

29. Пирогов, В. В. Исследование устойчивости установившихся движений изолированной системы, совершающей плоское движение [Текст] / В. В. Пирогов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – Т. 5, № 7 (77). – С. 9–20. doi: 10.15587/1729-4061.2015.49269
30. Filimonikhina, I. I. Conditions for balancing a rotating body in an isolated system with automatic balancers [Text] / I. I. Filimonikhina, G. B. Filimonikhin // International Applied Mechanics. – 2007. – Vol. 43, Issue 11. – P. 1276–1282. doi: 10.1007/s10778-007-0132-5

*Розглянуто методи моделювання динаміки частинок зернової суміші на віброрешетах, які основані на уточненні принципів гідроаналогії шляхом введення бульбашкового псевдозрідженого середовища. Це визначило можливість інтенсифікації просіювання сумішей на віброрешетах шляхом використання отворів у вигляді епіциклоїди. Для підвищення точності моделювання проведена ідентифікація одного із значущих параметрів процесу просіювання – швидкості проходження суміші через отвори решета*

*Ключові слова: процес просіювання, ефективність, поле швидкості, отвір, псевдозріджене середовище, зернова суміш гороха, гідроаналогія*

*Рассмотрены методы моделирования динамики частиц зерновой смеси на виброрешетах, которые основаны на уточнении принципов гидроаналогии путем введения пузырьковой псевдооживленной среды. Это определило возможности интенсификации просеивания смесей на виброрешетах путем использования отверстий в виде эписциклоиды. Для увеличения точности моделирования проведена идентификация одного из значимых параметров процесса просеивания – скорости прохождения смеси через отверстия решет*

*Ключевые слова: процесс просеивания, эффективность, поле скорости, отверстия, псевдооживленная среда, зерновая смесь гороха, гидроаналогия*

## 1. Введение

Эффективность технологических процессов решетных зерноочистительных машин определяется характером протекания процессов просеивания зерновых смесей (ЗС). Сложная форма семян некоторых сельскохозяйственных культур, например, горох, гречка, нут, кукуруза и т. п., также приводит к низкой эффективности процессов их просеивания на решетках. Наличие отклонений в виде выступов, впадин, асимметрии вершин и сторон, наряду со сложной формой приводит к отличию этих семян от стандартной формы

отверстий: круглой, треугольной и прямоугольной. Это приводит к увеличению количества непроеянных частиц – сходовой фракции, и, как следствие, низкой производительности. При этом потребность в нормированном качестве продовольственного зерна и семенного материала требует повторных пропусков ЗС через зерноочистительную машину, что повышает травмирование зерна и увеличивает эксплуатационные затраты.

Моделирование динамики ЗС на виброрешетах зерновых сепараторов, которое будет учитывать как свойства смеси, так и конструктивно-кинематические

УДК 631.362:53

DOI: 10.15587/1729-4061.2016.65920

# ИДЕНТИФИКАЦИЯ СКОРОСТИ РОХОЖДЕНИЯ ЧАСТИЦ ЗЕРНОВОЙ СМЕСИ ЧЕРЕЗ ОТВЕРСТИЯ РЕШЕТ ВИБРАЦИОННЫХ ЗЕРНОВЫХ СЕПАРАТОРОВ

**Л. Н. Тищенко**

Доктор технических наук, профессор, академик НААН Украины\*  
E-mail: leonid\_tishchenko@yahoo.com

**С. А. Харченко**

Кандидат технических наук, доцент\*\*  
E-mail: kharchenko\_mtf@ukr.net

**Ф. М. Харченко**

Кандидат технических наук, доцент\*  
E-mail: faridakharchenko@gmail.com

**В. В. Бредихин**

Кандидат технических наук, доцент\*  
E-mail: vadimbr76@ukr.net

**О. В. Цуркан**

Кандидат технических наук, доцент  
Кафедра процессов и оборудования перерабатывающих и пищевых производств им. проф. П. С. Берника  
Винницкий национальный аграрный университет  
ул. Солнечная, 3, г. Винница, Украина, 21008  
E-mail: tsurkan\_ov@mail.ru

\*Кафедра физики, теоретической механики и деталей машин \*\*

\*\*Кафедра оптимизации технологических систем им. Т. П. Евсюкова \*\*\*

\*\*\* Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства им. Петра Василенко  
ул. Артема, 44, г. Харьков, Украина, 62001

параметры решет. Это позволит установить перспективы и интенсифицировать процессы просеивания, проектировать новые эффективные решета, что является актуальной и перспективной задачей.

## 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Перспективным способом повышения эффективности процессов просеивания ЗС является применение активаторов различных типов [1]. Так, для интенсификации просеивания ЗС гречки целесообразно применение решет с активаторами в виде трехлепестковых эпициклоидных отверстий вместо треугольных; гороха и нута – решет с пятилепестковыми эпициклоидными отверстиями вместо круглых; кукурузы – прямоугольными объемными активаторами вместо прямоугольных отверстий. Проведенные предварительные исследования [1] доказали возможность повышения эффективности процессов просеивания за счет применения подобных активаторов, однако требуют дальнейшего уточнения значений некоторых параметров.

Наличие вибрации на решетках позволяет интенсифицировать просеивание ЗС, путем создания псевдооживленной среды. Использование материальной точки при исследованиях динамики ЗС получили широкое распространение. Реализация подобных методов имела значительные расхождения с экспериментальными данными, среди существенных сложностей, например, было отсутствие учета в моделировании столкновения частиц ЗС и т. п.

Для описания динамических процессов сепарирования и просеивания сыпучих сред использовали:

- аналогии с перемешиванием материальной частицы [2];
- аналогии перемещения ЗС как движения послыного сыпучего тела [3];
- теории вибрационного перемещения, сегрегации семян в слое, просеивания семян через отверстия решет и их очистки [4];
- оптимизацией кинематических режимов [5];
- аналогии с гидродинамическими моделями [6–9];
- механики сплошных сред [10];
- моделирование вероятности просеивания частиц различными методами, в т. ч. методом Монте-Карло [11, 12];
- метод дискретных элементов [13].

Вместе с тем, эти исследования не имеют системного и комплексного характера, потому что в совокупности и с единых позиций не рассматриваются динамические процессы просеивания различных ЗС через сложные отверстия решет. Кроме того, существующие модели не дают возможности учесть наличие устройств – активаторов просеивания ЗС.

Гидродинамическая аналогия с сыпучей ЗС при математическом моделировании доказала свою состоятельность [6–9]. Для этого псевдооживленная среда характеризуется вязкостью, а среда с целью упрощения и возможности моделирования представлена как псевдооживленная многофазная. Такие аналогии с жидкостью показали свою адекватность при моделировании различных динамических процессов:

- сегрегации (перераспределении частиц слое) [7, 14];
- запыленного воздушного потока (двухфазная среда – воздушный поток и дисперсные частицы) [15];
- разделения ЗС при помощи воздушного потока (трехфазные среды – воздушный поток, зерно, легкие примеси) [16] и т. п.

Однако применение их для описания динамики просеивания ЗС через отверстия виброрешет требует соответствующих дополнений и уточнений.

Отдельные ученые с целью повышения точности моделирования динамических процессов сыпучих смесей учитывали: колебания перфорированного решета с изменениями вибровязкости, сегрегации частиц ЗС [17], дифференциацию загрузки с эффектом стен и многофазностью сред [18]; перемещение смеси путем введения дополнительных критериев – коэффициентов сепарирования и отвода [19], учитывали влажность сыпучей зерновой среды [20]. Однако учет отдельных моментов также не носил обобщающий характер и не давал возможности с необходимой эффективностью проектировать решета вибросепараторов.

Принята гипотеза [21], которая в последующем получила подтверждения [22], об использовании пузырьковой псевдооживленной среды (ППС) при моделировании динамики частиц ЗС. При этом слой ЗС рассматривается как псевдожидкость с пузырьками. Пузырьки характеризуют воздушное пространство между зернами и имеют свои характеристики (вязкость, плотность, концентрация и т. п.). Данный подход позволяет максимально учесть свойства смеси и описывать процессы просеивания ЗС через отверстия решет более реально с минимальным расхождением.

## 3. Цель и задачи исследований

Целью исследований является уточнение математической модели динамики ЗС на плоском виброрешете путем идентификации значимого параметра – скорости прохождения зерна через отверстия различных решет.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- обобщение математической модели динамики ЗС на плоских решетках;
- просчет математических выражений и определение поля скорости ЗС на решетках;
- установление значимых параметров в математической модели;
- разработка методики экспериментальной идентификации значимого параметра, определение диапазонов варьирования параметра для заданной культуры.

## 4. Материалы и методы исследований моделирования динамики частиц ЗС на плоских виброрешетах

### 4.1. Теоретические исследования динамики частиц зерновой смеси

Для моделирования динамики ЗС введена декартова система координат  $x_1, x_2, x_3$ . При этом плоскость  $x_1x_2$  совпадает с плоскостью виброрешета, а ось  $x_3$  направлена вверх перпендикулярно этой плоскости. Виброрешето (ось  $x_1$ ) образует угол  $\theta$  с горизонтальной плоскостью. Поверхность виброрешета рассма-

тривается как двухмерная периодическая структура с периодом  $l_1$  вдоль оси  $x_2$  и с периодом  $l_2$  вдоль оси  $x_3$ . Базовой ячейкой такой структуры есть прямоугольник  $-l_1/2 \leq x_1 \leq l_1/2$ ,  $-l_2/2 \leq x_2 \leq l_2/2$ , на котором размещено  $N$  отверстий  $S_1, S_2, \dots, S_N$ . Периодическая структура (виброрешето) создается трансляцией базовой ячейки вдоль осей  $x_1$  и  $x_2$ , соответственно, на  $nl_1$  и  $nl_2$ , где  $n$  – произвольное целое число. Виброрешето совершает вдоль оси  $x_1$  гармонические колебания с амплитудой  $A$  и круговой частотой  $\omega$ .

Поле скорости  $\vec{V}$  ППС соответствует уравнениям:

$$\rho \left( \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V}, \nabla) \vec{V} \right) = -\nabla P + \mu \Delta \vec{V} + \rho \vec{f}, \quad (1)$$

$$\text{div} \vec{V} = 0, \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность БПС:

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

где  $\bar{\rho}$  – плотность газообразной среды пузырьков;  $\vec{f}$  – внешняя сила, которая действует на единицу массы ППС:

$$\vec{f} = g \sin \theta \vec{e}_1 - g \cos \theta \vec{e}_3, \quad (4)$$

где  $\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3$  – орты декартовой системы координат  $x_1, x_2, x_3$ .

Также принято:  $\vec{V}|_{t < 0} = 0$ ,  $P|_{t < 0} = 0$ .

На свободной поверхности ППС ( $x_3 = h$ ) избыточное давление  $P$  и тензор напряжений  $(\sigma_{ij})_{i,j=1}^3$  возвращается в нуль:

$$P|_{x_3=h} = 0, \quad \sigma_{ij}|_{x_3=h} = 0, \quad i, j = 1, 2, 3, \quad (5)$$

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

$$\sigma_{ij} = -P \delta_{ij} + \mu \left( \frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right). \quad (6)$$

С учетом (5) и (6) имеем, что свободной поверхности ППС поле скорости удовлетворяет условию:

$$\left( \frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right) \Big|_{x_3=h} = 0, \quad i, j = 1, 2, 3. \quad (7)$$

Принимаем краевые условия на поверхности структурного виброрешета. Вводим скорость, которая усреднена по координатам  $x_1$  и  $x_2$ :

$$\vec{V}_{cp} = \frac{1}{S} \iint \vec{V}(x_1, x_2, x_3, t) dx_1 dx_2, \quad (8)$$

где  $S$  – площадь поверхности виброрешета. При  $x_3 = 0$ :  $\vec{V}_{cp}|_{x_3=0} = A\omega \sin \omega t \vec{e}_1$ .

Компонента скорости  $V_3 = (\vec{V}, \vec{e}_3)$  на отверстиях виброрешета совпадает с некоторой средней скоростью  $U_0$ , а вне отверстий возвращается в нуль:

$$V_3|_{x_3=0} = U_0 \begin{cases} 1, & (x_1, x_2) \in \bigcup_{p=1}^N S_p, \\ 0, & (x_1, x_2) \notin \bigcup_{p=1}^N S_p, \end{cases} \quad (9)$$

где  $\bigcup_{p=1}^N S_p$  – количество отверстий на базовой ячейке виброрешета.

Принимаем ограничения на величину скорости  $V_0$  ППС:

$$L/T \gg V_0, \quad v/L \gg V_0,$$

где  $L$  и  $T$  – характерные размеры длины и времени изменения колебательной скорости,  $v$  – эффективный коэффициент кинематической вязкости ( $v = \mu / \rho$ ) [23]. Тогда:

$$L \approx \min(l_1, l_2), \quad T \approx \frac{2\pi}{\omega}, \quad V_0 \approx A\omega, \quad (10)$$

$$\text{при } A < \frac{L}{2\pi}, \quad \omega < \frac{v}{AL}. \quad (11)$$

Так как, виброрешето есть двухмерное с периодической структурой с периодом  $l_1$  вдоль оси  $x_1$  и периодом  $l_2$  вдоль оси  $x_2$ , то решения задачи (1)–(9) найдены в виде двухмерных рядов Фурье по базисными функциями  $\left( e^{i2\pi \left( \frac{n}{l_1} x_1 + \frac{m}{l_2} x_2 \right)} \right)_{n,m=-\infty}^{+\infty}$ :

$$\vec{V} = \sum_{m,n=-\infty}^{+\infty} \vec{V}_{mn}(x_3, t) e^{i2\pi \left( \frac{n}{l_1} x_1 + \frac{m}{l_2} x_2 \right)}, \quad (12)$$

$$P = \sum_{m,n=-\infty}^{+\infty} P_{mn}(x_3, t) e^{i2\pi \left( \frac{n}{l_1} x_1 + \frac{m}{l_2} x_2 \right)}. \quad (13)$$

Таким образом, решения задачи (1)–(9), с учетом (12), (13) имеет – избыточное давление:

$$P = \rho g \cos \theta (h - x_3) - \frac{2U_0 \rho v}{l_1 l_2} \left[ \sum_{n \neq 0} \frac{B_{0n} \text{sh}(\gamma_{0n}(h - x_3))}{A_{0n}} e^{\frac{i2\pi n}{l_1} x_1} + \sum_{m \neq 0} \frac{B_{m0} \text{sh}(\gamma_{m0}(h - x_3))}{A_{m0}} e^{\frac{i2\pi m}{l_2} x_2} + \sum_{n \neq 0} \sum_{m \neq 0} \frac{B_{mn} \text{sh}(\gamma_{mn}(h - x_3))}{A_{mn}} e^{i2\pi \left( \frac{n}{l_1} x_1 + \frac{m}{l_2} x_2 \right)} \right], \quad (14)$$

– компоненты поля скорости  $\vec{V} = V_1 \vec{e}_1 + V_2 \vec{e}_2 + V_3 \vec{e}_3$ :

$$V_1 = \frac{g \sin \theta}{2v} \left[ h^2 - (h - x_3)^2 \right] + A\omega \text{Re} \left[ \frac{\text{ch} \left( \sqrt{\frac{i\omega}{v}} (h - x_3) \right)}{\text{ch} \left( \sqrt{\frac{i\omega}{v}} h \right)} e^{i\omega t} \right] - \frac{i8\pi U_0 (h - x_3)}{l_1^2 l_2} \sum_{n \neq 0} \sum_{m \neq 0} \frac{n B_{mn} \text{ch}(\gamma_{mn}(h - x_3))}{A_{mn}} e^{i2\pi \left( \frac{n}{l_1} x_1 + \frac{m}{l_2} x_2 \right)}, \quad (15)$$

$$V_2 = -\frac{i8\pi U_0 (h - x_3)}{l_1 l_2^2} \sum_{n \neq 0} \sum_{m \neq 0} \frac{m B_{mn} \text{ch}(\gamma_{mn}(h - x_3))}{A_{mn}} e^{i2\pi \left( \frac{n}{l_1} x_1 + \frac{m}{l_2} x_2 \right)}, \quad (16)$$

$$V_3 = -\frac{U_0}{l_1 l_2} \times \sum_n \sum_m \frac{B_{mn} \left[ (h-x_3) \gamma_{mn} \operatorname{sh}(\gamma_{mn}(h-x_3)) - \operatorname{ch}(\gamma_{mn}(h-x_3)) \right]}{A_{mn}} e^{i2\pi \left( \frac{n}{l_1} x_1 + \frac{m}{l_2} x_2 \right)}, \quad (17)$$

где

$$A_{mn} = h \gamma_{mn} \operatorname{sh}(\gamma_{mn} h) - \operatorname{ch}(\gamma_{mn} h),$$

$$\gamma_{mn} = 2\pi \sqrt{\left( \frac{n}{l_1} \right)^2 + \left( \frac{m}{l_2} \right)^2}.$$

Как видно из (14)–(17), функциональная зависимость от изменения  $x_1$  и  $x_2$  избыточного давления и компонент поля скорости определяется коэффициентами  $B_{mn}$ , которые, в свою очередь, существенно зависят от взаимного размещения и геометрических свойств границ (краев) отверстий виброрешета. Эти коэффициенты определяются по уравнению:

$$B_{mn} = \sum_{p=1}^N \iint_{S_p} e^{-i2\pi \left( \frac{n}{l_1} x_1 + \frac{m}{l_2} x_2 \right)} dx_1 dx_2, \quad (18)$$

в котором суммирование проводится по всем отверстиям, размещенным на базовой ячейке виброрешета, в заданном случае на прямоугольнике  $[-l_1/2, l_1/2] \times [-l_2/2, l_2/2]$ .

Коэффициенты  $B_{mn}$  определяли по выражениям:

$$B_{mn} = \sum_{p=1}^N I_{mn}^p, \quad (19)$$

где

$$I_{mn}^p = -\frac{i2\pi e^{-i2\pi \left( \frac{n}{l_1} x_{10}^p + \frac{m}{l_2} x_{20}^p \right)}}{\gamma_{mn}} \int_0^{L_p} e^{-i2\pi \left( \frac{n}{l_1} x_1^p(s) + \frac{m}{l_2} x_2^p(s) \right)} \times \left( \frac{m}{l_2} \cos F(S) - \frac{n}{l_1} \sin F(S) \right) dS.$$

Введены функции, которые параметризуют контур  $C_p$  отверстия  $S_p$ . Функциональная зависимость радиуса кривизны  $R$  контура  $C_p$  от длины дуги  $S$  имеет вид:

$$R^{-1} = f(S), \quad 0 \leq S \leq L_p, \quad (20)$$

где  $L_p$  – длина контура  $C_p$ .

Тогда, функции параметризующие контур  $C_p$  имеют вид:

$$x_1^p = \int_0^S \cos F(S) dS, \quad x_2^p = \int_0^S \sin F(S) dS, \quad (21)$$

где  $F(S)$  выражается через  $f(S)$  по уравнениям:

$$F(S) = \int_0^S f(S) dS. \quad (22)$$

С учетом уравнений, которые характеризуют отверстия решет (19), появилась возможность исследовать формы (рис. 1, а, б), характерные для просеивания ЗС гречки, гороха, нута, кукурузы.

Полученные математические выражения (14)–(18) характеризуют процесс просеивания на плоских виброрешетах для ЗС различных культур. Однако некоторые значимые параметры требуют уточнений, теоретическое определение которых усложнено. Одним из таких параметров есть скорость прохождения частиц ЗС через отверстия решета  $V_0$ . При моделировании этот параметр показывает, с какой скоростью ППС вытекает из отверстия, в нашем случае – из серийных и разработанных.

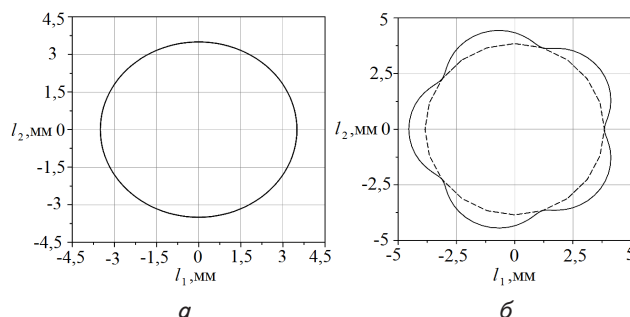


Рис. 1. Геометрия отверстий: а –  $R=0,0035$  м;  $k=0$  (круг); б –  $R=0,0035$  м;  $k=5$  (пятилепестковая эпициклоида)

Теоретическое определение скорости прохождения ППС через отверстия проводили по выражению:

$$V_0 = Q \frac{l_1 l_2}{\Pi N \sum_{m,n=-\infty}^{\infty} |B_{mn}|^2 D_{mn}}, \quad (23)$$

где  $N$  – количество отверстий решета;  $Q_{\Pi}$  – производительность проходовой фракций ППС:

$$Q_{\Pi} = V_3^{cp} \bar{S}, \quad (24)$$

$$V_3^{cp} = \frac{V_3 \Big|_{x_3=0}}{S_{or} l_1 l_2} \sum_{m,n=-\infty}^{\infty} |B_{mn}|^2 D_{mn}, \quad (25)$$

где  $\bar{S}_{or}$  – площадь отверстий на базовой ячейке решета;  $v$  – кинематический коэффициент ППС;

$$B_{mn} = \int_{S_{or}} e^{-i2\pi \left( \frac{n}{l_1} x_1 + \frac{m}{l_2} x_2 \right)} dx_1 dx_2;$$

$$D_{mn} = \frac{1 - \frac{2}{\gamma_{mn} h} + \operatorname{th}(\gamma_{mn} h)}{\gamma_{mn} h + \operatorname{th}(\gamma_{mn} h) - 1},$$

$$\gamma_{mn} = 2\pi \sqrt{\left( \frac{n}{l_1} \right)^2 + \left( \frac{m}{l_2} \right)^2}.$$

Коэффициент  $B_{mn}$  зависит от формы отверстий решета. Толщина зернового слоя  $h$  рассчитывается по уравнению:

$$h = \left( h_0^3 - \frac{3V_0 L v}{g \sin \theta} \right)^{1/3}, \quad (26)$$

где  $L, H$  – длина и ширина решета, соответственно;  $l_1, l_2$  – длина и ширина базовой ячейки решета, соответственно.

## 5. Результаты исследований динамики частиц ЗС

### 5.1. Результаты теоретических исследований

Теоретические исследования апробированы на просеивании ЗС гороха при следующих параметрах: амплитуда и частота колебаний решета  $A=0,0075$  м,  $\omega=48,12$  рад/с; размеры базовой ячейки  $l_1=l_2=0,009$  м; коэффициент динамической вязкости и плотность пузырьков  $\mu_{\text{п}}=1,78 \times 10^{-5}$  Па с,  $\rho=1,21$  кг/м<sup>3</sup>; коэффициент концентрации пузырьков  $\delta_{\text{п}}=0,3$ ; плотность зерна –  $\rho_{\text{р}}=750$  кг/м<sup>3</sup>; коэффициент концентрации зерна  $\delta_{\text{р}}=0,7$ ; коэффициент формы зерна  $k_f=0,9$ ; линейный диаметр зерна  $a=0,003$  м; высота слоя ЗС  $h=0,0195$  м; коэффициент трения зерна  $f=0,5$ ; угол наклона решета  $\theta=8^\circ$ ; длина и ширина решета  $L=1$  м,  $H=1$  м; радиус неподвижной окружности эпициклоиды  $R=0,0035$  м; модуль эпициклоиды (количество лепестков)  $k=5$ . При этом моделировалась динамика ЗС гороха на решетках с круглыми отверстиями (серийными) и с пятилепестковыми эпициклоидными отверстиями (разработанные).

В результате моделирования получены зависимости составляющих скорости ППС (рис. 2) и объемной производительности решета (рис. 3) от скорости прохождения смеси через отверстия решета.

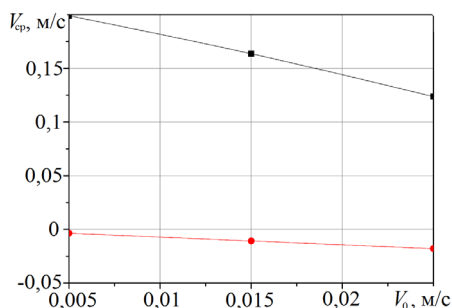


Рис. 2. Зависимости составляющих скорости псевдооживленной пузырьковой смеси от скорости прохождения смеси через отверстия решета:

■ —  $V_{1cp}$  (проходная); ● —  $V_{3cp}$  (вертикальная)

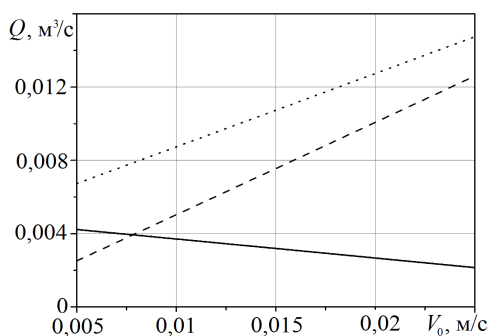


Рис. 3. Зависимости объемной производительности решета от скорости прохождения псевдооживленной смеси через его отверстия: —  $Q_c$  (сходовая); - - -  $Q_n$  (проходовая); .....  $Q$  (общая)

Учитывая работы [24, 25], свойства ЗС гороха для апробирования математической модели (14)–(18) выбран следующий исходный диапазон варьирования скорости прохождения ЗС через отверстия решет  $V_0=0,005–0,025$  м/с. Анализом полученных зависимостей (рис. 2) установлено, что в исследуемых диапа-

зонах увеличение скорости прохождения частиц ППС через отверстия ( $V_0$ ) вызывает снижение продольной составляющей скорости  $V_{1cp}$  на 37,5 % до 0,124 м/с. Противоположная ситуация наблюдается с другой составляющей – вертикальной  $V_{3cp}$ , которая характеризует перераспределение частиц ЗС по толщине слоя и определяет количество просеянных частиц через решето. Увеличение скорости прохождения частиц ППС через отверстия в исследуемом диапазоне повышает вертикальную составляющую скорости  $V_{3cp}$ , которая определяет процесс просеивания ЗС, до 0,0179 м/с.

Аналогично с исследованиями скорости ППС изучено влияние ее скорости прохождения через отверстия решет на производительность (рис. 3). Анализом зависимостей установлено, что увеличение скорости прохождения через отверстия решет положительно влияет (повышает) на производительность проходовой фракции и отрицательно (снижает) – на производительность сходовой. Так, установлено, что увеличение скорости прохождения ЗС зернобобовых культур через отверстия решет снижает производительность сходовой фракции на 49,3 % с 0,0041 м<sup>3</sup>/с до 0,0021 м<sup>3</sup>/с, и наоборот, повышает в 5 раз производительность проходовой фракции с 0,0023 м<sup>3</sup>/с до 0,0126 м<sup>3</sup>/с. При этом общая производительность, в зависимости от  $V_0$ , может повышаться в 2,2 раза с 0,0068 м<sup>3</sup>/с до 0,0147 м<sup>3</sup>/с. Это также подтверждает значимость параметра  $V_0$  на эффективность процесса просеивания ЗС.

### 5.2. Результаты экспериментальных исследований определения скорости прохождения зерновой смеси гороха через отверстия виброрешет

Для экспериментальной идентификации данного параметра принята методика, суть которой заключается в определении расхода сыпучей среды – количества ЗС, которое просеялось через отверстия решет за определенное время. Отношение данного количества ЗС к площади отверстий позволяет определить скорость их просеивания:

$$V_0 = Q_{\text{п}} / \bar{S}. \tag{27}$$

Экспериментальные исследования проведены на лабораторном плоскорешетном сепараторе СМ-0,15 в лаборатории зерноочистительных машин Харьковско-го национального технического университета сельского хозяйства имени Петра Василенко (Украина). Апробация методики проведена на ЗС гороха при их просеивании на серийных решетках с круглыми отверстиями и разработанных с пятилепестковыми эпициклоидными отверстиями.

Экспериментальные исследования проведены при следующих параметрах процесса просеивания: площадь решета 14,9 дм<sup>2</sup>; количество отверстий серийного и разработанного решет 1755 шт, 1525 шт; площадь отверстия серийного и разработанного решет 0,000038 м<sup>2</sup>, 0,00004 м<sup>2</sup>; масса 1000 семян сходовой и проходовой фракций 275 г, 147 г; плотность семян 750 кг/м<sup>3</sup>; исходное содержание проходовой фракции в ЗС составило 20 %.

В результате исследований получены зависимости скорости прохождения ЗС через отверстия от загрузки решета (рис. 4).

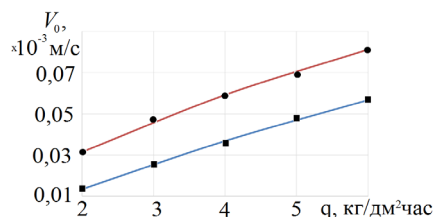


Рис. 4. Зависимости скорости прохождения зерновой смеси гороха через отверстия от загрузки решета:  
 —■— — серийные решета с круглыми отверстиями;  
 —●— — разработанные решета с пятилепестковыми эллиптическими отверстиями

Анализом данных экспериментальных зависимостей (рис. 4) уточнены диапазоны варьирования скоростей прохождения ЗС через круглые отверстия серийных решет, которые составили  $0,013...0,057 \times 10^{-3}$  м/с; через пятилепестковые эллиптические отверстия разработанных решет –  $0,032...0,081 \times 10^{-3}$  м/с.

#### 6. Обсуждение результатов идентификации и влияния скорости прохождения частиц на процесс просеивания ЗС

Апробирование полученных обобщенных математических выражений позволили получить поле скорости ЗС и закономерности изменения производительности для различных решет. Анализом зависимостей (рис. 2, 3) установлено, что значимым параметром есть скорость прохождения частиц ЗС через отверстия решет, варьирование которого существенно (в 2,2 раза) изменяет производительность решет. При этом в ходе теоретических исследований установлено, что использование разработанных решет с эллиптическими отверстиями значительно повышает эффективность процесса просеивания ЗС.

Полученные теоретические исследования подтверждают значимость скорости прохождения ЗС через отверстия решет на эффективность процесса их просеивания. Однако с целью уточнения диапазона варьирования этого параметра проведена его экспериментальная идентификация по принятой методике.

Анализом экспериментальных зависимостей (рис. 4) получены диапазоны варьирования скоростей прохождения ЗС через отверстия серийных и разработанных решет. Превышение скорости прохождения ЗС  $V_0$  на разработанных решетках составило в 1,4...2,3 раза больше чем на серийных, что подтверждает возможность интенсификации эффективности процесса просеивания.

Скорость прохождения ЗС через отверстия является комплексным параметром, который включает: пе-

рераспределение семян в слое ЗС, ориентацию их в отверстия и прохождение через них. Отклонение семян ЗС гороха от идеальной круглой формы приводит к их неэффективному просеиванию, т. е. к увеличению количества семян которые попали в сходовую фракцию. Применение решет с эллиптическими отверстиями позволяют не только нивелировать отклонения формы при просеивании, но и ориентировать семена в отверстия. Комплексное воздействие на семена данных активаторов позволяет увеличить количество просеянных частиц ЗС, что повышает производительность зерновых виброрешетных сепараторов.

#### 7. Выводы

1. Анализ теоретических исследований процессов сепарации и просеивания сыпучих сред, обобщение промежуточных результатов проведенных автором, позволили получить математическую модель динамики пузырьковой псевдооживленной среды на плоских виброрешетах на основе гидроанalogии, которая позволяет описывать движение сходовых и проходных частиц ЗС. В модели учтены конструктивно-кинематические параметры решета и свойства смеси, новые формы отверстий в виде эллипса с соответствующими радиусами, загрузка решета, вязкость и скорость прохождения смеси через отверстия.

2. В результате апробации математической модели получены закономерности изменения поля скорости: продольной и вертикальной составляющей, производительности для серийных и разработанных решет на примере ЗС гороха. Установлено повышение эффективности просеивания от применения решет с пятилепестковыми эллиптическими отверстиями за счет ориентации и нивелирования отклонения от идеальной форм семян ЗС гороха.

3. Анализом полученных теоретических зависимостей установлен один из значимых параметров процесса просеивания ЗС – скорость ее прохождения через отверстия виброрешета, величины его влияния на поле скорости и производительность процесса просеивания.

4. Разработанной методикой, основанной на изменении расхода вещества через площадь отверстий решета, удалось идентифицировать диапазоны варьирования реальной скорости прохождения, на примере ЗС гороха, на различных решетках. Установлено превышение скорости прохождения ЗС через отверстия разработанного решета в 1,4...2,3 раза, что подтверждает эффективность их применения по сравнению с серийными. Данная методика может широко использоваться при моделировании динамики сыпучих сред, а также для идентификации скорости прохождения через отверстия виброрешет различных ЗС.

#### Литература

1. Тищенко, Л. Сепарация гороха та нуту [Текст] / Л. Тищенко, С. Харченко, О. Василенко, В. Пуха // The Ukrainian Farmer. – 2014. – № 4. – С. 94–95.
2. Блехман, И. И. Вибрационная механика [Текст] / И. И. Блехман. – М.: Физматлит, 1994. – 400 с.
3. Гортинский, В. В. Процессы сепарирования на зерноперерабатывающих предприятиях; 2-е изд., перераб. и доп. [Текст] / В. В. Гортинский, А. Б. Демский, М. А. Борискин. – М.: Колос, 1980. – 304 с.
4. Заика, П. М. Динамика вибрационных зерноочистительных машин [Текст] / П. М. Заика. – М.: Машиностроение, 1977. – 278 с.

5. Миняйло, А. В. Исследование процесса сепарирования семян на плоских горизонтальных виброрешетах [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / А. В. Миняйло. – Харьков: ХИМЭСХ, 1973. – 165 с.
6. Tishchenko, L. N. On velocity profiles of an inhomogeneous vibrofluidized grain bed on a shaker [Text] / L. N. Tishchenko, V. P. Ol'shanskii, S. V. Ol'shanskii // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2011. – Vol. 84, Issue 3. – P. 509–514. doi: 10.1007/s10891-011-0498-4
7. Тищенко, Л. Н. Математическая модель процесса сегрегации зерновых смесей при се-парировании плоскими вибрационными решетками [Текст] / Л. Н. Тищенко, М. В. Пивень, С. А. Харченко // Механізація сільськогосподарського виробництва: Вісник ХНТУСГ. – 2010. – Вип. 103. – С. 12–20.
8. Тищенко, Л. Н. Моделирование процессов зерновых сепараторов [Текст]: монография / Л. Н. Тищенко, Д. И. Мазоренко, М. В. Пивень, С. О. Харченко, В. В. Бредихин, А. В. Мандрыка. – Харьков: «Міськдрук», 2010. – 360 с.
9. Kharchenko, S. Modeling the dynamics of the grain mixtures with the screening on cylindrical vibrating sieve separators [Text] / S. Kharchenko // ТЕКА. Commission of motorization and energetics in agriculture. – 2015. – Vol. 15, Issue 3. – P. 87–93.
10. Paolotti, D. Dynamical properties of vibrofluidized granular mixture [Text] / D. Paolotti, C. Cattuto, U. Marini, B. Marconi, A. Puglisi // arXiv:cond-mat/0207601. – 2002. – Vol. 1, Issue 25.
11. Pascoe, R. D. Prediction of automated sorter performance utilising a Monte Carlo simulation of feed characteristics [Text] / R. D. Pascoe, R. Fitzpatrick, J. R. Garratt // Minerals Engineering. – 2015. – Vol. 72. – P. 101–107. doi: 10.1016/j.mineng.2014.12.026
12. Pelevin, A. E. Probability of particles passing through the sieve openings and separation process in vibrational screening devices [Text] / A. E. Pelevin // Izvestiya vuzov. – 2011. – Min J (1). – P. 119–129.
13. Boac, J. M. Applications of discrete element method in modeling of grain postharvest operations [Text] / J. M. Boac, R. P. K. Ambrose, M. E. Casada, R. G. Maghirang, D. E. Maier // Food Engineering Reviews. – 2014. – Vol. 6, Issue 4. – P. 128–149. doi: 10.1007/s12393-014-9090-y
14. Ma, X.-D. Simulation of grain segregation under horizontal rotational oscillations [Text] / X.-D. Ma, Y.-B. Zhang, Y. Liu, X.-W. Zheng // Granular Matter. – 2016. – Vol. 18, Issue 8. – P. 1–6. doi: 10.1007/s10035-015-0598-5
15. Тищенко, Л. Н. Использование гидродинамической аналогии с применением уравнений Навье-Стокса для решения задач очистки воздушного потока в пылесосадных камерах зерноочистительных сепараторов [Текст] / Л. Н. Тищенко, С. А. Харченко, Ф. М. Харченко // Інженерія природокористування. – 2014. – № 1. – С. 56–64.
16. Слипченко, М. В. Исследование очистки зерновых смесей при сходе с тарельчатого разбрасывателя пневмосепарирующего устройства виброцентробежного сепаратора [Текст] / М. В. Слипченко // Motrol. Commission and Energetacs in Agriculture. – 2014. – Т. 16, № 7. – С. 89–91.
17. Rahou, F. Numerical Simulation of the Continuous Operation of a Tribo-aero-electrostatic Separator for Mixed Granular Solids [Text] / F. Rahou, A. Tilmatine, M. Bilici, L. Dascalescu // Journal of Electrostatics. – 2012. – Vol. 71, Issue 5. – P. 867–874. doi: 10.1016/j.elstat.2013.06.004
18. Akhmadiev, F. G. Separation Processes of Granular Materials by Sizes at the Sieve Classifiers [Text] / F. G. Akhmadiev, R. F. Gizzjatov // Journal of Chemistry and Chemical Engineering. – 2013. – Vol. 1, Issue 7. – P. 56–63.
19. Ravshanov, N. Mathematical Model of suspension Filtration and Its Analytical Solution [Text] / N. Ravshanov, B. Palvanov, Y. Islamov // European researcher. – 2013. – Vol. 58, Issue 9-1. – P. 2185–2192.
20. Panasiewicz, M. The technique and analysis of the process of separation and cleaning grain materials [Text] / M. Panasiewicz, P. Sobczak, J. Mazur, K. Zawi lak, D. Andrejko // Journal of Food Engineering. – 2012. – Vol. 109, Issue 3. – P. 603–608. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2011.10.010
21. Тищенко, Л. К применению методов механики сплошных сред для описания движения зерновых смесей на виброрешетах [Текст] / Л. Тищенко, С. Харченко // MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. – Lublin-Rzeszow. – 2013. – Vol. 15, Issue 7. – P. 94–99.
22. Харченко, С. А. Построение решений уравнений динамики зерновых смесей на плоских виброрешетах [Текст] / С. А. Харченко // Конструювання, виробництво та експлуатація с.г. машин. – 2013. – Вип. 43, Ч. I. – С. 287–292.
23. Харченко, С. А. Алгоритм расчета эффективного коэффициента динамической вязкости пузырьковой псевдожидкости, моделирующей сепарируемую зерновую смесь [Текст] / С. А. Харченко, Л. Н. Тищенко // Вібрації в техніці та технологіях. – 2013. – № 2 (70). – С. 64–72.
24. Ямпиров, С. С. Технологические и технические решения проблемы очистки зерна решетками [Текст] / С. С. Ямпиров. – Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ, 2004. – 165 с.
25. Gaur, P. M. Chickpea Seed Production Manual [Text] / P. M. Gaur, S. Tripathi, C. L. L. Gowda, G. V. Ranga Rao, H. C. Sharma, S. Pande. M. Sharma. – Chickpea Seed Production Manual. International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics, 2010. – 28 p.