

УДК 631.362:53

Моделирование динамики зерновых смесей по скатным воздухопроницаемым поверхностям пневмосепарирующих устройств зерновых сепараторов

Л.Н.Тищенко, С.А.Харченко¹, Ю.П.Борщ

*Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства
им.П.Василенко, (г. Харьков, Украина), ¹ kharchenko_mtf@ukr.net*

Проведено моделирование динамики псевдооживленной зерновой смеси по наклонной скатной плоскости с воздухопроницаемыми рифами-чешуйками, которые обеспечивают предварительное расслоение и интенсифицируют процесс пневмосепарации в вертикальном пневмосепарирующем устройстве зерновых сепараторов.

Ключевые слова: моделирование, динамика, зерновая смесь, сепарация, решето, вибрация, фракция, реология, тензор напряжения, вязкость

Постановка проблемы и ее актуальность.

Современные зерновые сепараторы имеют пневмосепарирующие каналы, которые предназначены для очистки зерновых смесей (ЗС) в воздушном потоке от легких примесей. Объектом исследований выбрано пневмосепарирующее устройство комплексного барабанного сепаратора КБС производства ОАО «Карловский машиностроительный завод» г. Карловка Карловского району Полтавской области [1]. Пневмосепарирующий канал сепаратора КБС является типичным и имеет вертикальный прямоугольный канал, который не отвечает современным требованиям производства. Последующее увеличение производительности сепараторов приводит к снижению качества очистки ЗС и повторности пропусков, что в свою очередь ведет к повышению эксплуатационных расходов.

Анализ результатов последних исследований и публикаций. Для повышения эффективности процесса очистки ЗС в пневмосепарирующем устройстве сепаратора КБС предлагается использовать перспективный способ, который заключается в предварительной подготовке ЗС путем использования расслаивающего воздухопроницаемого устройства. Для этого в аспирационной камере серийного сепаратора (например, КБС), а именно в пневмосепарирующем устройстве, установлена скатная поверхность (рис.1, поз.6) и воздухопроницаемую поверхность в виде чешуйчатого решета (рис.1, поз.7, 8).

При прохождении воздушного потока через ЗС, которая движется по поверхности 7, частицы легких примесей перераспределяются в верхние подслоя. Таким образом, в пневмосе-

парирующий канал поступает двухслойная ЗС, в которой сверху находятся легкие примеси. При разделении в вертикальном пневмосепарирующем канале легкие примеси выносятся из ЗС и осаждаются в пылеуловителе. Для улучшения перераспределения легких примесей в слое ЗС на воздухопроницаемой поверхности установлены рифли-чешуйки 8 (рис.1, б). Это позволяет увеличить количество пор в ЗС, которые способствуют перераспределению частиц легких примесей в слое.

ЗС относится к так называемым полидисперсным сыпучим материалам, для которых переход в псевдооживленное состояние происходит постепенно в некотором интервале скоростей. В таких слоях происходит обмен количеством движения между частицами разного размера и массы. Давление зернистого материала уравнивается силой гидравлического сопротивления слоя и в дальнейшем, вплоть до достижения скорости свободного витания одиночных частиц, перепад давления на слое сохраняет почти постоянное значение. Это объясняется тем, что с ростом скорости псевдооживляющего воздушного потока контакт между частицами уменьшается и они получают большую возможность хаотического перемешивания по всем направлениям.

Движение частиц ЗС на новом пневмосепарирующем устройстве моделируется как псевдооживленная воздушным потоком сплошная среда. Удобными и достаточно точными оказываются гидродинамические модели, основанные на аналогии движения вязкой жидкости и сыпучей среды [2, 3].

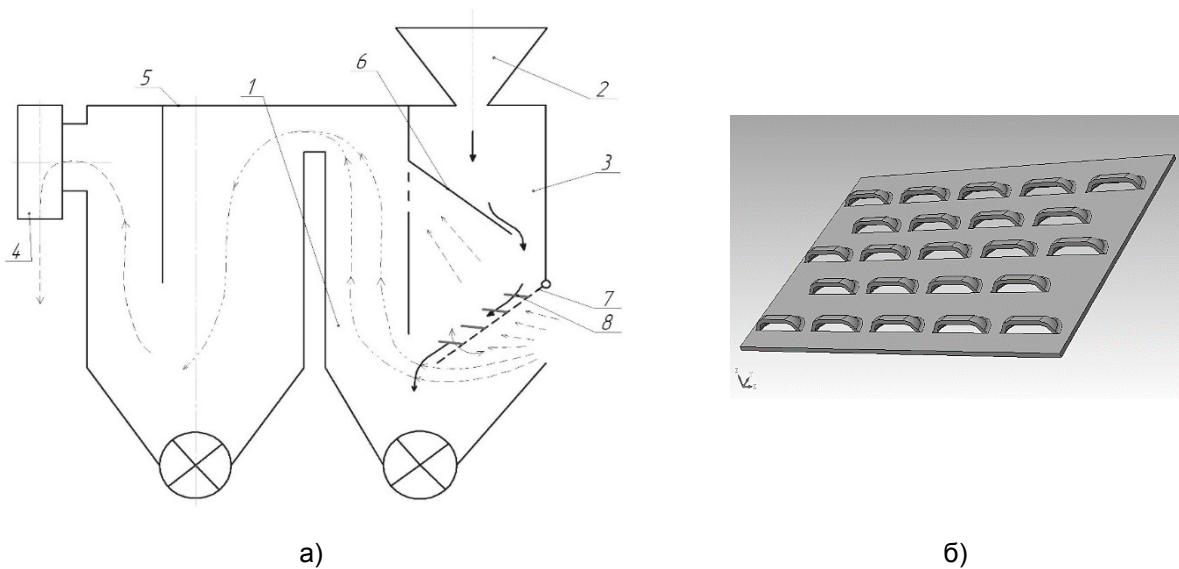


Рис.1. Схема пневмосепарирующего устройства зерновых сепараторов:

а) – технологическая схема разработанного пневмосепарирующего устройства:

- 1 – пневмосепарирующий канал; 2 – загрузочный бункер; 3 – накопительная камера; 4 – вентилятор;
 5 – пылесадочная камера; 6 – скатная поверхность; 7- воздухопроницаемая поверхность;
 8 – рифли-чешуйки; б) – модель скатной поверхности

В этом случае для описания движения использовано уравнения динамики сплошных сред в напряжениях [4]

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial u_x}{\partial t} = \rho F_x + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} \\ \rho \frac{\partial u_y}{\partial t} = \rho F_y + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} \end{cases}, \quad (1)$$

совместно с уравнением неразрывности, которое для несжимаемой среды запишется в виде

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} = 0, \quad (2)$$

где ρ – плотность, \bar{u} – скорость, \bar{F} – вектор внешних объемных сил, а σ_{ij} – компоненты тензора напряжений.

Цель работы: повышение эффективности процесса пневмосепарирования зерновых смесей путем разработки математических моделей динамики зерновых смесей по расслаивающему воздухопроницаемому устройству.

Исследования показали, что коэффициент вязкости движущейся ЗС меняется по толщине слоя. Он увеличивается по мере перемещения от свободной поверхности слоя, где скорость движения максимальна, в глубину [3, 5]. В частности, в [6] рассмотрен случай степенной зависимости коэффициента вязкости от поперечной координаты, хорошо согласующийся с экспериментальными данными. Таким образом, псевдо-

ожигенная потоком воздуха ЗС относится к неньютоновым жидкостям, т.е. жидкостям, при течении которых вязкость зависит от градиента скорости [7]. Для описания течений таких сред можно использовать эмпирически установленную степенную зависимость напряжения от скорости сдвига.

Достаточно универсальной, обобщающей основные реологические модели нелинейных вязкопластических сред, является обобщенная модель, в которой связь тензоров вязких напряжений и скоростей деформаций определяется формулой [7, 8]:

$$\sigma_{ij} = 2 \left[\frac{\tau^k}{J^m} + \mu^m \right]^k J^{\frac{k-1}{m}} e_{ij}, \quad (3)$$

где σ_{ij}, e_{ij} – тензор вязких напряжений и скоростей деформаций соответственно; μ – сдвиговая вязкость; τ – предел текучести; k, m – реологические параметры; J – интенсивность скоростей деформаций.

Имеющиеся экспериментальные данные [9] показали, что при низких скоростях сдвига поток сыпучих материалов, к которым относится и псевдоожигенная ЗС, ведет себя как обычная ньютоновская жидкость. При более высоких скоростях напряжения сдвига пропорциональны квадрату скорости сдвига. Это объясняется

одновременным, пропорциональным возрастанием величины ударных импульсов и их числа в единицу времени с увеличением скорости сдвига. При этом частицы помимо поступательной скорости движения в направлении сдвига приобретают распределенную в пространстве компоненту скорости хаотических перемещений (скорости флуктуации), модуль которой имеет тот же порядок, что и модуль относительной скорости поступательного перемещения частиц [10, 11]. Т.е. имеет место реологический закон [11,12]:

$$\mu \approx \mu_0 + \mu_\infty \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right|, \quad (4)$$

где первое слагаемое учитывает вязкую (Ньютоновскую) часть тензора напряжения, а второе – отклонение от него.

При постановке граничных условий при движении сыпучих сред нужно обеспечить равенство нулю на свободной поверхности касательных напряжений и равенство нулю внутреннего избыточного давления. На твердой поверхности необходимо учесть эффект “скольжения” [11-13]

$$u_x = \beta \frac{\partial u_x}{\partial y}, \quad (5)$$

где β – коэффициент, который зависит от свойств сыпучей среды и поверхности скольжения (при $\beta = 0$ выполняется классическое условие прилипания).

На рис.2 показана схема движения продуваемой воздухом псевдооживленной ЗС по скатной поверхности, которая наклонена под углом к горизонту.

Запишем уравнения движения ЗС в прямоугольной системе координат xoy (пренебрегаем изменением параметров смеси из-за ее расслоения и не учитываем эффекты, связанные с неравномерностью движения смеси, которые как показано в [6] незначительны)

$$\begin{cases} \rho F_x + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} = 0 \\ \rho F_y + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

Здесь координата x направлена вдоль наклонной скатной плоскости, y – перпендикулярно к ней, а внешняя сила является суперпозицией гравитационных сил и сил, вызванных прохождением воздуха через зерновой слой.

Вектор внешних объемных сил имеет вид:

$$F_x = g \sin \theta, \quad F_y = g \cos \theta - \Delta p,$$

где θ – угол наклона поверхности, по которой движется зерновой поток к горизонту, Δp – перепад давления на слое, g – ускорение свободного падения.

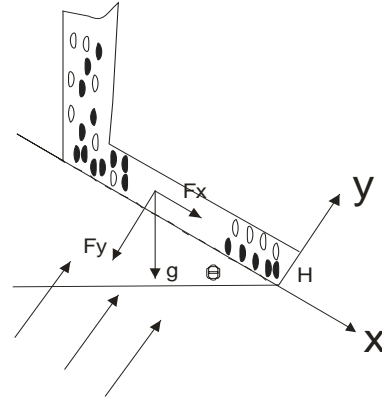


Рис.2. Схема движения псевдооживленной зерновой смеси по скатной поверхности

В установившемся движении псевдооживленной ЗС первом приближении можно считать, что поперечная составляющая скорости равна нулю, а продольная сохраняет постоянное значение вдоль слоя.

Выразим напряжения через проекции скорости с помощью соотношений обобщенного закона Ньютона [4] и, подставив в уравнения динамики (6), получим уравнения для определения профиля скорости движущегося слоя

$$\frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) \frac{\partial u}{\partial y} \right] = -\rho g \sin \theta, \quad (7)$$

где θ – угол наклона скатной поверхности, а $g \approx 9,8 м/с^2$ – ускорение свободного падения.

Получаем из уравнения (7) при реологическом законе (4) аналитическое решение, проинтегрировав его

$$u(y) = u_0 - \frac{\mu_0}{2\mu_\infty} y + \frac{2}{3} \sqrt{\frac{\rho g \sin \theta}{\mu_\infty}} \times \left[\left(\frac{\mu_0^2}{4\mu_\infty \rho g \sin \theta} + H \right)^{\frac{3}{2}} - \left(\frac{\mu_0^2}{4\mu_\infty \rho g \sin \theta} + (H - y) \right)^{\frac{3}{2}} \right], \quad (8)$$

где $u_0 = \beta \frac{-\mu_0 + \sqrt{\mu_0^2 + 4\mu_\infty \rho g H \sin \theta}}{2\mu_\infty}$ – скорость проскальзывания ЗС по скатной поверхности, а H – толщина слоя ЗС.

Для моделирования принимали ЗС с насыпной плотностью 750 кг/м^3 и вязкостью потока $\mu_\infty = 0,1 \text{ Па} \cdot \text{с}^2$.

В результате исследований проведен анализ влияния угла наклона скатной поверхности и толщины зернового слоя на удельную производительность, т.е. на количество ЗС, проходящей в единицу времени по единице ширины скатной поверхности (рис.3, а).

Установлено, что основное влияние на повышение производительности имеет толщина зернового слоя. При ее увеличении производительность резко возрастает, в то время как увеличение угла наклона скатной поверхности приводит к незначительному росту производительности. Поэтому следует стремиться, прежде всего, к увеличению толщины слоя ЗС, движущегося по скатной поверхности.

Однако, увеличение толщины слоя ЗС, как известно, приводит к ухудшению степени очистки в пневмосепарирующем канале.

Это происходит из-за того, что легкие примесные частицы не успевают пройти через толстый слой ЗС и увлекаются им. Поэтому особую важность приобретает предварительное расслоение

зернового потока на скатной поверхности, в результате чего легкие примеси перемещаются в верхнюю часть слоя ЗС.

Из уравнения (8), следует, что при равных скоростях на поверхности слоя, отклонение закона движения псевдооживленной ЗС от Ньютонова приводит к тому, что в глубине скорость движения зернового слоя отличается от скорости движения обычной ньютоновой жидкости. Это обстоятельство влияет на процесс разделения слоя на качественное зерно и легкие примеси. Очевидно, это необходимо учитывать при моделировании процессов расслоения ЗС в процессе движения по скатной поверхности.

Для анализа процесса перемещения легких примесей по толщине движущегося псевдооживленного зернового слоя важное значение имеет характер изменения его скорости движения по толщине и величина градиента скорости. В нижней зоне слоя ЗС скорость его движения быстро нарастает, но по мере приближения к верхней зоне рост скорости замедляется (рис.3, б).

Поэтому наиболее важными являются процессы расслоения ЗС именно в нижней зоне слоя, где горизонтальные скорости потока еще относительно невелики.

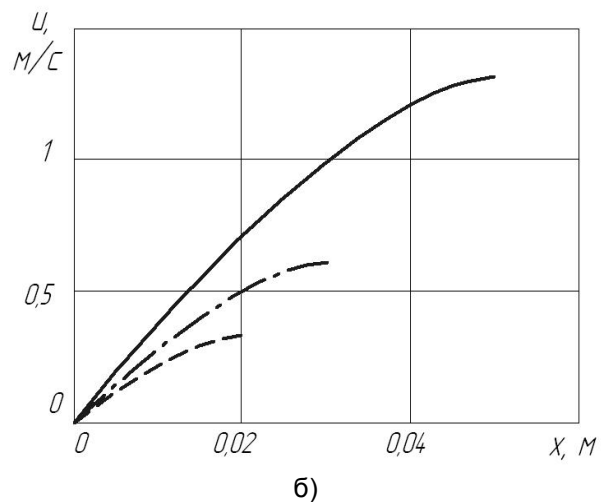
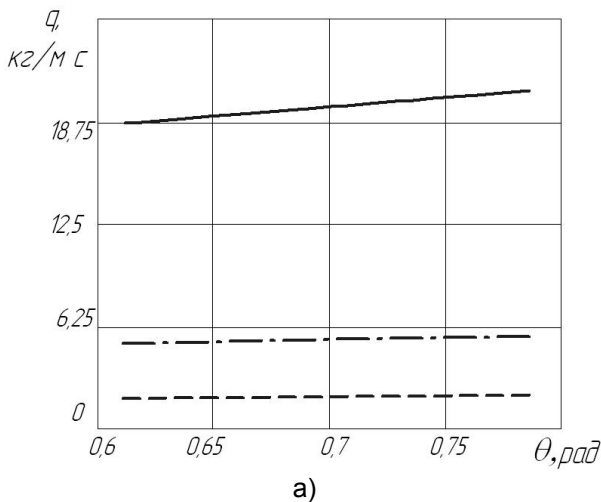


Рис.3. Зависимости удельной производительности от угла наклона скатной поверхности

(а) и профиля скорости зернового слоя от его толщины
 (б): — — — — — $H=5\text{см}$; - · - - - $H=3\text{см}$; - - · - $H=2\text{см}$

В момент начала псевдооживления вес ЗС уравновешивается силой гидравлического сопротивления слоя [14]:

$$\Delta p = (\rho - \rho_2)(1 - \varepsilon_0)h_0g, \quad (9)$$

где h_0 - высота неподвижного слоя; ρ, ρ_2 - плотности твердых частиц и псевдооживляющего воздуха; Δp - перепад давления на слое; ε_0 - порозность неподвижного слоя:

$$\varepsilon_0 = \frac{V_0 - V}{V_0}, \quad (10)$$

где V_0, V - объем неподвижного слоя и частиц ЗС, соответственно.

Для определения величины скорости, начала псевдооживления существует достаточно большое число полуэмпирических и теоретиче-

ских зависимостей, в частности, известная формула Тодеса [15, 16]:

$$Re = \frac{Ar}{1400 + 5,22\sqrt{Ar}}, \quad (11)$$

где $Ar = \frac{d^3(\rho - \rho_2)}{\rho_2 \nu_2^2} g$ – критерий Архимеда;

$Re = \frac{ud}{\nu_2}$ – критерий Рейнольдса, отвечающий началу псевдооживления; u – скорость начала псевдооживления; d – эквивалентный диаметр частиц; ν_2 – кинематическая вязкость воздуха.

Тогда с учетом (11) получим

$$u_{\min} \approx \frac{(\rho - \rho_2)d^2 g}{\mu_2 1400 + 5,22d\sqrt{\rho_2(\rho - \rho_2)dg}}, \quad (12)$$

$$u_{\max} \approx \frac{(\rho - \rho_2)d^2 g}{\nu_2 18 + 0,6d\sqrt{\rho_2(\rho - \rho_2)dg}}. \quad (13)$$

С учетом рассматриваемой зерновой смеси как полидисперсной (т.е. состоит из частиц с разными характерными размерами и плотностью), приняв поправки на расчет усредненного эквивалентного диаметра и плотности частиц ЗС, влияния наклона скатной поверхности на скорость псевдооживления получим математические выражения расчета скорости псевдооживления на случай движения потока полидисперсной зерновой смеси по наклонной скатной поверхности (рис.4, 5):

$$\frac{\rho d^2 g \cos \theta}{\nu_2 1400 + 5,22d\sqrt{\rho_2 \rho dg \cos \theta}} \leq u$$

$$u \leq \frac{\rho d^2 g \cos \theta}{\nu_2 18 + 0,6d\sqrt{\rho_2 \rho dg \cos \theta}}. \quad (14)$$

Так как время скоростной релаксации в псевдооживленной среде невелико, то можно считать, что частицы примеси “всплывают” с практически постоянной скоростью, которая может быть определена из условия равновесия действующих на частицу примеси сил [17]:

$$w = \frac{d_p^2(\rho - \rho_p)}{18\mu_0} g, \quad (15)$$

где ρ , ρ_p – плотность частиц ЗС и частиц примесей, соответственно. Из этой формулы, в частности, следует, что скорость “всплывания” пропорциональна квадрату эквивалентного диаметра частицы и разности ее плотности и усредненной плотности всех частиц слоя (рис.6).

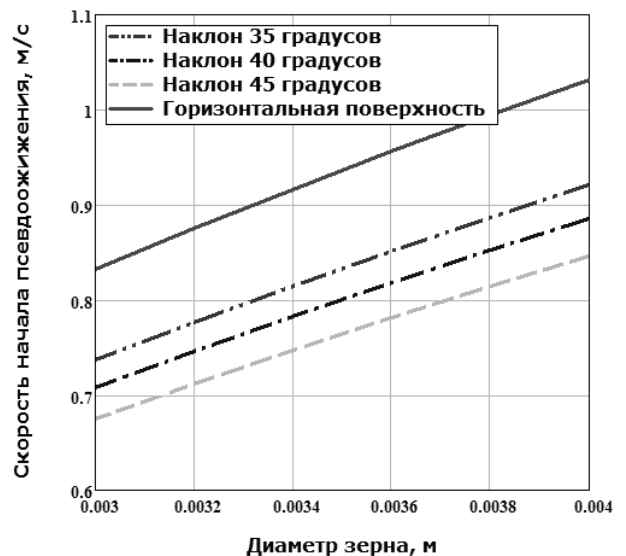


Рис.4. Влияние угла наклона скатной поверхности на скорость начала псевдооживления зерновой смеси

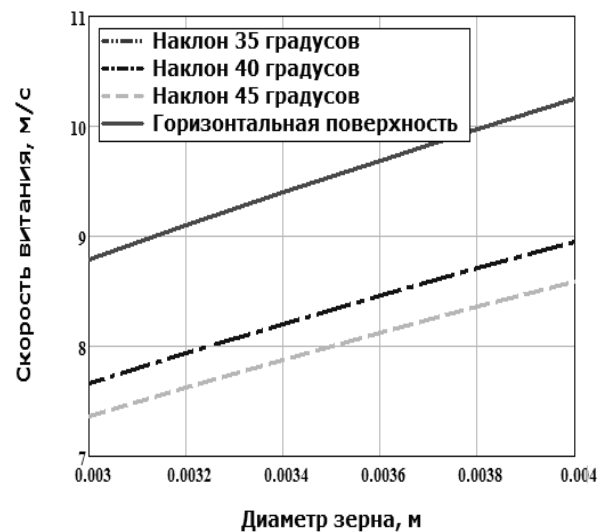


Рис.5. Влияние угла наклона скатной поверхности на скорость витания частиц зерна

Заметим, что увеличение скорости псевдооживляющего потока воздуха, вызывает увеличение толщины зернового слоя и уменьшение концентрации твердой фазы в нем (т.е. увеличение порозности), что ведет к уменьшению вязкости μ_0 . В первом приближении можно полагать, что по мере увеличения скорости псевдооживляющего воздушного потока скорость “всплывания” легких частиц примесей несколько увеличивается согласно формулы Стокса-Эйнштейна [18, 19]:

$$w = w_0 \frac{1+k(1-\varepsilon_0)}{1+k(1-\varepsilon)}, \quad (16)$$

где $\varepsilon_0 \approx 0,4$ – порозность псевдооживленного слоя при минимальной скорости псевдооживления; ε – порозность слоя при заданной скорости воздушного потока; w_0, w – соответствующие скорости “всплывания” частиц примесей; k – эмпирический коэффициент: учитывающий форму частиц.

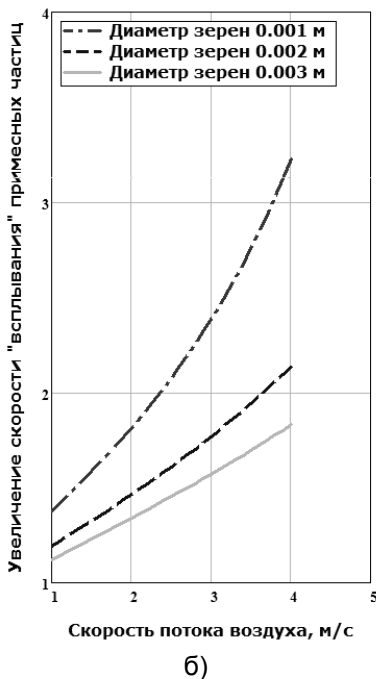
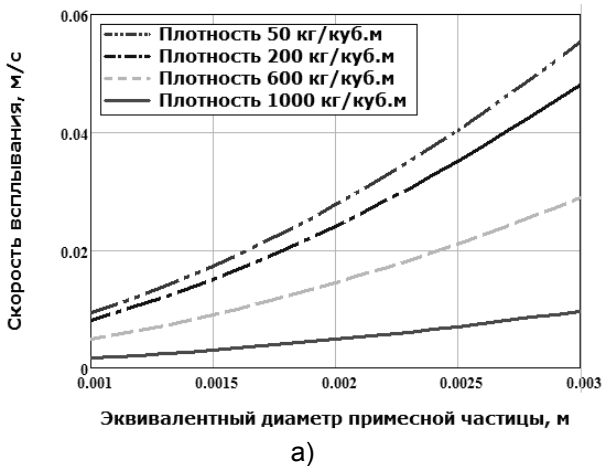


Рис.6. Зависимости скорости “всплывания” частиц примеси от плотности и эквивалентного диаметра (при скорости воздушного потока 3 м/с) (а), и от скорости воздушного потока (б)

Следующим этапом было исследование динамики ЗС по чешуйчатой поверхности с направленной подачей воздушного потока (рис.7).

При движении зерновой смеси по такой скатной поверхности слой испытывает вибрацию, что приводит к уменьшению его эффективной вязкости [20].

Вязкость уменьшается при увеличении амплитуды колебаний, которая определяется высотой “чешуек”, их частоты, которая зависит от расстояния между “чешуйками” и скорости движения зернового слоя [21]. 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

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

где k_{tr} – коэффициент трения зерновой смеси о скатную поверхность, a – высота, l – расстояние между “чешуйками”, θ – угол наклона поверхности.

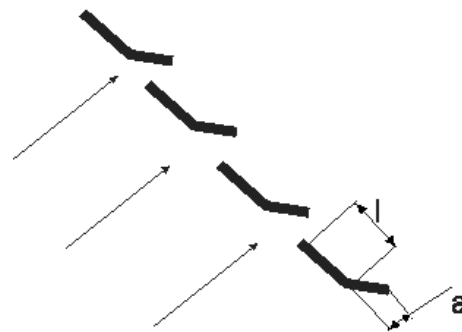


Рис.7. Схема подачи псевдооживляющего воздуха

Учитывая [22] значения величины коэффициента трения для разных зерновых культур получим, что для пшеницы $a/l \approx 0,1 \div 0,15$, для кукурузы и подсолнечника $a/l \approx 0,30 \div 0,35$. Для этих культур высота “чешуек” может быть несколько больше, чем для пшеницы.

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 [23]:

$$\begin{cases} \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{18\mu_0}{\rho_p d_p^2} \left[u - \frac{dx}{dt} \right] + \left(1 - \frac{\rho}{\rho_p} \right) \cos \theta \\ \frac{d^2y}{dt^2} = \frac{18\mu_0}{\rho_p d_p^2} \left[-\frac{dy}{dt} \right] + \left(1 - \frac{\rho}{\rho_p} \right) g \sin \theta \end{cases} \quad (17)$$

где d_p – эквивалентный диаметр частицы примесей ЗС; 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 движутся 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 (17) можно переписать в виде

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = u - w \sin \theta \\ \frac{dy}{dt} = w \cos \theta \end{cases}, \quad (18)$$

где w – скорость “всплывания” частиц примесей, а $u = u(y)$ – скорость движения зернового слоя [1]. Проинтегрировав систему (18), с учетом допущений [1] получим скорость зернового потока:

$$\begin{aligned} x - x_0 &= -\operatorname{tg} \theta \cdot (y - y_0) + \\ &+ \frac{1}{w \cos \theta} \sqrt{\frac{\rho g H \sin \theta}{\mu_\infty}} \beta (y - y_0) + \frac{2H}{3} \times \\ &\times \left[(y - y_0) + \frac{2}{5} \left(1 - \frac{y}{H} \right)^{\frac{5}{2}} - \frac{2}{5} \left(1 - \frac{y_0}{H} \right)^{\frac{5}{2}} \right]. \end{aligned} \quad (19)$$

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

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

$$\begin{aligned} L &= -\operatorname{tg} \theta \cdot h + \frac{1}{w \cos \theta} \sqrt{\frac{\rho g H \sin \theta}{\mu_\infty}} \times \\ &\times \left\{ \beta h + \frac{2H}{3} \left[h + \frac{2}{5} \left(1 - \frac{h}{H} \right)^{\frac{5}{2}} - \frac{2}{5} \right] \right\}, \end{aligned} \quad (20)$$

где $x = L$ длина скатной поверхности.

На рисунке 8 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.

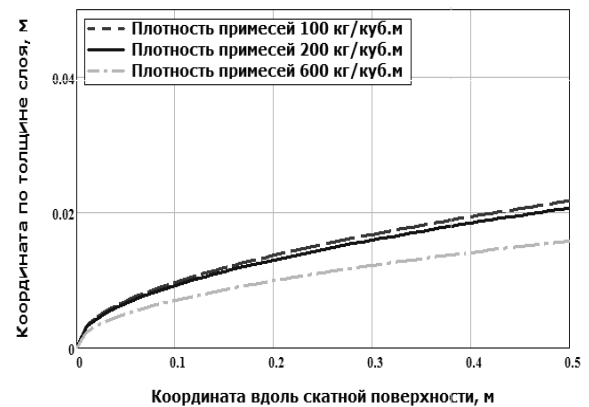


Рис. 8. Траектории движения частиц примесей по скатной воздухопроницаемой чешуйчатой поверхности при: скорости воздушного потока 3 м/с, $d_p = 0,002$ м

Степень расслоения псевдооживленной ЗС 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. 9). Заметим, что коэффициент расслоения мало зависит от угла наклона скатной поверхности.

Исследования проводились для зернового потока, насыпная плотность 750 кг/м³, расчетное значение вязкости потока $\mu_0 = 0,1$ Па с, $\mu_\infty = 0,1$ Па с², эквивалентный диаметр примесей $d = 0,002$ м, плотность частиц примесей $\rho_p = 100-600$ кг/м³, угол наклона скатной поверхности $\theta = 40^\circ$, ее длина $l = 0,5$ м; высота слоя ЗС $H = 0,02$ м (0,05м); скорость воздушного потока 1, 3 м/с. Анализом рис.9 установлено, что процесс расслоения зерновой смеси присутствует в заданных условия. Коэффициента расслоения характеризует процесс и зависит от свойств частиц смеси, скорости воздушного по-

тока. 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 уменьшении слоя с 0,05 м до 0,02 м.

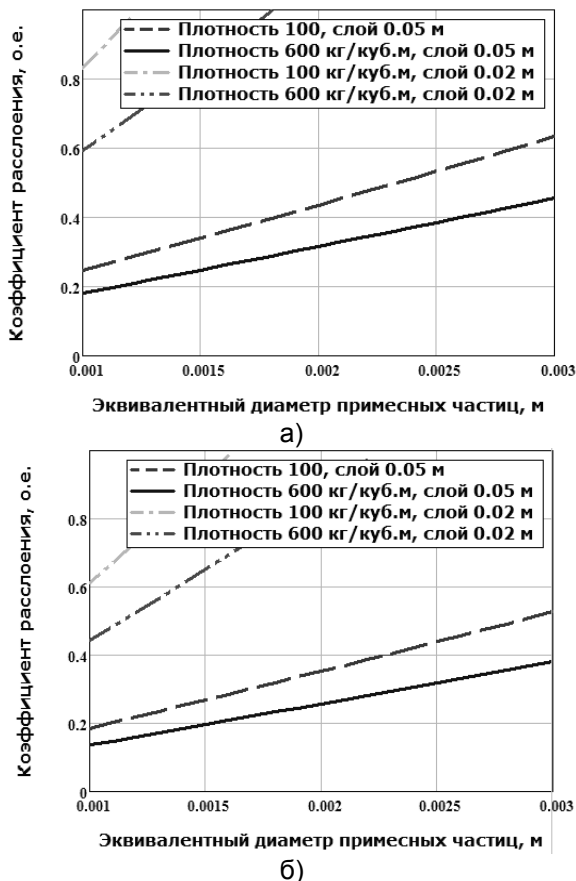


Рис.9. Зависимости коэффициента расслоения слоя зерновой смеси от размеров частиц примесей, при скорости воздушного потока 3 м/с(а), и при скорости воздушного потока 1 м/с (б)

Выводы. В результате исследований 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 и свойств зерновой смеси. Полученные зависимости являются исходными данными для исследования работы основных каналов пневмосепарирующих устройств зерновых сепараторов.

Литература.

1. 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», 2014. – Вип.148. – С.150-159.
2. Тищенко, Л.Н. Использование гидродинамической аналогии с применением уравнений Навье-Стокса для решения задач очистки воздушного потока в пылесадочных камерах зерноочистительных сепараторов / Л.Н. Тищенко, С.А. Харченко, Ф.М. Харченко // Інженерія природокористування, 2014. – №1(1). – С. 56-64.
3. Тищенко, Л.Н. Моделирование процессов зерновых сепараторов / Л.Н. Тищенко, Д.И. Мазоренко, С.А. Харченко и др. – Харків: Міськдрук, 2010. – 360 с.
4. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1973. – 847 с.
5. Тищенко Л.Н. Исследование закономерностей вибровязкости зерновых смесей при сепарировании цилиндрическими виброцентробежными решётами / Л.Н. Тищенко, М.В. Пивень, С.А. Харченко, В.В. Бредихин // Вісник ХНТУСГ: Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробн виробництва. – Харків: ХНТУСГ, 2009. – Вип. 88. – С. 34 - 44.
6. Тищенко, Л.Н. Виброрешетная сепарация зерновых смесей / Л.Н. Тищенко, В.П. Ольшанский, С.В. Ольшанский. – Харків: Міськдрук, 2011. – 280 с.
7. Астарита Дж. Основы гидромеханики не-ньютоновских жидкостей, пер. с англ. / Астарита Дж., Марруччи Дж. – М., 1978. – 312 с.
8. Рейнер М. Реология./ М.Рейнер / Пер. с англ. – М.: Наука, 1965. – 224 с.
9. Ragnold R.A. Experiments on a gravity free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shera // Proc. Roy. Soc. – London, 1954. – V.A225. – P.49 - 63.
10. Savage S. The stress tensor in a granular flow at high shear rates / S.Savage, D.Jeffrey // J. Fluid Mech, 1981. – V. 110. – P. 255 - 272.
11. Долгунин В.Н. Быстрые гравитационные течения зернистых материалов: техника измерения, закономерности, технологическое применение / В.Н. Долгунин, В.Я. Борщев. – М.: «Изд-во Машиностроение-1», 2005. – 73с.
12. Шваб, А.В. Модель движения высококонцентрированной гранулированной среды / А.В.Шваб, М.С.Марценко // Вестник Томского Гос. Ун-та, 2011. – № 3(15). – С.108 -116.

13. Ree T., Eyring H. // Appl. Phys., 1955. – №26. – P. 793.

14. Razumov I.M. Psevdoobjenia i pnevmo-transport sipuchih sred. – M.: Chemistry, 1972. – 240 p.

15. Rascheti aparatov kipyashchego sloya. 1986. / under a release I.P. Mukhlenova, B.S. Sajina, V.F. Frolova. – L.: Chemistry. – 352.

16. Todes O.M., Tsitovich O.B. 1981. Apparati s kipyashchim zernistim sloem. – L.: Chemistry. – 23 p.

18. Batchelor G.K. 1967. An Introduction to Fluid Dynamics. Cambridge University Press.

19. Burdin, N.V. 2009. Fizicheskie osnovi tekhnologii promivki zolotosoderjashchih peskov // Modern scientifically capacious technologies. – № 8. – P. 1- 22.

20. Matveenkov V.N., Kirsanov E.A. 2011. Vyazkost i struktura dispersnih sistem // Announcer MDU, Series №2. – Chemistry. – Т. 52, №4. – P. 243 - 276.

21. 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, 2006. – № 4 (24). – С. 50 - 53.

22. Еремеев И.В. Физическая модель процесса обезвоживания угольных шламовых суспензий нефлотационной крупности на высокочастотном грохоте с разнонаклонными участками рабочей поверхности / И.В. Еремеев // Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство, 2013. – Вип. 54(95).

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

24. Reif F. Fundamentals of Statistical and Thermal Physics, McGraw Hill. – New York, 1965. – 643 p.

25. Гортинский В.В. Процессы сепарирования на зерноперерабатывающих предприятиях / В.В. Гортинский, А.Б. Демской, М.А. Борискин. – М., 1980. – 304с.

Анотація

Моделювання динаміки зернових сумішей по скатним повітропроникним поверхням пневмосепаруючих пристроїв зернових сепараторів

Тищенко Л.М., Харченко С.О., Борщ Ю.П.

Проведено моделювання динаміки псевдозрідженої зернової суміші по нахиленим скатним поверхням з повітропроникними рифлями, які забезпечують попереднє розшарування і інтенсифікують процес пневмосепарування у вертикальному пневмосепаруючому пристрої зернових сепараторів.

Ключові слова: моделювання, динаміка, зернова суміш, сепарація, решето, вібрація, фракція, реологія, тензор напруги, в'язкість

Abstract

Design of dynamics of grain mixtures on sloped breathable surfaces of the pneumo separating devices of grain separators

L.M.Tishchenko, S.O.Kharchenko, Y.P.Borsch

Modeling of the dynamics of fluidized grain mixtures on an inclined sloping plane with breathable reefscales that provide preliminary stratification and intensify the process of pneumoseparation in the vertical pneumoseparating device of grain separators.

Keywords: modeling, dynamics, grain mixture, separation, sieve, vibration, faction, rheology, stress tensor, the viscosity

Представлено: В.М.Лукьяненко / Presented by: V.M.Luk'janenko

Рецензент: А.В.Богомолов / Reviewer: A.V.Bogomolov

Подано до редакції / Received: 8.12.2014