

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ РАССЛОЕННОЙ ЗЕРНОВОЙ СМЕСИ В ВЕРТИКАЛЬНОМ КАНАЛЕ ПНЕВМОСЕПАРИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ ЗЕРНОВЫХ СЕПАРАТОРОВ

Борщ Ю.П.

(Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко)

В статье получена математическая модель динамики частиц зерновой смеси в вертикальных каналах пневмосепарирующих устройств с учетом их предварительного расслоения

Постановка проблемы.

Предварительное расслоение зерновой смеси (ЗС) перед пневмосепарирующим устройством является перспективным способом повышения производительности зерновых сепараторов. Одной из реализаций данного способа есть применение воздухопроницаемой чешуйчатой поверхности [1], которая расслаивает ЗС, образуя два подслоя с различным содержанием легких примесей. Проведенные исследования [2-4] подтвердили эффект расслоения ЗС и позволили обосновать параметры процесса с учетом скорости продувки воздушным потоком, конструктивных параметров чешуйчатой поверхности и свойств смеси. Дальнейшие исследования направлены на определения эффективности работы вертикальных каналов пневмосепарирующих устройств с учетом параметров предварительного расслоения ЗС. В результате исследований [5] получено выражение для определения траекторий движения частиц примеси в пределах зернового потока в вертикальном канале. В нем частично учтено положение частиц примеси в слое зерновой смеси на входе в канал и их начальная скорость, свойства смеси (размеры и плотность частиц примеси), скорость воздушного потока и конструктивные параметры канала.

Цель работы: получение математической модели динамики частиц расслоенной зерновой смеси в вертикальном канале пневмосепарирующих устройств.

Основной материал. В пневмосепарирующем канале на частицы действуют сила тяжести, противоположно направленная сила от взаимодействия частицы с воздушным потоком.

Таким образом происходит разделение частиц – более легкие частицы примеси выносятся вверх, более тяжелые – падают вниз.

Зерновая смесь поступает в канал с некоторой скоростью под углом и примеси, прежде чем отделиться от зерна должны перейти в верхний слой ЗС.

Так как взаимодействие частиц зернового слоя друг с другом в пневмосепарирующем канале приводит к выравниванию скоростей движения, то можно полагать, что в основном частицы качественного зерна имеют близкие скорости движения.

Направим ось oX горизонтально, а ось oY - вертикально и поместим начало системы координат в точку входа скатной поверхности в пневмосепарирующий канал.

Тогда уравнение верхней границы зернового потока при $y_0 = H$ с учетом усреднения скорости имеет вид [5]:

$$y = \frac{1}{2} \frac{-g + \zeta \frac{3\rho_z U^2}{\pi \rho d}}{(\tilde{u} \cos\theta)^2} x^2 - \operatorname{tg}\theta \cdot x + H, \quad (1)$$

где $\tilde{u} = \frac{1}{H} \int_0^H u(y) dy \approx \sqrt{\frac{\rho g H \sin\theta}{\mu_\infty}} \left[\beta + \frac{2}{5} H \right]$ - средняя по

сечению скорость движения зернового слоя [1, 2]; d , ρ - эквивалентный диаметр и плотность частиц зернового слоя; θ - угол влета частицы в пневмосепарирующий канал (угол наклона чешуйчатой поверхности); ρ_z - плотность воздуха; μ_∞ - вязкость потока; ζ - эмпирический коэффициент (при достаточно высоких скоростях $\zeta \approx 0,4 \div 0,5$ [6]).

Пока частицы примеси находятся внутри потока ЗС, на их движение существенно сказывается взаимодействие с другими (качественными) частицами ЗС, которые движутся вниз и увлекают их. Взаимодействие частицы примеси с частицами ЗС в пневмосепарирующем канале будет приводить к выравниванию горизонтальных скоростей движения частиц. Из-за малого времени релаксации вертикальная скорость частицы примеси относительно потока близка к постоянной. Поэтому траектория движения частицы примеси в пределах зернового потока определяется формулой:

$$y = \frac{1}{2} \frac{-g + \zeta \frac{3\rho_z U^2}{\pi \rho d}}{(\tilde{u} \cos\theta)^2} x^2 + \left(\frac{W}{\tilde{u} \cos\theta} - \operatorname{tg}\theta \right) \cdot x + y_0, \quad (2)$$

где y_0 – расстояние частицы примеси от скатной поверхности в момент входа в пневмосепарирующий канал; W – относительная скорость движения частицы примеси вверх.

Эта скорость определяется из равновесия действующих на частицу примеси сил. Основными из них являются сила сопротивления движению, сила от воздействия на частицу примеси воздушного потока, которые и гравитационная сила.

Таким образом, с учетом вышесказанного имеем:

$$W = \sqrt{\frac{\rho_e U^2 - \frac{\pi}{3\zeta} d_p r_p g}{r_0 (1 - \varepsilon)}} \quad (3)$$

где d_p , ρ_p – диаметр и плотность частицы примеси, соответственно; r_0 – насыпная плотность зерна; ε – порозность слоя в момент входа в пневмосепарирующий канал [3, 4].

Время воздействия воздушного потока на частицу примеси определяется шириной пневмосепарирующего канала. Очевидно, ширина канала должна быть достаточной, чтобы частица примеси “успела” изменить направление движения. Но помимо ширины канала влияние оказывает также угол входа частицы ЗС и ее скорость. Здесь важно, чтобы частица примеси достигла стенки пневмосепарирующего канала на “нисходящем” участке траектории движения. В этом случае она отразится вниз и условия для изменения ее направления движения вверх ухудшатся [7].

Координаты выхода частицы примеси из потока ЗС будут определяться из условия пересечения траектории движения частицы примеси (2) с верхней границей потока ЗС (1):

$$x_v = \frac{H - y_0}{W} \tilde{u} \cos \theta,$$

$$y_v = \frac{-g + \zeta \frac{3\rho_e U^2}{\pi \rho d}}{2} \left(\frac{H - y_0}{W} \right)^2 - \sin \theta \cdot \frac{H - y_0}{W} \tilde{u} + H. \quad (4)$$

Дальше, очевидно, частица примеси будет двигаться по траектории:

$$y - y_v = \frac{1}{2} \frac{\left(-g + \zeta \frac{3\rho_z U^2}{\pi \rho_p d_p} \right)}{(\tilde{u} \cos\theta)^2} (x - x_v)^2 + \left(\frac{W}{\tilde{u} \cos\theta} - tg\theta \right) \cdot (x - x_v), \quad (5)$$

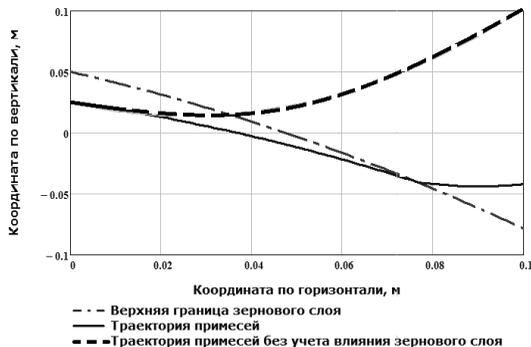
где d_p , ρ_p - эквивалентный диаметр и плотность частицы примеси, соответственно.

Очевидно, что для того, чтобы частица примеси была отсепарирована, она должна выйти из слоя ЗС до того, как она достигнет края пневмосепарирующего канала. Из (4) получим, что частицы примеси, для которых расстояние от скатной поверхности в момент входа в пневмосепарирующий канал больше, чем

$$h = H - \frac{W}{\tilde{u} \cos\theta} L, \quad (6)$$

будут отсепарированы. Здесь L - ширина пневмосепарирующего канала. Остальные частицы примеси будут увлечены падающими вниз основным качественным зерном.

Для анализа полученных уравнений построены траектории частиц примеси с различными свойствами в вертикальном канале разработанного пневмосепарирующего устройства (рис.1).



а)

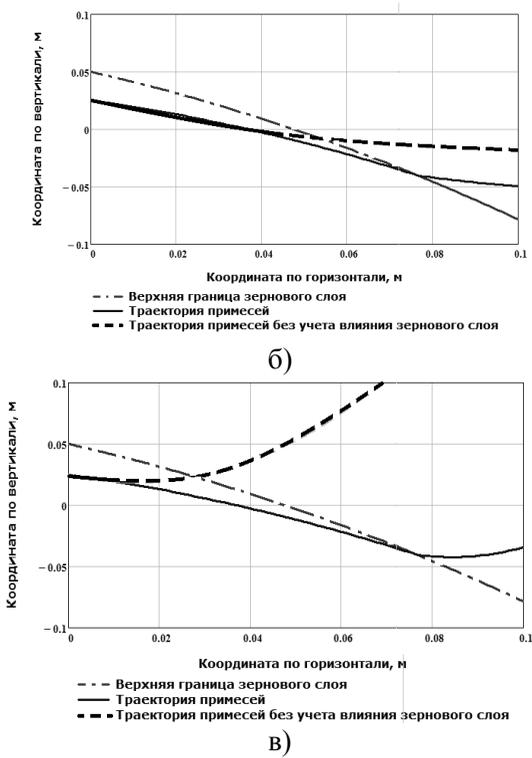


Рис.1. Траектории частиц примеси в вертикальном канале разработанного пневмосепарирующего устройства: а) - $d_p=0,001\text{м}$; $\rho_p=600\text{ кг/м}^3$; б) - $d_p=0,002\text{м}$; $\rho_p=600\text{ кг/м}^3$; в) - $d_p=0,002\text{м}$; $\rho_p=200\text{ кг/м}^3$

Степень очистки ЗС в пневмосепарирующем канале удобно характеризовать коэффициентом эффективности пневмосепарирующего канала k_k . Коэффициент эффективности пневмосепарирующего канала равен отношению толщины верхней части слоя, из которой частица примеси соответствующей фракции будут отсепарированы, к суммарной толщине зернового слоя. Этот коэффициент растет по мере увеличения ширины пневмосепарирующего канала и существенно зависит, как от размеров и плотности частиц примеси, так и от скорости продувки слоя ЗС воздушным потоком.

После прохождения ЗС по скатной поверхности происходит расслоение зернового потока [3, 4]: частицы примеси

перераспределяются в верхнюю часть зернового слоя. При этом нижняя часть слоя (толщиной Hk_r , где k_r - коэффициент расслоения зернового потока на скатной поверхности) будет свободна от частиц примеси. В пневмосепарирующем канале из верхней части слоя ЗС (толщиной Hk_k , где k_k - коэффициент эффективности пневмосепарирующего канала) отделяются частицы примеси.

Таким образом, суммарный коэффициент эффективности сепарации разработанного пневмосепарирующего устройства равен:

$$k = \min(1, k_k + k_r). \quad (7)$$

Эффективность процесса сепарации разработанного пневмосепарирующего устройства представлена в таблице 1. В ней представлена зависимость коэффициента расслоения зернового слоя на скатной поверхности, коэффициента эффективности пневмосепарирующего канала и суммарного коэффициента эффективности сепарации от свойств ЗС. Исследования проводились для зернового потока, насыпная плотность 750 кг/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 $d_p = 0,002 \text{ м}$, плотность $\rho_p = 400 \text{ кг/м}^3$, угол наклона скатной поверхности $\theta = 40^\circ$, ее длина $l = 0,5 \text{ м}$, скорость продувки зерновой смеси на скатной поверхности $v = 3 \text{ м/с}$, скорость воздушного потока в пневмосепарирующем канале $V = 6 \text{ м/с}$, ширина канала $L = 0,05 \text{ м}$.

Из таблицы видно, что расслоение зерновой смеси на скатной поверхности позволяет существенно увеличить эффективность сепарации. Для канала шириной $0,06 \text{ м}$ при скорости потока воздуха 6 м/с эффективность пневмосепарирующего канала для указанных фракций примесей не превышала $0,66$, а для наиболее крупных и тяжелых примесей была равна $0,40$. Предварительное расслоение зерновой смеси позволило повысить эффективность сепарации до $0,57$ для крупных и тяжелых примесей, и до $0,80$ – для легких.

Таблица 1

Зависимость коэффициентов расслоения пневмосепарирующего канала и суммарного коэффициента эффективности сепарации

Показатели	Значения					
Диаметр частиц примеси d_p , м	0,002	0,001	0,002	0,001	0,002	0,001
Плотность частиц примеси r_p , кг/м ³	600	600	400	400	200	200
Коэффициент расслоения поверхности, k_1	0,28	0,14	0,33	0,16	0,37	0,18
Коэффициент эффективности пневмоканала, k_2	0,40	0,57	0,52	0,61	0,61	0,66

Таким образом, доказана реальная возможность повышения эффективности процесса сепарирования ЗС на пневмосепарирующих устройствах зерновых сепараторах за счет предварительного расслоения смеси. Полученная математическая модель динамики расслоенной зерновой смеси в вертикальном канале позволяет управлять производительностью и качеством процесса сепарирования ЗС, проектировать пневмосепарирующие устройства зерновых сепараторов.

Список литературы

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. 148.- С. 150-159.

2. Харченко С.А. Моделирование динамики псевдооживленной зерновой смеси по наклонной чешуйчатой поверхности пневмосепарирующих устройств / Харченко С.А., Борщ Ю.П. // Вестник БГАТУ: МНПК «Современные проблемы освоения новой техники, технологий, организации технического сервиса в АПК»,

2014. –секция.2. Инновационные технологии в АПК. – С.239-251.

3. Харченко С.А. К моделированию процесса расслоения псевдооживленной зерновой смеси на воздухопроницаемой скатной плоскости типа “чешуйчатое” решето / Харченко С.А., Борщ Ю.П. // MOTROL «Motorization and power industry in agriculture». – Poland: Lublin-Kharkiv, 2014.

4. Харченко С.А. Математическая модель расслоения псевдооживленной зерновой смеси на воздухопроницаемой скатной плоскости типа “чешуйчатое” решето / Харченко С.А., Борщ Ю.П. // Праці ТДАТУ. – Мелітополь, 2014. – Вип.14. Т.2. - С.86-91.

5. Харченко С.А. К моделированию динамики расслоенной зерновой смеси в вертикальном канале пневмосепарирующих устройств зерновых сепараторов / Харченко С.А., Борщ Ю.П. // Вібрації в техніці та технологіях, 2014. – №1 (73). – С.40-43.

6. Медников Е.П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей. - М.: Наука, 1981. - 175 с.

7. Малис А.Я., Демидов А.Р. Машины для очистки зерна воздушным потоком. - М.: Гос. изд-во машиностроительной лит-ры, 1962. – 174 с.

Анотація

ДИЗАЙН ДИНАМІКА ШАРУВАТИХ ЗЕРНОСМЕСЬ У ВЕРТИКАЛЬНОМУ КАНАЛІ РОЗДІЛЕННЯ ПОВІТРЯ ПРИСТРОЇ ЗЕРНООЧИСНІ

У статті математична модель динаміки частинок зернової суміші у вертикальних каналів розділення повітря пристроїв з урахуванням їх попереднього розділення

Abstract

DESIGN OF DYNAMICS LAYERED GRAIN MIXTURE IN VERTICAL CHANNEL OF AIR SEPARATING DEVICES OF GRAIN SEPARATORS

In the article a mathematical model of particle dynamics grain mixture in vertical channels air separating devices taking into account their pre-separation