

## Движение верхнего слоя зерновой смеси на вибрирующей рифленной поверхности

Сергей А. Мачихин	<sup>1</sup>	fondprod@rambler.ru
Александр А. Рындин	<sup>2</sup>	aleksandr-ryndin@rambler.ru
Александр М. Васильев	<sup>1</sup>	smachexpert@rambler.ru
Алла Н. Стрелюхина	<sup>1</sup>	alstrel@rambler.ru

<sup>1</sup> Московский государственный университет пищевых производств, Волоколамское шоссе, 11, г. Москва, 125080, Россия

<sup>2</sup> МСХА имени К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, 49, г. Москва, 127550, Россия

**Аннотация.** Наиболее неблагоприятные условия для осуществления сепарирования возникают в том случае, когда примеси и чистое зерно распределены равномерно. Поэтому слой сыпучей зерновой смеси должен проходить предварительную подготовку к участию в процессе, что может быть оценено с помощью анализа кинематических параметров движения частиц зернового потока, что и является целью данного исследования. Приведено описание рабочего органа и процесса вибрационного перемещения зерновой смеси. Для описания вибрационного перемещения зерновой смеси рассмотрена двуслойная модель, в которую внесены изменения, обусловленные наличием на опорной поверхности рифлей в виде прямолинейных пластин. При исследовании движения верхнего слоя зернового потока рассматриваем движение материальной точки на наклонной плоскости, совершающей горизонтальные гармонические колебания перпендикулярно линии наибольшего ската. Рассмотрение схемы сил, действующих на частицу в относительном движении и условий движения частицы, дало возможность записать дифференциальное уравнение относительного движения в проекциях на оси координат. Преобразования полученных зависимостей позволили определить минимальную силу инерции, при которой начнется относительное движение. Введя понятия и обозначения фазовых углов, при которых начинается и заканчивается относительное скольжение частицы, определили вид зависимости скорости частицы при ее скольжении. Были получены зависимости перемещения частицы в положительных и отрицательных направлениях осей  $x$  и  $y$ , зависимости полных перемещений по осям, а так же значения средней скорости частицы вдоль оси  $x$ . Рассмотрена модель двуслойного вибрационного перемещения зернового потока по поверхности с рифлями в виде прямоугольных пластин при их расположении перпендикулярно направлению колебаний.

**Ключевые слова:** сепарирующие машины, самосортирование, опорная поверхность, рифли, частота колебаний, амплитуды колебаний

## Movement of the top layer of the grain mixture on the vibrating grooved surface

Sergej A. Machyhin	<sup>1</sup>	fondprod@rambler.ru
Aleksandr A. Ryndin	<sup>2</sup>	aleksandr-ryndin@rambler.ru
Aleksandr M. Vasiliev	<sup>1</sup>	smachexpert@rambler.ru
Alla N. Streljuhina	<sup>1</sup>	alstrel@rambler.ru

<sup>1</sup> Moscow State University of Food production, Volokolamskoe Highway, 11, Moscow, 125080, Russia

<sup>2</sup> Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Timiryazevskaya str., 49, Moscow, 127550, Russia

**Abstract.** The most unfavourable conditions for the implementation of separation arise in the case where the impurities and clean the grain evenly distributed. Therefore, a layer of granular grain mixture should be pre-prepared for participation in the process, which can be estimated by analyzing the kinematic parameters of the movement of grain particles, which is the purpose of this study. The description of the working body and the process of vibration movement of the grain mixture is given. To describe the vibrational movement of the grain mixture, a two-layer model is considered, in which changes are made due to the presence of ruffles in the form of rectilinear plates on the support surface. In the study of the movement of the upper layer of the grain flow, we consider the movement of a material point on an inclined plane that makes horizontal harmonic oscillations perpendicular to the line of the greatest slope. Consideration of the scheme of forces acting on the particle in relative motion and the conditions of motion of the particle, made it possible to write the differential equation of relative motion in the projections on the coordinate axis. The transformations of the obtained dependences allowed us to determine the minimum force of inertia at which the relative motion will begin. By introducing the concepts and designations of the phase angles at which the relative sliding of a particle begins and ends, we determined the type of dependence of the particle velocity upon its sliding. The dependences of the particle movement in the positive and negative directions of the  $x$  and  $y$  axes, the dependence of the total displacements along the axes, as well as the average particle velocity along the  $x$  axis were obtained. The model of the two-layer vibrational movement of the grain flow along the surface with the ruffles in the form of rectangular plates at their arrangement perpendicular to the direction of oscillations was Considered.

**Keywords:** separating machines, self-sorting, reference surface, riffs, oscillation frequency, oscillation amplitude

Для цитирования

Мачихин С.А., Рындин А.А., Васильев А.М., Стрелюхина А.Н. Движение верхнего слоя зерновой смеси на вибрирующей рифленной поверхности // Вестник ВГУИТ. 2018. Т. 80. № 4. С. 55–62. doi:10.20914/2310-1202-2018-4-55-62

For citation

Machyhin S.A., Rindin A.A., Vasilyev A.M., Streljuhina A.N. Movement of the top layer of the grain mixture on the vibrating grooved surface. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET]. 2018. vol. 80. no. 4. pp. 55–62. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2018-4-55-62

### Введение

Разделение (сепарирование) сыпучих смесей по разности размеров частиц или по разности плотностей широко используется в различных отраслях промышленности. Например, в пищевой при очистке продовольственного и семенного зерна [1–18], на горнообогатительных предприятиях при отделении руды от пустой породы и т. д. Большой вклад в развитие вибрационного сепарирования зернопродуктов внесли В.В. Гортинский, А.Б. Демский, М.А. Борискин, В.Ф. Веденев и еще ряд преподавателей кафедры «Теории машин и механизмов» Московского государственного университета пищевых производств. При зернопереработке сепарирование осуществляется в основном с целью очистки зерна от легких и тяжелых примесей, крупных и мелких примесей, от неполноценных зерен, от семян сорных растений. При этом часто используют очистительные машины с плоскими ситами, совершающими колебательные движения с целью повышения эффективности процесса разделения смеси, для увеличения производительности машин, а также качества разделения. При этом значительное влияние на процесс оказывает конструкция рабочих органов и их кинематические параметры.

Заметим, что непосредственно сепарирование (разделение) происходит в ограниченной по габаритам зоне, за ограниченное время: у ситовых машин над поверхностью перфорированного сита; у воздушных сепараторов в объеме, где происходит контакт ниспадающего слоя зерна, подаваемого часто вибрационным питателем, и восходящего потока очищенного воздуха. Неблагоприятные условия для осуществления сепарирования возникают в том случае, когда примеси и чистое зерно распределены равномерно. Было бы целесообразно иметь большую часть мелких примесей ближе к ситам (при ситовом разделении), а легких примесей – в верхней части слоя, подаваемого в воздушный сепаратор. Таким образом, слой сыпучей зерновой смеси должен проходить предварительную подготовку к участию в процессе, что может быть оценено с помощью анализа кинематических параметров частиц зернового потока, что и является целью данного исследования.

Основное отличие описанного ниже рабочего органа заключается в том, что наклонной рабочей поверхности с рифлями задается вибрационное перемещение перпендикулярное линии наибольшего ската, т.е. перпендикулярно рифлям. Рифли способствуют более качественному разделению зернового потока по массе

и размеру зерна за время его движения от начала до окончания поверхности. Положительным результатом данного процесса можно считать более интенсивное всплывание легких частиц.

### Описание рабочего органа и процесса вибрационного перемещения зерновой смеси

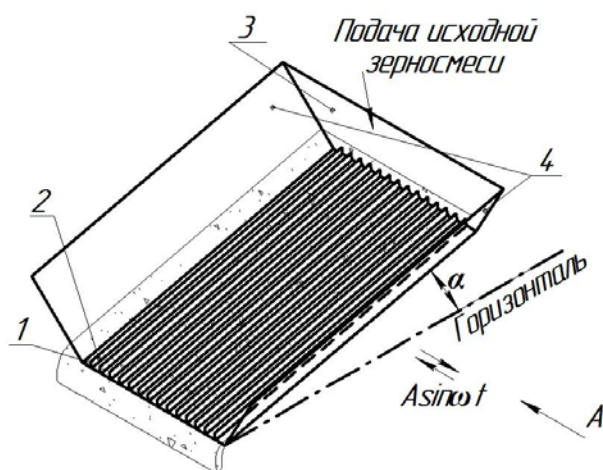
Плоская рабочая поверхность 1 (рисунок 1), наклонённая к горизонтали под углом  $\alpha$ , совершает поступательные гармонические колебания по прямой, образующей с линией наибольшего ската поверхности угол, равный  $90^\circ$ . Ранее была опубликована работа [3], в которой этот угол был менее  $90^\circ$ . На рабочей поверхности на некотором расстоянии друг от друга расположены рифли 2, которые выполнены в виде прямолинейных пластин. Рифли установлены параллельно друг другу вдоль линии наибольшего ската рабочей поверхности. Зерновая смесь равномерно поступает на приёмный участок рабочей поверхности, расположенный у торцевой стенки 3. Зерновая смесь под действием колебаний образует на рабочей поверхности поток постоянной толщины, непрерывно движущийся от приёмного участка к противоположному сходовому участку поверхности. Толщина зернового потока больше высоты рифлей.

Частицы зерновой смеси, расположенные на различных расстояниях от рабочей (опорной) поверхности, имеют различия в движении вследствие неодинаковых условий связи с окружающими частицами и опорной поверхностью. Наименьшей подвижностью обладают частицы нижнего слоя зернового потока, заполняющие пространство между рифлями опорной поверхности.

Нижний слой зернового потока совершает колебания вместе с рабочей поверхностью. Верхний слой связан с нижним только силами трения, причем коэффициент сопротивления сдвигу слоёв уменьшается по мере приближения к верхней (свободной) поверхности зернового потока. Это обуславливает интенсивное послойное движение сыпучего тела и сопутствующее ему самосортирование, которое заключается во всплывании в верхние слои частиц меньшей плотности и большего размера и в погружении в нижние слои зернового потока частиц большей плотности и меньшего размера.

Расположение рифлей перпендикулярно направлению колебаний означает, что нижний слой зернового потока неподвижен относительно поверхности в направлении её колебаний. Таким образом, на рабочей поверхности созданы условия для повышения интенсивности послойного движения зернового потока.

Интенсивность послынного движения сыпучего тела оценивают степенью различия скоростей верхнего и нижнего слоёв потока. Скорость нижнего слоя в направлении колебаний равна нулю. Так как эффективность процесса самосортирования находится в прямой зависимости от интенсивности послынного движения зерновой смеси, то это означает, что на рабочей поверхности созданы наиболее благоприятные условия для протекания процесса самосортирования.



Вид А

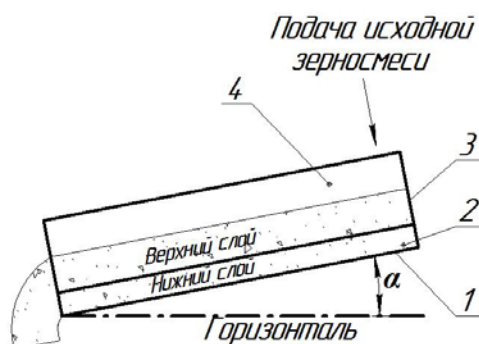


Рисунок 1. Схема рабочего органа и потока сыпучего тела на вибрирующей поверхности при непрерывной подаче исходной зерносмеси

Figure 1. The scheme of the working body and the flow of the bulk body on the vibrating surface with a continuous supply of the initial grain mixture

При колебаниях рабочего органа частицам сыпучего тела от ограничивающих его поверхностей передаются силовые импульсы, которые должны обеспечивать выполнение следующих условий. Во-первых, транспортирование зерновой смеси вдоль рабочей поверхности. Во-вторых, одинаковую на всей площади опорной поверхности интенсивность самосортирования зерновой смеси. Выполнение этих условий зависит от величины и направления силовых импульсов.

При осуществлении процессов сепарирования угол  $\alpha$  наклона рабочей поверхности к горизонтали должен быть выбран таким, чтобы рабочая поверхность была самотормозящей. Следовательно, должно быть обеспечено направленное в среднем движение (транспортирование) зерновой смеси вдоль рабочей поверхности.

Верхний слой зернового потока совершает движение относительно поверхности под действием двух взаимно перпендикулярных сил: силы инерции переносного движения и составляющей силы тяжести (скатывающей силы), направленной вдоль линии наибольшего ската поверхности. При этом частицы верхнего слоя совершают сложное движение, которое может быть представлено состоящим из движений в двух взаимно перпендикулярных направлениях: «быстрое» колебательное движение относительно линии наибольшего ската и «медленное» движение вдоль линии наибольшего ската.

Для описания вибрационного перемещения зерновой смеси на предлагаемой опорной поверхности рассмотрим, как это сделано в работах [2, 3], двуслойную модель, в которую внесем изменения, обусловленные наличием на опорной поверхности рифлей в виде прямолинейных пластин. Будем считать верхний слой материальной точкой массой  $m_b$ , которая связана силами сухого трения с нижним слоем, совершающим колебания вместе с рабочим органом. Следовательно, при исследовании движения верхнего слоя зернового потока будем рассматривать движение материальной точки на наклонной плоскости, совершающей горизонтальные гармонические колебания в направлении, перпендикулярном линии наибольшего ската. При исследовании движения нижнего слоя рассмотрим элемент объёма между смежными рифлями, считая его материальной точкой, которая движется между смежными рифлями без образования зазоров и, следовательно, без ударов о боковые поверхности рифлей. При этом вследствие колебаний рабочего органа материальная частица имеет попеременно силовой контакт с боковой поверхностью то одной рифли, то другой.

## Результаты и обсуждение

### Движение верхнего слоя

Сложное движение материальной частицы рассмотрим как сумму переносного (вместе с рабочей поверхностью) и относительного (относительно поверхности) в системе координат  $x, y, z$ , жестко связанной с рабочим органом. Оси системы координат расположены следующим образом: ось  $x$  направлена вдоль рифлей

(пластин); ось  $y$  – перпендикулярно пластинам (перпендикулярно линии наибольшего ската поверхности); ось  $z$  – перпендикулярно плоскости рабочей поверхности (рисунок 2).

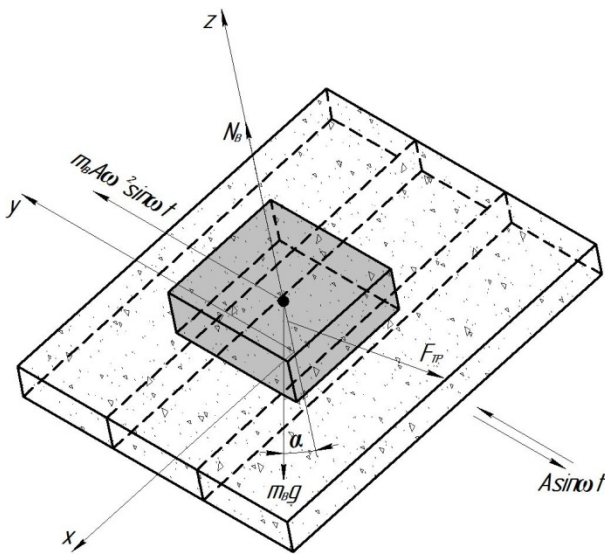


Рисунок 2. Схема сил, действующих на частицу в относительном движении

Figure 2. Scheme of forces acting on a particle in relative motion

Рабочая поверхность совершает горизонтальные гармонические колебания по закону

$$\left. \begin{aligned} y &= A \sin \omega t \\ \dot{y} &= A \omega \cos \omega t \\ \ddot{y} &= -A \omega^2 \sin \omega t \end{aligned} \right\},$$

где  $A$  и  $\omega$  – амплитуда и частота колебаний рабочей поверхности.

На рисунке 2 представлена схема сил, действующих на частицу массой  $m_B$ :  $P_B = m_B A \omega^2 \sin \omega t$  – сила инерции переносного движения;  $m_B g$  – сила тяжести частицы;  $N_B$  – нормальная реакция нижнего слоя;  $F_{TP}$  – сила трения о нижний слой, совершающий колебания вместе с рабочей поверхностью.

Сила трения  $F_{TP}$  направлена против относительной скорости  $V_{B-H}$  – верхнего слоя относительно нижнего и образует с осью  $y$  угол  $\nu$ .

Условие движения материальной частицы относительно рабочей поверхности имеет вид

$$\sqrt{(m_B A \omega^2 \sin \omega t)^2 + (m_B g \sin \alpha)^2} \geq F_{TP}. \quad (1)$$

Дифференциальные уравнения относительного движения частицы в проекциях на оси координат для случая скольжения частицы в положительном направлении оси  $y$  имеют вид

$$m_B \ddot{x} = m_B g \sin \alpha - F_{TP} \sin \nu; \quad (2)$$

$$m_B \ddot{y} = m_B A \omega^2 \sin \omega t - F_{TP} \cos \nu \operatorname{sign} \dot{y}; \quad (3)$$

$$m_B \ddot{z} = -m_B g \cos \alpha + N_B. \quad (4)$$

В рассматриваемом случае движение частицы вдоль оси  $x$  возможно только в положительном направлении. Знак проекции силы трения  $F_{TP}$  на ось  $x$  не зависит от направления скольжения частицы вдоль оси  $y$ . При скольжении частицы вдоль оси  $y$  имеет место симметрия движущих сил и сил сопротивления относительно движению частицы.

Так как движение частицы происходит без подбрасывания, то  $z = \text{const}$  и  $\ddot{z} = 0$ , из уравнения (4) получим выражение силы нормального давления:

$$N_B = m_B g \cos \alpha.$$

Следовательно,

$$F_{TP} = N_B f_c = m_B g f_c \cos \alpha, \quad (5)$$

где  $f_c$  – коэффициент сопротивления сдвигу верхнего слоя относительно нижнего.

Преобразуем неравенство (1) и подставим в него выражение силы трения  $F_{TP}$  из уравнения (5), получим

$$(m_B A \omega^2 \sin \omega t)^2 + (m_B g \sin \alpha)^2 \geq (m_B g f_c \cos \alpha)^2. \quad (6)$$

Первое слагаемое неравенства (6) является переменной величиной, зависящей от времени. Максимальное значение по абсолютной величине это слагаемое принимает при  $|\sin \omega t| = 1$ . Следовательно, угол  $\nu$ , который сила трения  $F_{TP}$  образует с осью  $y$ , является переменной величиной, зависящей от величины силы инерции переносного движения. Максимальное значение угол  $\nu$  принимает в мгновение начала относительного движения частицы. Из неравенства (6) следует, что условие начала относительного движения частицы может быть представлено в виде

$$(m_B A \omega^2 \sin \delta)_{\min} = \sqrt{(m_B g f_c \cos \alpha)^2 - (m_B g \sin \alpha)^2},$$

где  $\delta = \omega t$  – фазовый угол, аналог безразмерного времени [11].

Тогда минимальное значение силы  $P_B$  инерции переносного движения, при котором частица может начинать относительное движение, имеет вид

$$(P_B)_{\min} = m_B g \sqrt{(f_c \cos \alpha)^2 - \sin^2 \alpha}.$$

Минимальное и максимальное значения угла  $\nu$  могут быть определены по формулам

$$\nu_{\max} = \arcsin \frac{\sin \alpha}{f_c \cos \alpha},$$

$$\nu_{\min} = \arctg \frac{g \sin \alpha}{A\omega^2}.$$

Анализ приведенных формул позволил сделать следующие выводы. Максимальное значение угла  $\nu$  не зависит от кинематических параметров (амплитуда и частота) колебаний рабочей поверхности, а зависит от угла  $\alpha$  наклона поверхности к горизонтали и от коэффициента  $f_c$  трения скольжения верхнего слоя относительно нижнего. Минимальное значение угла  $\nu$  зависит от амплитуды и частоты колебаний рабочей поверхности и от угла  $\alpha$  её наклона к горизонтали. Поскольку угол  $\nu$  изменяется в достаточно узком диапазоне его значений, будем считать угол  $\nu$  постоянным и примем его значение как среднее максимального и минимального значений.

Преобразуя (2) и (3) с учетом (5) получаем,

$$\ddot{x} = g \cdot (\sin \alpha - f_c \cos \alpha \sin \nu) \quad (7)$$

и

$$\ddot{y} = A\omega^2 \cdot \left( \sin \delta \mp \frac{gf_c \cos \alpha \cos \nu}{A\omega^2} \right). \quad (8)$$

В уравнении (8) верхний знак в выражении, стоящем в круглых скобках, соответствует скольжению частицы в положительном направлении оси  $y$ , нижний знак – в отрицательном.

Обозначим

$$Z_{\pm} = \pm \frac{gf_c \cos \alpha \cos \nu}{A\omega^2}. \quad (9)$$

Тогда уравнение (8) приводим к виду

$$\ddot{y} = A\omega^2 \cdot (\sin \delta - Z_{\pm}). \quad (10)$$

В (9) и (10) верхние индексы и знаки относятся к случаю скольжения частицы в положительном направлении оси  $y$  ( $\dot{y} > 0$ ), а нижние индексы и знаки – к случаю скольжения в отрицательном направлении оси  $y$  ( $\dot{y} < 0$ ).

Обозначим фазовые углы  $\delta$ , при которых начинается относительное скольжение частицы в положительном и отрицательном направлениях оси  $y$ ,  $\delta_{1+}$  и  $\delta_{1-}$ , а фазовые углы окончания этих скольжений  $\delta_{2+}$  и  $\delta_{2-}$ .

Скольжение частицы в положительном направлении оси  $y$  может начаться, если  $\ddot{y} \geq 0$ ,

то есть при  $\sin \delta_{1+} \geq Z_{+}$ , где  $Z_{+}$  – безразмерный параметр сопротивления относительно движению частицы в положительном направлении оси  $y$ . Скольжение частицы в отрицательном направлении может начаться, если  $\ddot{y} \leq 0$ , то есть при  $\sin \delta_{1-} \leq Z_{-}$ .

Как видно из формулы (9), в рассматриваемом случае вибрационного перемещения имеет место равенство  $Z_{+} = |Z_{-}|$ . Это является следствием того, что, как отмечено выше, при скольжении частицы вдоль оси  $y$  имеет место симметрия движущих сил и сил сопротивления относительно скольжению.

Как установлено в работах [10, 11], при таких условиях вибрационного перемещения частица может совершать движение относительно колеблющейся поверхности в двух режимах. Согласно принятой в этих работах терминологии это режим 1 и режим 2. Режим 1 – двустороннее скольжение частицы с двумя паузами. Режим 2 – двустороннее скольжение частицы без пауз (с двумя мгновенными остановками).

В сепарирующих машинах из перечисленных выше режимов целесообразно обеспечивать движение частиц зерновой смеси в режиме 2. Этот режим обеспечивает наиболее рациональное использование времени пребывания сепарируемой зерносмеси на рабочей поверхности, так как процесс самосортирования происходит эффективно при относительном движении слоёв зерновой смеси.

Для определения зависимости скорости частицы при её скольжении в положительном направлении оси  $y$  проинтегрируем уравнение (10) в пределах от  $\dot{y} = 0$  до текущего значения скорости  $\dot{y} > 0$  и от  $\delta_{1+}$  до текущего значения фазового угла  $\delta$ . Зависимость скорости имеет вид

$$\dot{y}(\delta) = A\omega \cdot [(\cos \delta_{1+} - \cos \delta) - Z_{+} \cdot (\delta - \delta_{1+})]. \quad (11)$$

Правая часть уравнения обращается в ноль в мгновение прекращения скольжения частицы в положительном направлении оси  $y$ , то есть при  $\delta = \delta_{2+}$ . Поэтому после подстановки  $\delta = \delta_{2+}$  в уравнение (11) имеем

$$\cos \delta_{1+} - \cos \delta_{2+} = Z_{+} \cdot (\delta_{2+} - \delta_{1+}). \quad (12)$$

Проведем аналогичные преобразования при скольжении в отрицательном направлении, получим

$$\cos \delta_{1-} - \cos \delta_{2-} = Z_{-} \cdot (\delta_{2-} - \delta_{1-}). \quad (13)$$

Начало движения частицы в каждом из направлений совпадает по времени и фазовому углу с окончанием движения в противоположном направлении, то есть должно выполняться условие

$$\begin{cases} \delta_{1-} = \delta_{2+} \\ \delta_{2-} = \delta_{1+} + 2\pi \end{cases}. \quad (14)$$

Подставим значения фазовых углов  $\delta_{1-}$  и  $\delta_{2-}$  из системы уравнений (14) в уравнение (13) и после преобразований получим

$$\cos \delta_{1+} - \cos \delta_{2+} = Z_- \cdot (\delta_{2+} - \delta_{1+} - 2\pi). \quad (15)$$

Из уравнения (12) и (15), имея в виду, что  $Z_- = -Z_+$ , получим

$$\delta_{2+} - \delta_{1+} = \pi,$$

аналогично

$$\delta_{2-} - \delta_{1-} = \pi.$$

Следовательно, при установившемся движении частицы в режиме 2 при выполнении условия  $Z_+ = |Z_-|$  фазовые углы начала и окончания скольжения в каждом из направлений отличаются друг от друга на  $\pi$ .

Максимальное значение параметра  $Z_+ = (Z_+)_{2\max}$ , при котором частица совершает движение относительно рабочей поверхности в режиме 2, равно

$$(Z_+)_{2\max} = \frac{2}{\sqrt{4 + \pi^2}} = 0,537.$$

Аналогично имеем  $(Z_-)_{2\min} = -0,537$ .

Аналитические выражения для определения фазовых углов  $\delta_{1+}$  и  $\delta_{2+}$  получены в виде

$$\delta_{1+} = \frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{\pi Z_+}{2};$$

$$\delta_{2+} = \frac{3\pi}{2} - \arcsin \frac{\pi Z_+}{2}.$$

Следующим этапом решения рассматриваемой задачи вибрационного перемещения является определение траектории частицы при её движении относительно поверхности.

Для определения зависимости перемещения частицы в положительном направлении оси  $y$  проинтегрируем уравнение (11) в пределах от  $\delta_{1+}$  до текущего значения фазового угла  $\delta < \delta_{2+}$  и от  $y = 0$  до текущего значения перемещения  $y_+ > 0$ .

При интегрировании имеем в виду, что  $\dot{y} = \frac{dy}{dt}$ ,

$\delta = \omega t$  и  $\dot{y} = \frac{ody}{d\delta}$ . Получаем

$$y_+(\delta) = A \left[ \begin{aligned} &(\cos \delta_{1+} + Z_+ \delta_{1+})(\delta - \delta_{1+}) - \\ &-(\sin \delta - \sin \delta_{1+}) - Z_+ \frac{\delta^2 - \delta_{1+}^2}{2} \end{aligned} \right]. \quad (16)$$

Аналогично определим зависимость перемещения в отрицательном направлении оси  $y$

$$y_-(\delta) = A \left[ \begin{aligned} &(\cos \delta_{1-} + Z_- \delta_{1-})(\delta - \delta_{1-}) - \\ &-(\sin \delta - \sin \delta_{1-}) - Z_- \frac{\delta^2 - \delta_{1-}^2}{2} \end{aligned} \right]. \quad (17)$$

Полные перемещения частицы в положительном  $y_+$  и в отрицательном  $y_-$  направлениях оси  $y$  получим, подставив в уравнение (16)  $\delta = \delta_{2+}$ , а в уравнение (17)  $\delta = \delta_{2-}$ .

Для определения зависимости скорости частицы вдоль оси  $x$  проинтегрируем уравнение (7) в пределах от  $\delta_{1+}$  до текущего значения фазового угла  $\delta < 2\pi + \delta_{1+}$  и от  $\dot{x} = 0$  до текущего значения скорости  $\dot{x} > 0$ :

$$\dot{x}(\delta) = \frac{g}{\omega} (\sin \alpha - f_c \cos \alpha \sin \nu) (\delta - \delta_{1+}). \quad (18)$$

Для определения зависимости перемещения частицы вдоль оси  $x$  проинтегрируем уравнение (18) в тех же пределах

$$x(\delta) = \frac{g}{\omega^2} \left[ \begin{aligned} &-(\sin \alpha - f_c \cos \alpha \sin \nu) \delta_{1+} (\delta - \delta_{1+}) + \\ &+(\sin \alpha - f_c \cos \alpha \sin \nu) \frac{\delta^2 - \delta_{1+}^2}{2} \end{aligned} \right]. \quad (19)$$

Для определения полного перемещения частицы вдоль оси  $x$  подставим в уравнение (17)  $\delta = 2\pi + \delta_{1+}$ , получим

$$x_+ = \frac{2\pi^2 g}{\omega^2} \cdot (\sin \alpha - f_c \cos \alpha \sin \nu).$$

Средняя скорость частицы вдоль оси  $x$  определяется по формуле

$$V_{cp} = \frac{x_+ \omega}{2\pi} = \frac{\pi g (\sin \alpha - f_c \cos \alpha \sin \nu)}{\omega}.$$

При построении траектории частицы верхнего слоя относительно рабочей поверхности вычисляем её координаты  $y$  и  $x$  при одинаковых текущих значениях фазового угла  $\delta$ , лежащих в интервале значений, соответствующих интервалам относительного движения частицы. При скольжении частицы относительно поверхности в режиме 2 координату  $y$  вычисляем по уравнениям (16) и (17). В уравнении (16) текущее значение фазового угла изменяется в интервале от  $\delta_{1+}$  до  $\delta_{2+}$ , в уравнении (17) – от  $\delta_{1-}$  до  $\delta_{2-}$ . Координату  $x$  вычисляем по уравнению (19). При этом текущее значение фазового угла изменяется в интервале от  $\delta_{1+}$  до  $\delta_{2-}$ .



### Заключение

Рассмотрена модель двуслойного вибрационного перемещения зернового потока по поверхности с рифлями в виде прямоугольных пластин, расположенных параллельно сходу зерна. При этом впервые в вибрационном сепараторе колебания рабочей поверхности направлены перпендикулярно линии наибольшего ската.

Показано, что верхний слой зернового потока, расположенный над рифлями, совершает сложное движение, состоящее из двух движений во взаимно перпендикулярных направлениях: «быстрое» колебательное движение относительно линии наибольшего ската и «медленное» движение вдоль линии наибольшего ската.

### ЛИТЕРАТУРА

1 Жиганков Б.В. Исследование процесса вибросепарирования продуктов шелушения риса на плоских ячеистых поверхностях. М., 1972. 211 с.

2 Оспанов А.Б. Вибрационное разделение смеси шелушенного и нешелушенного риса самосортированием в кольцевом канале. М., 1991. 149 с.

3 Киракосян Д.В. Очистка зерна пшеницы от примесей на рифленых поверхностях. М., 2014. 213 с.

4 Тарасевич С.В. Обоснование параметров сепаратора с вибрационно – качающейся решетчатой поверхностью для зерновых материалов. Барнаул, 2006. 27 с.

5 Балданов В.Б. Обоснование основных параметров гравитационного сепаратора для очистки зерна. Улан-Уде, 2013. 22 с.

6 Федоренко А.С. Параметры сепаратора для очистки фуражного зерна от крупных примесей. Барнаул, 2014. 242 с.

7 Корнев А.С. Повышение эффективности сепарации зерна на плоских решетках зерноочистительных машин. Воронеж, 2015. 156 с.

8 Гиевский А.М. Повышение эффективности работы универсальных воздушно-решетчатых зерноочистительных машин. Воронеж, 2016. 364 с.

9 Абидуев А.А. Повышение эффективности процессов фракционной очистки зерна и семян. Улан-Уде, 2018. 383 с.

10 Блехман И.И., Джанелидзе Г.Ю. Вибрационное перемещение. М.: Наука, 1964. 410 с.

11 Гортинский В.В., Демский А.Б., Борискин М.А. Процессы сепарирования на зерноперерабатывающих предприятиях. М.: Колос, 1980. 304 с.

12 Godlewski S., Tekiel A., Piskorz W., Zasada F. et al. Supramolecular ordering of PTCDA molecules: The key role of dispersion forces in an unusual transition from physisorbed into chemisorbed state // ACS nano. 2012. V. 6. №. 10. P. 8536–8545.

13 Mikulionok I.O. Pretreatment of recycled polymer raw material // Russian Journal of Applied Chemistry. 2011. V. 84. №. 6. P. 1105–1113.

14 Hopkins J.C., Podgornik R., Ching W.-Y., French R.H. et al. Disentangling the effects of shape and dielectric response in van der Waals interactions between anisotropic bodies // The Journal of Physical Chemistry C. 2015. V. 119. №. 33. P. 19083–19094.

Для подтверждения теории процесса вибрационного перемещения зерновой смеси по предложенной рабочей поверхности сепаратора была проведена серия экспериментов. В ходе опытов использовали рабочие поверхности с рифлями различной высоты, а также изменяли основные параметры работы вибрационного сепаратора (амплитуда и частота колебания, угол наклона рабочей поверхности и т.д.).

Разработана программа расчета для построения траектории и определения средней скорости транспортирования частиц верхнего слоя вдоль рабочей поверхности.

Анализ полученных в ходе натурных экспериментов данных, программа построения траектории движения зерна и результаты сравнений экспериментальных и теоретических данных будут рассмотрены в дальнейшем.

15 Tawfik S., De Volder M., Copic D., Park S.J. et al. Engineering of Micro- and Nanostructured Surfaces with Anisotropic Geometries and Properties // Advanced Materials. 2012. V. 24. №. 13. P. 1628–1674.

16 Reserbat-Plantey A., Kalita D., Han Z., Ferlazzo L. et al. Strain superlattices and macroscale suspension of graphene induced by corrugated substrates // Nano letters. 2014. V. 14. №. 9. P. 5044–5051.

17 Khan M.A., Nadeem M.A., Idriss H. Ferroelectric polarization effect on surface chemistry and photo-catalytic activity: A review // Surface Science Reports. 2016. V. 71. №. 1. P. 1–31.

18 Ruths M., Israelachvili J.N. Surface forces and nanorheology of molecularly thin films // Springer Handbook of Nanotechnology. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010. P. 857–922.

### REFERENCES

1 Zhigankov B.V. Issledovanie processa vibroseparirovaniya produktov shelusheniya risa na ploskikh yacheistyh poverhnostyakh [Investigation of the process of vibroseparation of rice peeling products on flat cellular surfaces]. Moscow, 1972. 211 p. (in Russian).

2 Ospanov A.B. Vibracionnoe razdelenie smesi shelushennogo i neshelushenogo risa samosortirovaniem v kol'cevom kanale [Vibrational separation of a mixture of peeled and unshelled rice by self-sorting in the annular channel]. Moscow, 1991. 149 p. (in Russian).

3 Kirakosyan D.V. Ochistka zerna pshenicy ot primesej na riflenyh poverhnostyakh [Purification of wheat from impurities on corrugated surfaces]. Moscow, 2014. 213 p. (in Russian).

4 Tarasevich S.V. Obosnovanie parametrov separatora s vibracionno – kachayushchejsya reshetnoj poverhnost'yu dlya zemovykh materialov [Substantiation of the parameters of the separator with a vibration - swinging sieve surface for grain materials.]. Barnaul, 2006. 27 p. (in Russian).

5 Baldanov V.B. Obosnovanie osnovnykh parametrov gravitacionnogo separatora dlya ochistki zerna [Justification of the main parameters of the gravity separator for cleaning grain]. Ulan-Ude, 2013. 22 p. (in Russian).

6 Fedorenko A.S. Parametry separatora dlya ochistki furazhnogo zerna ot krupnykh primesej [The parameters of the separator for cleaning feed grain from large impurities]. Barnaul, 2014. 242 p. (in Russian).

7 Kornev A.S. Povyshenie ehffektivnosti separacii zerna na ploskih reshetah zernoochistitel'nyh mashin [Improving the efficiency of grain separation on flat sieves of grain cleaning machines]. Voronezh, 2015. 156 p. (in Russian).

8 Gievskij A.M. Povyshenie ehffektivnosti raboty universal'nyh vozdušno-reshetnyh zernoochistitel'nyh mashin [Improving the efficiency of universal air-sieve grain cleaning machines]. Voronezh, 2016. 364 p. (in Russian).

9 Abiduev A.A. Povyshenie ehffektivnosti processov frakcionnoj ochistki zerna i semyan [Improving the efficiency of fractional purification of grain and seeds]. Ulan-Ude, 2018. 383 p. (in Russian).

10 Blekhman I.I., Dzhanlidze G.Yu. Vibracionnoe peremeshchenie [Vibrating movement]. Moscow, Nauka, 1964. 410 p. (in Russian).

11 Gortinskij V.V., Demskij A.B., Boriskin M.A. Processy separirovaniya na zernopererabatyvayushchih predpriyatiyah [Separation processes at grain processing enterprises]. Moscow, Kolos, 1980. 304 p. (in Russian).

12 Godlewski S., Tekiel A., Piskorz W., Zasada F. et al. Supramolecular ordering of PTCDA molecules: The key role of dispersion forces in an unusual transition from physisorbed into chemisorbed state. ACS nano. 2012. vol. 6. no. 10. pp. 8536–8545.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Сергей А. Мачихин** д.т.н., профессор, кафедра ресурсосберегающих процессов и технологий пищевых производств, Московский государственный университет пищевых производств, Волоколамское шоссе, 11, г. Москва, 125080, Россия, smachexpert@rambler.ru

**Александр А. Рындин** аспирант, кафедра броидильных технологий и виноделия, Московский государственный университет пищевых производств, Волоколамское шоссе, 11, г. Москва, 125080, Россия, aleksandr-ryndin@rambler.ru

**Александр М. Васильев** к.т.н., доцент, кафедра процессов и аппаратов перерабатывающих производств, МСХА имени К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, 49, г. Москва, 127550, Россия, fondprod@rambler.ru

**Алла Н. Стрелюхина** д.т.н., профессор, кафедра ресурсосберегающих процессов и технологий пищевых производств, Московский государственный университет пищевых производств, Волоколамское шоссе, 11, г. Москва, 125080, Россия, alstrel@rambler.ru

#### КРИТЕРИЙ АВТОРСТВА

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ПОСТУПИЛА 28.08.2018

ПРИНЯТА В ПЕЧАТЬ 28.09.2018

13 Mikulionok I.O. Pretreatment of recycled polymer raw material. Russian Journal of Applied Chemistry. 2011. vol. 84. no. 6. pp. 1105–1113.

14 Hopkins J.C., Podgornik R., Ching W.-Y., French R.H. et al. Disentangling the effects of shape and dielectric response in van der Waals interactions between anisotropic bodies. The Journal of Physical Chemistry C. 2015. vol. 119. no. 33. pp. 19083–19094.

15 Tawfick S., De Volder M., Copic D., Park S.J. et al. Engineering of Micro- and Nanostructured Surfaces with Anisotropic Geometries and Properties. Advanced Materials. 2012. vol. 24. no. 13. pp. 1628–1674.

16 Reserbat-Plantey A., Kalita D., Han Z., Ferlazzo L. et al. Strain superlattices and macroscale suspension of graphene induced by corrugated substrates. Nano letters. 2014. vol. 14. no. 9. pp. 5044–5051.

17 Khan M.A., Nadeem M.A., Idriss H. Ferroelectric polarization effect on surface chemistry and photo-catalytic activity: A review. Surface Science Reports. 2016. vol. 71. no. 1. pp. 1–31.

18 Ruths M., Israelachvili J.N. Surface forces and nanorheology of molecularly thin films. Springer Handbook of Nanotechnology. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010. pp. 857–922.

#### INFORMATION ABOUT AUTHORS

**Sergej A. Machyhin** Dr. Sci. (Engin.), professor, resource saving processes and technologies of food production department, Moscow State University of Food production, Volokolamskoe Highway, 11, Moscow, 125080, Russia, smachexpert@rambler.ru

**Aleksandr A. Ryndin** graduate student, fermentation technologies and winemaking department, Moscow State University of Food production, Volokolamskoe Highway, 11, Moscow, 125080, Russia, aleksandr-ryndin@rambler.ru

**Aleksandr M. Vasiliev** Cand. Sci. (Engin.), associate professor, processes and apparatus of processing industries department, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Timiryazevskaya str., 49, Moscow, 127550, Russia, fondprod@rambler.ru

**Alla N. Streljuhina** Dr. Sci. (Engin.), professor, resource saving processes and technologies of food production department, Moscow State University of Food production, Volokolamskoe Highway, 11, Moscow, 125080, Russia, alstrel@rambler.ru

#### CONTRIBUTION

All authors equally participated in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

#### CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

RECEIVED 8.28.2018

ACCEPTED 9.28.2018