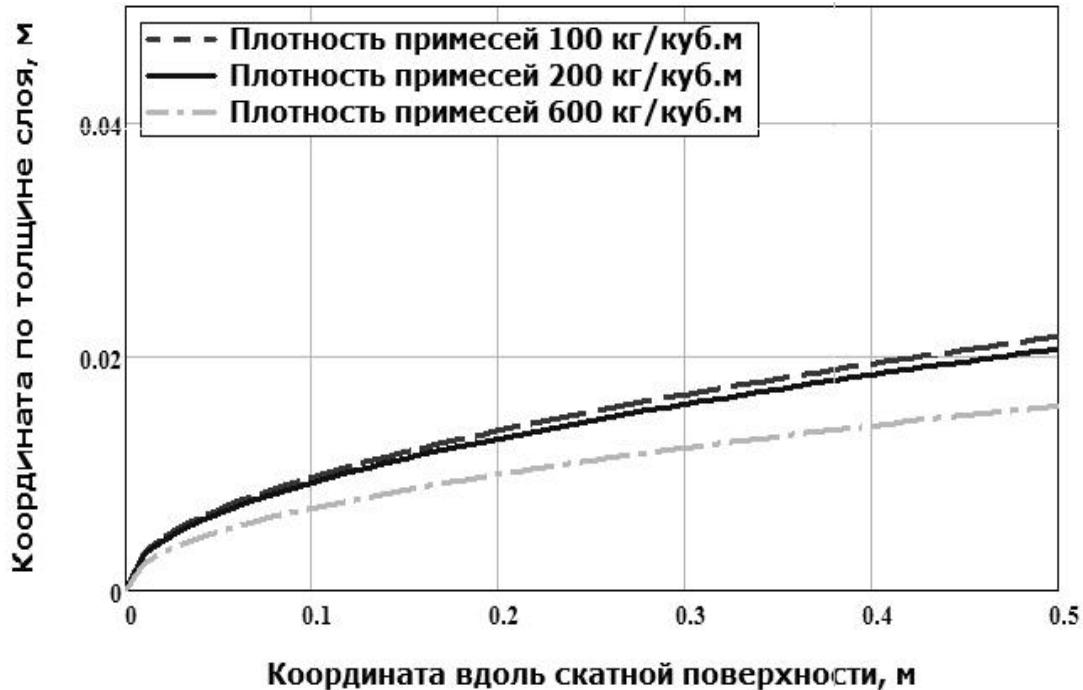


Рис.2. Траєкторії руху частинок примісей по скатній воздухопроницаемой чешуйчатой поверхності, при швидкості повітряного потоку 3 м/с; $d_p = 0,002$ м

Степень расслоения псевдооживленной зерновой смеси на скатной поверхности удобно характеризовать коэффициентом расслоения k_r , который определяется для того или иного вида примесей и равен отношению толщины слоя, свободной от примесей соответствующей фракции, к суммарной толщине зернового слоя. Этот коэффициент, очевидно, растет по мере удлинения скатной поверхности и существенно зависит как от размеров частиц примеси, так и от их плотности и скорости продувки слоя воздухом (рис.3, 4). Заметим, что коэффициент расслоения мало зависит от угла наклона скатной поверхности.

Исследования проводились для зернового потока, насыпная плотность $750 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, расчетное значение вязкости потока $\mu_0 = 0,1 \text{ Па} \cdot \text{с}$, $\mu_\infty = 0,1 \text{ Па} \cdot \text{с}^2$, эквивалентный диаметр примесей $d_p = 0,002$ м, плотность частиц примесей $\rho_p = 100-600 \text{ кг/м}^3$, угол наклона скатной поверхности $\theta = 40^\circ$, ее длина $l = 0,5 \text{ м}$; высота слоя ЗС $H = 0,02 \text{ м}$ (0,05 м); скорость воздушного потока 1 м/с (3 м/с).

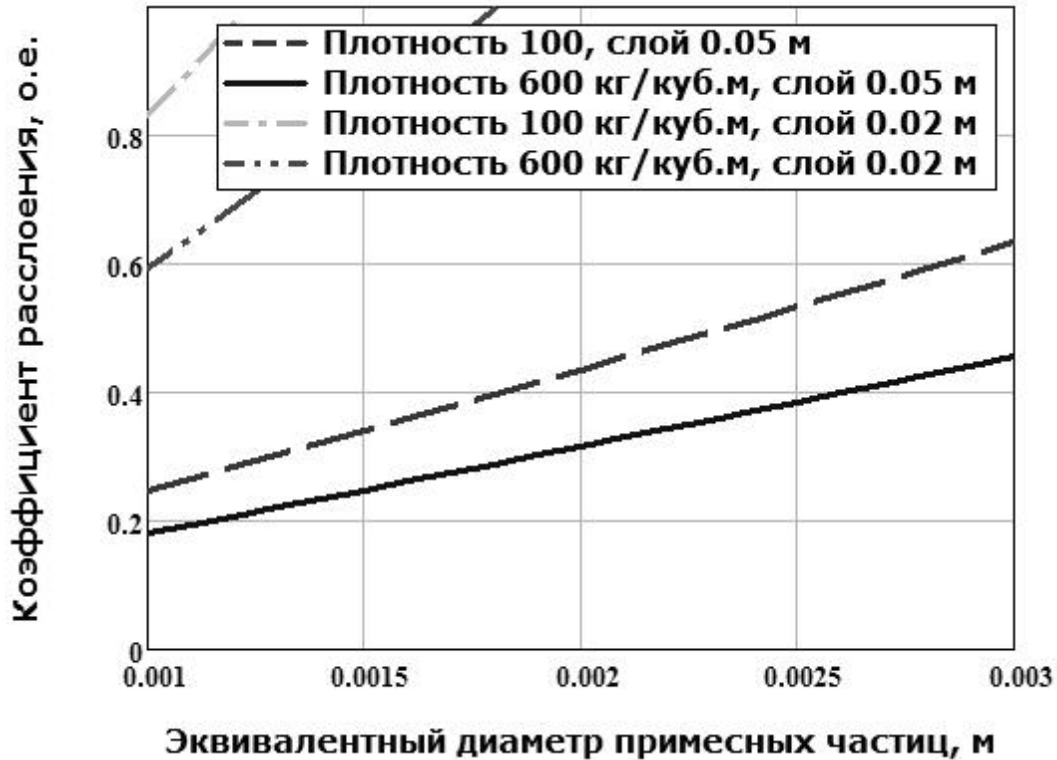


Рис.3. Залежності коефіцієнта розшарування шару зернової суміші від розмірів частин примісей, при швидкості повітряного потоку 3 м/с

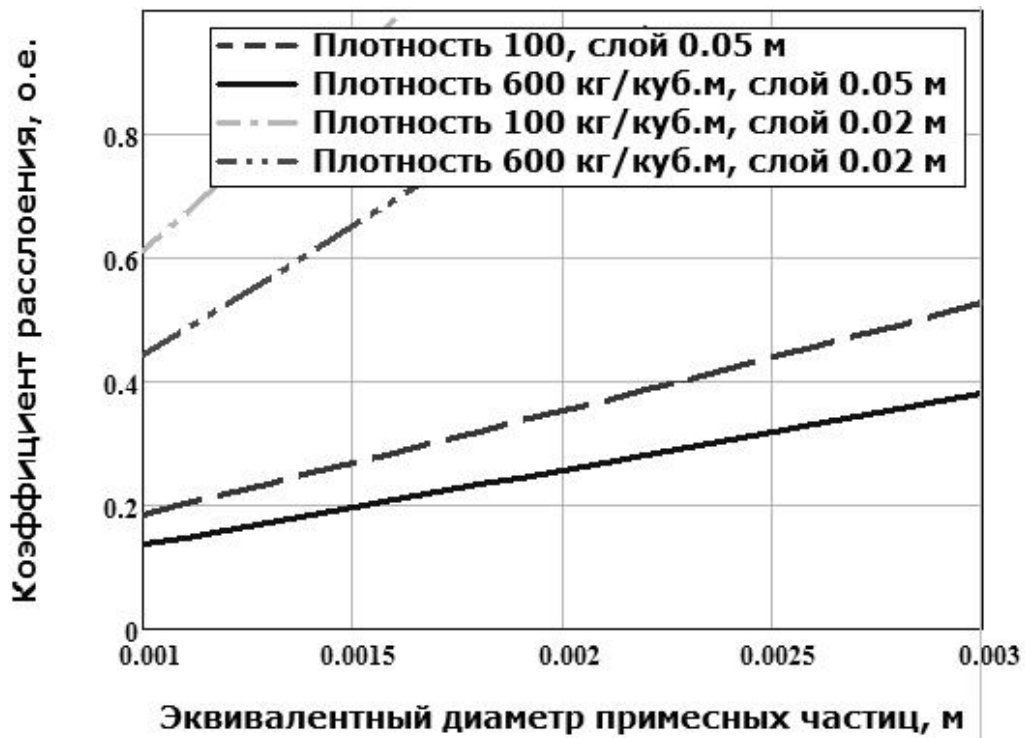


Рис.4. Залежності коефіцієнта розшарування шару зернової суміші від розмірів і густоти частин примісей, при швидкості повітряного потоку 1 м/с

Анализом рис.3., 4 установлено, что процесс расслоения зерновой смеси присутствует в заданных условия. Коэффициент расслоения характеризует процесс и зависит от свойств частиц смеси, скорости воздушного потока. Увеличение скорости продувки поверхности чешуйчатого решета с 1 м/с до 3 м/с повышает коэффициент расслоения на 20 - 25 %. Уменьшение плотности частиц примесей также повышает коэффициент расслоения на 25-35 %. Уменьшение высоты слоя также положительно влияет на процесс расслоения, коэффициент расслоения увеличивается на 30-35% при её уменьшении от 0,05 м до 0,02 м.

Выводы. Установлена реальная возможность перераспределения частиц в слое зерновой смеси и параметры этого процесса. Полученные математические выражения позволяют обосновать параметры процесса расслоения по воздухопроницаемой скатной чешуйчатой поверхности с учетом конструктивно-технологических параметров чешуйчатой поверхности. Полученные зависимости являются исходными данными для исследования работы основных каналов пневмосепарирующих устройств зерновых сепараторов.

Литература:

1. *Тищенко Л.Н.* Способ повышения эффективности пневмосепарирования зерновых смесей в пневмосепарирующих устройствах / *Л.Н. Тищенко, С.А. Харченко, Ю.П.Борщ, М.М. Абдуев* // Вісник ХНТУСГ: Механізація сільськогосподарського виробництва. – Харків:ХНТУСГ, 2014. – Вип.00. – С.00-00.

2. *Харченко С.А.* К моделированию процесса расслоения псевдооживленной зерновой смеси на воздухопроницаемой скатной плоскости типа “чешуйчатое” решето / *С.А. Харченко, Ю.П. Борщ* // MOTROL «Motorization and power industry in agriculture». – Poland: Lublin, 2014. – Vol. 15 D. – №7. – P. 94-99.

3. *Гнездилов А.А.* Изменение эффективной вязкости дисперсных сыпучих материалов под воздействием вибрации / *А.А. Гнездилов, К.А. Пехтерев, Д.Н. Пирожков, С.А. Сорокин* // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – Барнаул, 2006. - № 4 (24). - С.50-53.

4. *Еремеев И.В.* Физическая модель процесса обезвоживания шламовых суспензий нефлотационной крупности на высокочастотном гроходе с разнонаклонными участками рабочей поверхности / *И.В. Еремеев* // Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство, 2013. - Вип. 54(95). - С.00-00.

5. Машины для послеуборочной поточной обработки семян. Теория и расчет машин, технология и автоматизация процессов. Под ред. Тица З.Л. – М.: Машиностроение, 1967. – 446 с.

6. http://www.frunze.ua/catalog/resheto/Chesh_list.html.
7. Reif, F. Fundamentals of Statistical and Thermal Physics. - New York: McGraw Hill 1965. – 668p.

**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РОЗШАРУВАННЯ
ПСЕВДОЗРІДЖЕНОЇ ЗЕРНОВОЇ СУМІШІ НА
ПОВІТРОПРОНИКНЕ СКАТНИЙ ПЛОЩИНІ ТИПУ
«ЛУСКАТНЕ» РЕШЕТО**

Харченко С.А., Борщ Ю.П.

Анотація – отримана математична модель процесу розшарування зернової суміші, яка рухається по похилій повітропроникній поверхні типу «лускате» решето. У моделі враховано конструктивні параметри лускатої поверхні, подача зернового матеріалу і повітряного потоку.

**A MATHEMATICAL MODEL OF FIBERING OF THE FLUIDIZED
GRAIN MIXTURE ON BREATHABLE PITCHED PLANE OF A
«FLAKE» SIEVE TYPE**

S. Kharchenko, Y. Borshch

Summary

A mathematical model of the separation of grain mixture which moves along the inclined breathable surface of the "flake" sieve type is obtained. The model takes into account design parameters of the "flake" surface, grain material and air flows.