

МОДЕЛЬ ДВУСЛОЙНОГО ДВИЖЕНИЯ ЗЕРНОВОЙ СМЕСИ ПО МОДЕРНИЗИРОВАННОМУ ВИБРОЦЕНТРОБЕЖНОМУ РЕШЕТУ

**Тищенко Л.Н., д.т.н., проф., Абдуева Ф.М., к.т.н., ассист.,
Ольшанский В.П., д.ф.-м.н., проф.**

*(Харьковский национальный технический университет сельского
хозяйства имени Петра Василенко)*

На основе гидродинамической теории псевдооживленной сыпучей среды получены выражения для определения объемной производительности и средней скорости движения сходовой фракции зерновой смеси (ЗС) по поверхности вертикального виброцентробежного решета.

Актуальность темы. Разработка теоретических моделей движения зерна в виброцентробежном сепараторе является составной частью проблемы интенсификации процессов сепарирования ЗС [1]. Среди различных математических моделей заслуживает внимания и гидродинамическая теория псевдооживленной сыпучей среды [1, 2, 3]. Согласно этой теории вязкость среды оказывается зависимой от радиальной координаты, определяющей положение частицы в кольцевом слое зерна, движущегося по поверхности решета. Поэтому при строгой постановке задачи гидродинамики ее приходится решать для неоднородной вязкой жидкости, что усложняет получение аналитического решения. Предложим упрощенный вариант модели, в которой кольцевой слой переменной вязкости разделяется на два однородных кольцевых подслоя с разными динамическими коэффициентами вязкости. У подслоя, который ближе к поверхности решета, коэффициент вязкости больше, чем у подслоя, который граничит со свободной поверхностью ЗС. Такая модель ориентирована на расчет движения сходовой фракции при загрузке вибросепаратора на сепарировании продовольственного зерна. Заметим, что разделение движущейся по решету массы зерна на отдельные слои приведено в [4, 5] и других работах. То есть, модель послойного движения сыпучей среды вошла в практику расчетов процессов вибросепарирования зерна.

Постановка краевой задачи. Радиальную координату r (рис.1) отсчитываем от вертикальной оси решета. Движущемуся кольцевому слою зерна толщиной h ставим в соответствие промежуток $r \in [R_0; R]$, где R – радиус решета; $R_0 = (R - h)$ – радиус свободной поверхности слоя. Разделим его на два подслоя. Первый толщиной h_1 граничит со свободной поверхностью, так что в нем $r \in [R_0; R_1]$, $R_1 = R_0 + h_1$. Второй подслоем имеет толщину $h_2 = h - h_1$ и граничит с поверхностью решета, ему соответствует $r \in [R_1; R]$, что показано на рис.1.

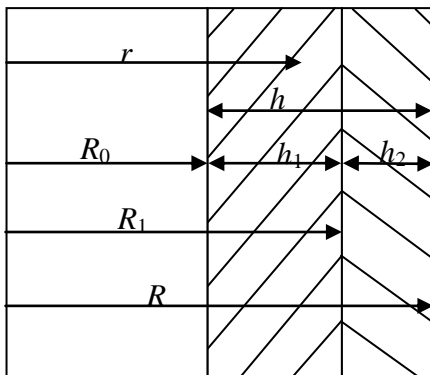


Рис.1. Расчетная схема

Обозначим коэффициенты динамической вязкости псевдожидкости в первом подслое через μ_1 , а во втором – через μ_2 . Их будем вычислять по формуле:

$$\mu = \frac{F_{iT}}{12\omega r_0 \sqrt{(A^*)^2 - \left(\frac{\pi F_{iT}}{2\gamma m \omega^2}\right)^2}}, \quad (1)$$

где $F_{iT} = \frac{1}{2} \xi f \rho (\pi r_0 \Omega)^2 (x_i^2 - R_0^2)$; $x_1 = R_0 + r_0$; $x_2 = R - r_0$; $i = \overline{1;2}$; ω, A^* – частота и амплитуда осевых колебаний решета, которое вращается с угловой скоростью Ω ; r_0, m – усредненные значения радиуса и массы одного зерна сходовой фракции; f – коэффициент сухого внутреннего трения ЗС, имеющей плотность ρ ;

ξ – коэффициент поправки на пористость ЗС; γ – коэффициент присоединенной массы к движущейся частице.

Скорости движения частиц в подслоях $u_1(r)$ и $u_2(r)$ находим, решая дифференциальные уравнения:

$$\frac{d^2 u_i}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du_i}{dr} = N_i, \quad (2)$$

в которых $N_i = -\rho g / \mu_i$; g – ускорение свободного падения, $i = \overline{1;2}$.

Дополним их граничными условиями.

На внутренней поверхности кольцевого слоя нет касательных напряжений.

Поэтому

$$\frac{du_1}{dr} = 0 \text{ при } r = R_0. \quad (3)$$

На поверхности раздела подслоев равны скорости и касательные напряжения, т.е.:

$$u_1(r) = u_2(r); \quad \mu_1 \frac{du_1}{dr} = \mu_2 \frac{du_2}{dr} \text{ при } r = R_1. \quad (4)$$

Четвертое граничное условие (на поверхности решета) зависит от режима работы сепаратора и связано с неравенством

$$f_0(1 - \varepsilon)R\Omega^2 < g, \quad (5)$$

где f_0 – динамический коэффициент сухого трения зерна о поверхность решета; ε – коэффициент его живого сечения.

Если режим работы такой, что соблюдается неравенство (5), то

$$-\mu_2 \frac{du_2}{dr} = \lambda_1 u_2 + \lambda_2 \text{ при } r = R. \quad (6)$$

Здесь λ_1, λ_2 – соответственно коэффициенты, определяющие усредненные напряжения от сил взаимодействия сыпучей среды с рифлями на решете и силы сухого трения ЗС о поверхность решета.

Их можно вычислять по формулам:

$$\lambda_1 = Kh_p b_p n_p p S^{-1}; \quad \lambda_2 = f_0 p \left(1 - \frac{S_0 n_0}{S}\right);$$

где $S = 2\pi Rl$; $p = \frac{1}{2} \rho \Omega^2 (R^2 - R_0^2)$; K – коэффициент рифления;

h_p, b_p – высота и ширина одного рифля; n_p – количество рифлей на решетке, имеющем высоту l ; S_0 – площадь одного отверстия; n_0 – количество отверстий в решетке.

При нарушении неравенства (5) прекращается скольжение сходовой фракции по поверхности решета и граничное условие (6) нужно заменить на

$$u_2(R) = 0. \quad (7)$$

Решение краевой задачи. Общие решения уравнений (2) имеют вид:

$$u_1(r) = \frac{N_1}{4} r^2 + c_1 \ln \frac{r}{R} + c_2, \quad (8)$$

$$u_2(r) = \frac{N_2}{4} r^2 + c_3 \ln \frac{r}{R} + c_4.$$

Входящие в них произвольные постоянные c_1, c_2, c_3, c_4 находим из граничных условий (3), (4), (6) и (7). Для случая, когда выполняется неравенство (5), константы принимают значения:

$$c_1 = -\frac{N_1}{2} R_0^2; \quad c_3 = -\frac{N_2}{2} R_0^2;$$

$$c_4 = -\frac{N_2}{4} R^2 - \frac{\mu_2 N_2}{2 \lambda_1 R} (R^2 - R_0^2) - \frac{\lambda_2}{\lambda_1};$$

$$c_2 = c_4 + \frac{N_2 - N_1}{2} \left(\frac{R_1^2}{2} - R_0^2 \ln \frac{R_1}{R} \right).$$

Если не выполняется неравенство (5), то

$$c_4 = -\frac{N_2}{4} R^2,$$

а остальные выражения констант остаются прежними.

Объемный расход (производительность) определяем интегрированием

$$Q = 2\pi \left(\int_{R_0}^{R_1} r u_1(r) dr + \int_{R_1}^R r u_2(r) dr \right).$$

Выполнив его, с учетом (8), получаем

$$Q = \pi \left\{ (R_1^2 - R_0^2) \left[\frac{N_1}{8} (R_1^2 + R_0^2) + c_2 - \frac{c_1}{2} \right] + \right.$$

$$+ c_1 \left(R_1^2 \ln \frac{R_1}{R} - R_0^2 \ln \frac{R_0}{R} \right) + (R^2 - R_1^2) \times \\ \times \left[\frac{N_2}{8} (R^2 + R_1^2) + c_4 - \frac{c_3}{2} \right] - c_3 R_1^2 \ln \frac{R_1}{R} \}. \quad (9)$$

Среднюю скорость движения сходовой фракции определяем по формуле:

$$u_{cp} = \frac{Q}{\pi(R^2 - R_0^2)}. \quad (10)$$

В случае, когда не соблюдается неравенство (5), а также при больших K , вычисление Q и u_{cp} можно свести к компактным приближенным формулам:

$$Q \approx \tilde{Q} = \frac{2}{3} \pi \rho g R_1 \left\{ \frac{h_1^3}{\mu_1} + \frac{h_2^3}{\mu_2} [1 + 3(1 + \delta)\delta] \right\}; \quad (11)$$

$$u_{cp} \approx \tilde{u}_{cp} = \frac{1}{3} \frac{\rho g}{h} \left\{ \frac{h_1^3}{\mu_1} + \frac{h_2^3}{\mu_2} [1 + 3(1 + \delta)\delta] \right\},$$

в которых $\delta = h_1 h_2^{-1}$. К ним приводит отбрасывание малых слагаемых в решениях (9) и (10), обусловленных тем, что в рассматриваемой задаче $h_1 \ll R$ и $h_2 \ll R$.

Результаты исследований и их анализ. При исследованиях рассматривалось движение ЗС кукурузы, с характеристиками [5]: $\rho = 730 \text{ кг/м}^3$; $r_0 = 0,0037 \text{ м}$, $m = 0,0003 \text{ кг}$, $f = 0,53$. Толщина кольцевого слоя принималась равной $h = 0,008 \text{ м}$ и разбивалась на два подслоя одинаковой толщины $h_1 = h_2 = 0,5h$. Параметры решета имели паспортные значения $R = 0,3075 \text{ м}$; $h_p = 0,0025 \text{ м}$; $b_p = 0,004 \text{ м}$; $l = 0,5 \text{ м}$; $S_0 = 1,25 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$; $n_0 = n_p = 1736 \text{ шт.}$ Рассматривалось два режима колебаний решета: $\omega = 75,9 \text{ с}^{-1}$, $A^* = 0,008 \text{ м}$; $\omega = 96,9 \text{ с}^{-1}$, $A^* = 0,006 \text{ м}$ (кинематические параметры для серийных вибросепараторов типа А1-БЦСМ, СВС производства ОАО «Вибросепаратор» г. Житомир). Коэффициент рифления варьировался в диапазоне $K = 10 \dots 100 \text{ с/м}$. Учитывая понижение значения коэффициента трения кукурузы о металл за счет вибрации

решета, его принимали не 0,37 [5], а – 0,25.

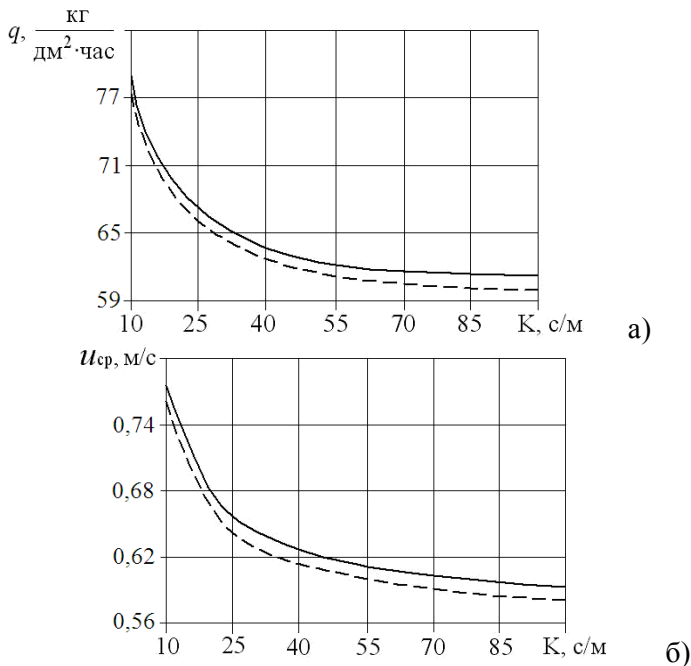


Рис.2. Зависимости удельной производительности а) и средней скорости движения сходовой фракции ЗС б) при сепарировании продовольственного зерна кукурузы от коэффициента рифления решет: _____ - $A^* = 0,008 \text{ м}$, $\omega = 75,9 \text{ с}^{-1}$; - - - - - - - $A^* = 0,006 \text{ м}$, $\omega = 96,9 \text{ с}^{-1}$ ($f_0 = 0,25$; $h = 0,008 \text{ м}$; $S_0 = 1,25 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$; $l = 0,5 \text{ м}$; $h_p = 0,0025 \text{ м}$; $b_p = 0,004 \text{ м}$; $n_0 = n_p = 1736 \text{ шт}$)

Определенные по (9) и (10) значения удельной производительности и средней скорости от коэффициента рифления решет для двух режимов колебаний представлены в виде графических зависимостей на рис. 2.

Анализом полученных зависимостей (рис. 2) установлено аналогичное с сепарированием семенного материала влияние коэффициента рифления на производительность и скорость движения частиц ЗС при сепарировании продовольственного зерна. Так, при увеличении коэффициента рифления в исследуемом диапазоне ($K = 10 \dots 100 \text{ с/м}$) понижаются: удельная

производительность на 21,1-23,3% (до 60...61,5 кг/дм²·час), средняя скорость движения ЗС – на 36-45% (до 0,59...0,6 м/с).

При $K > 100$ с/м определение производительности и средней скорости движения частиц ЗС возможно проводить с помощью уравнений (11), которые являются обобщением результатов работы [1] на случай двухслойной модели.

Экспериментальная идентификация коэффициента рифления K повысит адекватность рассмотренной модели двухслойного течения псевдооживленной сыпучей среды при сепарировании продовольственного зерна (рис. 3).

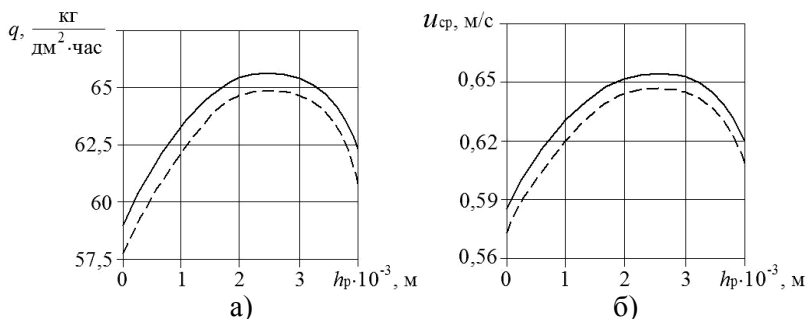


Рис.3. Зависимости удельной производительности а) и средней скорости движения сходовой фракции ЗС кукурузы б) при сепарировании продовольственного зерна от высоты рифлей: — - $A^* = 0,008$ м, $\omega = 75,9$ с⁻¹; - - - - $A^* = 0,006$ м, $\omega = 96,9$ с⁻¹ ($f_0 = 0,25$; $h = 0,008$ м; $S_0 = 1,25 \cdot 10^{-4}$ м²; $n_0 = n_p = 1736$ шт $b_p = 0,004$ м; $l = 0,5$ м)

Анализом полученных зависимостей (рис. 3) установлено, что характер изменения удельной производительности в зависимости от высоты рифлей аналогичен с сепарированием семенного материала. Увеличение высоты рифлей до 0,0025 м повышает удельную производительность и среднюю скорость движения на 10-12% (до 64,9...65,5 кг/дм²·час и 0,65...0,66 м/с, соответственно).

Увеличение высоты рифлей свыше 0,0025 м ведет к снижению удельной производительности на 4,6-6% и средней скорости движения ЗС на 5,3-5,4%.

Учитывая вышесказанное, рациональная высота рифлей решета составит $h_p = 0,0023 \dots 0,003$ м, при удельной производительности 64,7...65,6 кг/дм²·час. При этом средняя

скорость движения сходовой фракции ЗС кукурузы для сепараторов А1-БЦСМ, СВС составит – 0,64...0,66 м/с.

Для исследования влияния площади отверстий разработанного решета на производительность и среднюю скорость движения ЗС построены соответствующие зависимости (рис. 4).

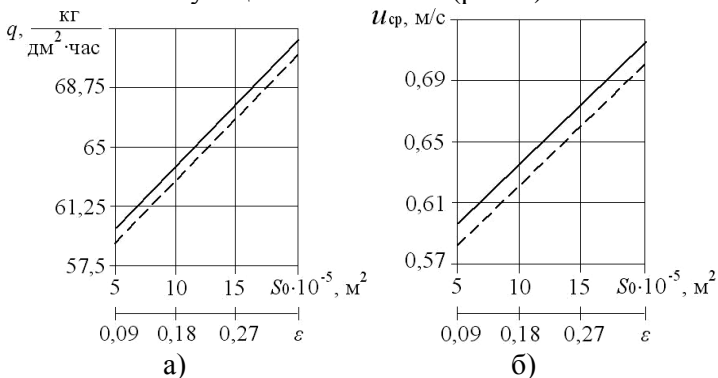


Рис.4. Зависимости удельной производительности а) и средней скорости движения сходовой фракции ЗС кукурузы б) при сепарировании продовольственного зерна от площади отверстий и коэффициента «живого сечения» решета: — - $A^* = 0,008$ м, $\omega = 75,9$ с⁻¹; - - - - - $A^* = 0,006$ м, $\omega = 96,9$ с⁻¹ ($f_0 = 0,25$; $h = 0,008$ м; $l = 0,5$ м; $h_p = 0,0025$ м; $b_p = 0,004$ м; $n_0 = n_p = 1736$ шт)

Анализом полученных зависимостей установлено, что увеличение площади отверстий в исследуемом диапазоне повышает удельную производительность и среднюю скорость движения сходовой фракции на 19,1-19,6% (до 70,8...71,5 кг/дм²·час и 0,7...0,72 м/с, соответственно).

Следует также отметить, что в рассмотренной модели коэффициент рифления остается произвольным, а его значения определяется в ходе экспериментальных исследований. Идентификация параметра K даст возможность согласовать теорию с экспериментом и, тем самым, повысить адекватность рассмотренной модели двухслойного течения псевдооживленной сыпучей среды.

Список литературы

1. Тищенко Л.Н. Интенсификация сепарирования зерна. – Харьков: Основа, 2004. – 224 с.
2. Тищенко Л.Н. Гидродинамические характеристики псевдооживленных сыпучих сред при виброцентробежном сепарировании на зерноперерабатывающих предприятиях // Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних та харчових виробництв: Вісник ХДТУСГ. – Харків: ХДТУСГ, 2001. – Вип. 5. – С. 13-33.
3. Тищенко Л.Н., Абдуева Ф.М., Ольшанский В.П. К исследованию движения зерновой смеси по модернизированному решету виброцентробежного сепаратора при малой загрузке // Зб. наук. праць ЛНАУ. Серія: технічні науки. – Луганськ: вид-во ЛНАУ, 2008. – №87. – С. 366-374.
4. Гортинский В.В., Жиганков Б.В. Исследование двухслойной модели сыпучего тела в приложении к процессам сепарирования // Труды ВНИИЗ. – М., 1974. – Вып. 78. – С. 57-66.
5. Гортинский В.В., Демский А.Б., Борискин М.А. Процессы сепарирования на зерноперерабатывающих предприятиях. Изд. второе. – М.: Колос, 1980. – 304 с.

Анотація

МОДЕЛЬ ДВОШАРОВОГО РУХУ ЗЕРНОВОЇ СУМІШІ ПО МОДЕРНІЗОВАНОМУ ВІБРОВІДЦЕНТРОВОМУ РЕШЕТУ

На основі гідродинамічної теорії псевдорозрідженого сыпучого середовища одержано вирази для визначення об'ємної продуктивності та середньої швидкості руху сходової фракції зернової суміші по поверхні вертикального вібровідцентрового решета.

Abstract

THE MODEL OF DOUBLE-LAYER MOTION OF CORN MIXTURE ON THE MODERNIZED VIBRO-CENTRIFUGAL SIEVE

On the basis of the hydrodynamical model of the fluidized granulated solids the formulae to research the average speed and volume

flow of grain compound layer tailings fraction (separator efficiency), moving on the uprated surface of the vertical vibro-centrifugal sieve were obtained.