

## К вопросу о вибрационном перемещении при негармонических колебаниях рабочей поверхности

Канд. техн. наук **А.М. Васильев**, tmmrkm49@gmail.com  
 докт. техн. наук **С.А. Бредихин**, bredihin2006@yandex.ru  
 канд. техн. наук **В.К. Андреев**, andreev\_v\_k@mail.ru

*Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева  
 127550, Россия, Москва, ул. Тимирязевская, 49*

В настоящей статье теоретически обосновано и доказано, что причиной возникновения вибрационного перемещения как направленного в среднем движения материальной частицы относительно горизонтальной горизонтально колеблющейся однородно шероховатой поверхности является несимметрия закона колебаний поверхности, выражающаяся в неравенстве продолжительности интервалов между чередующимися друг за другом одинаковыми по абсолютной величине положительным – отрицательным – положительным экстремумами ускорения колеблющейся поверхности. В рассмотренном случае продолжительность интервала между положительным и отрицательным экстремумами вдвое превышает продолжительность последующего интервала между отрицательным и положительным экстремумами ускорения. Такое различие в интервалах между чередующимися друг за другом положительным – отрицательным – положительным экстремумами ускорения названо нами временной несимметрией закона колебаний рабочей поверхности. Таким образом, в статье раскрыт физический механизм и установлен вид асимметрии системы, обуславливающий вибрационное транспортирование отдельных тел или сыпучего материала по горизонтальной однородно шероховатой плоскости, совершающей горизонтальные негармонические колебания, которые характеризуются равенством абсолютных значений экстремумов ускорения в противоположных направлениях.

**Ключевые слова:** оборудование для сепарации; переработка зернопродуктов; вибрационное перемещение; вибрационное транспортирование; негармонические колебания; безразмерный аналог движущей силы; безразмерный сопротивления движению.

DOI: 10.17586/2310-1164-2019-12-2-42-48

## On the issue of vibration displacement with non-harmonic oscillations of the working surface

Ph. D. **Alexander M. Vasiliev**, tmmrkm49@gmail.com  
 D. Sc. **Sergey A. Bredikhin**, bredihin2006@yandex.ru  
 Ph. D. **Vladimir K. Andreev**, andreev\_v\_k@mail.ru

*Russian State Agrarian University – K.A. Timiryazev  
 49, Timiryazevskaya str., Moscow, 127550, Russia*

In the article it is theoretically justified and proved that the cause of the onset of vibration displacement as an average movement of a material particle relative to a horizontal, horizontally oscillating uniformly rough surface is the asymmetry of the law of surface oscillations, which is expressed in the inequality of the intervals between alternating positive and negative ones – positive extremes of acceleration of the oscillating surface. In the case in question the duration of the interval between positive and negative extremes is twice the duration of the subsequent interval between negative and positive extremums of acceleration. This difference in the intervals between alternating positive – negative – positive acceleration extremes alternately is called temporary asymmetry of the law of oscillations of the working surface. Thus, the article reveals a physical mechanism and establishes a type of asymmetry of the system, causing vibration transport of individual bodies or bulk material along a horizontal uniformly rough plane, performing horizontal non-harmonic oscillations that are characterized by equality of the absolute values of the extremum accelerations in opposite directions.

**Keywords:** separation equipment; grain processing; vibration movement; vibration transportation; non-harmonic oscillations; dimensionless analogue of the driving force; dimensionless resistance to movement.

### Введение

Несмотря на широкое использование вибраций в технологическом и транспортном оборудовании при переработке зернопродуктов и других сыпучих материалов [1–3] возможности этого способа механического воздействия на сыпучий материал используется недостаточно полно. Действие вибраций на сыпучее тело проявляется в двух направлениях: транспортирование; разрыхление; самосортирование (сегрегация) частиц сыпучей смеси. Действие вибраций, проявляющееся в транспортировании, является основной их функцией в транспортном вибрационном оборудовании. Средняя скорость транспортирования определяет производительность оборудования. Эффективность сепарирующего (технологического) оборудования во многих случаях зависит от интенсивности процесса самосортирования. Известно [4–6], что эффективность процесса самосортирования зависит от продолжительности и интенсивности воздействия вибраций на сыпучее тело. Следовательно, в сепарирующем оборудовании должны быть обеспечены такие условия воздействия вибраций, при которых достигается требуемая эффективность и производительность процесса сепарирования.

Известно [7–9], что причиной возникновения направленного в среднем перемещения отдельных материальных тел или сыпучей среды при горизонтальных колебаниях горизонтальной однородно шероховатой поверхности является несимметрия закона колебаний, выражающаяся в неравенстве наибольшего положительного значения ускорения и наибольшего по абсолютной величине его отрицательного значения. Такой несимметричный закон колебаний рабочей поверхности способен сообщить центробежный вибровозбудитель [10, 11], содержащий четыре дебаланса. Дебалансы равномерно вращаются вокруг параллельных осей, имеют попарно одинаковые дисбалансы и одинаковые по величине угловые скорости противоположного направления. Величина угловой скорости одной пары дебалансов отличается вдвое от величины угловой скорости другой пары дебалансов. В работе [11] установлено, что такой вибровозбудитель способен сообщить рабочему органу машины колебания либо по закону

$$a(t) = B\omega^2 \cos \omega t + C\omega^2 \cos 2\omega t, \quad (1)$$

либо по закону

$$a(t) = B\omega^2 \sin \omega t + C\omega^2 \sin 2\omega t, \quad (2)$$

где  $a$  – ускорение точек рабочей поверхности;

$\omega$  – угловая скорость медленно-вращающихся дебалансов;

$B$  и  $C$  – заданные постоянные, зависящие от установочных параметров вибровозбудителя, к которым относятся:  $m_1$  и  $m_2$ ,  $r_1$  и  $r_2$  – массы и эксцентриситеты соответственно медленно- и быстро-вращающихся дебалансов.

Вибровозбудитель сообщает рабочему органу машины колебания по закону, представленному уравнением (1) в том случае, если в начальном положении дебалансов центробежные силы инерции медленно- и быстро-вращающихся дебалансов создают максимальные результирующие силы одинакового направления. Закон колебаний рабочей поверхности подчиняется уравнению (2) в том случае, если центробежные силы инерции медленно- и быстро-вращающихся дебалансов в начальном положении создают результирующие силы равные нулю. Исследования зависимостей (1) и (2) на экстремумы позволили установить следующее. Зависимость (1) является несимметричной по условию – максимальное положительное значение ускорения больше абсолютной величины максимального отрицательного значения ускорения. В зависимости (2) наибольшее положительное значение ускорения равно модулю наибольшего отрицательного значения ускорения. Таким образом, зависимость (2) симметрична по условию сравнения абсолютных величин максимального положительного и отрицательного значений ускорения рабочей поверхности. В зависимости (2) имеет место временная несимметрия в чередовании экстремальных значений ускорения, заключающаяся в том, что продолжительность интервала между положительным и отрицательным экстремумами ускорения больше продолжительности интервала между отрицательным и положительным экстремумами ускорения рабочей поверхности. Оценим влияние такой несимметрии закона колебаний рабочей поверхности на вибрационное перемещение обрабатываемого материала по поверхности.

**Методы. Исследование движения частицы по горизонтальной горизонтально колеблющейся шероховатой поверхности**

Рассмотрим движение материальной частицы по горизонтальной однородно шероховатой поверхности, совершающей горизонтальные колебания по закону, описываемому уравнением (2). Заметим, что знаки постоянных коэффициентов  $B$  и  $C$  в уравнении (2) зависят, во-первых, от начальной фазировки дебалансов, во-вторых, от того, какое из двух противоположных направлений принято за положительное и какое направление – за отрицательное. Для определенности дальнейших рассуждений рассмотрим одно из возможных соотношений коэффициентов  $B$  и  $C$ , а именно  $C \cdot (B)^{-1} = 0,5$ , а также будем считать, что постоянные  $B$  и  $C$  имеют отрицательные знаки.

Следует объяснить выбор нами настоящей модели. Известно [2–4], что физический механизм многих процессов вибрационного перемещения может быть выяснен на модели, представляющей собой материальную частицу на вибрирующей шероховатой плоскости. Эта модель имеет для исследования процессов вибрационного перемещения фундаментальное значение.

На рисунке 1 показана схема сил, действующих на частицу, находящуюся на горизонтальной горизонтально колеблющейся плоскости.

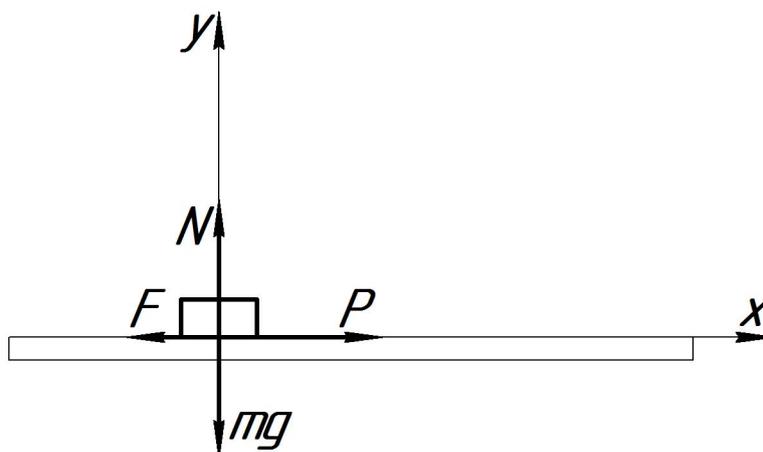


Рисунок 1 – Схема сил, действующих на частицу:

$P = -ma = mB\omega^2 (\sin \delta + 0,5 \sin 2\delta)$  – сила инерции переносного движения;  $m$  – масса частицы;  $F = Nf = mgf$  – сила трения;  $N$  – нормальная реакция поверхности;  $f$  – коэффициент трения частицы о поверхность;  $\delta = \omega t$  – фазовый угол или, что то же самое, безразмерное время

Figure 1. Forces experienced by a particle:

$P = -ma = mB\omega^2 (\sin \delta + 0,5 \sin 2\delta)$  – translational motion inertia force;  $m$  – mass of a particle;  $F = Nf = mgf$  – friction force;  $N$  – normal response of the surface;  $f$  – particle-surface friction coefficient;  $\delta = \omega t$  – phase angle (dimensionless time)

Дифференциальное уравнение относительного движения материальной частицы массой  $m$  в проекции на ось  $x$  имеет вид

$$m\ddot{x} = mB\omega^2 (\sin \delta + 0,5 \sin 2\delta) \mp mgf . \tag{3}$$

В уравнении (3) верхний знак перед силой трения соответствует скольжению частицы в положительном направлении, нижний знак – скольжению в отрицательном направлении оси  $x$ .

Для удобства дальнейших рассуждений такая методика рассмотрена в работах [12–14], целесообразно привести уравнение движения (3) к безразмерной форме

$$x'' = \sin \delta + 0,5 \sin 2\delta - z_{\pm} , \tag{4}$$

где  $x'' = \ddot{x} \cdot (B\omega^2)^{-1}$  – безразмерное ускорение частицы относительно рабочей поверхности;

$\sin \delta + 0,5 \sin 2\delta$  – безразмерное ускорение точек поверхности (безразмерный аналог движущей силы);

$z_{\pm} = \pm gf \cdot (B\omega^2)^{-1}$  – безразмерный параметр сопротивления движению частицы относительно поверхности (безразмерный аналог силы сопротивления относительно движению частицы).

Штрихи в уравнении (4) обозначают дифференцирование по безразмерному времени  $\delta$ . При скольжении относительно поверхности в положительном и отрицательном направлениях частица испытывает одинаковую по величине силу сопротивления, то есть  $z_+ = |z_-|$ .

На рисунке 2 представлена графическая интерпретация уравнения (4). Построен график зависимости безразмерного аналога движущей силы  $y_a = \sin \delta + 0,5 \sin 2\delta$ , а также проведены две прямые  $y_a = z_+$  и  $y_a = z_-$ .

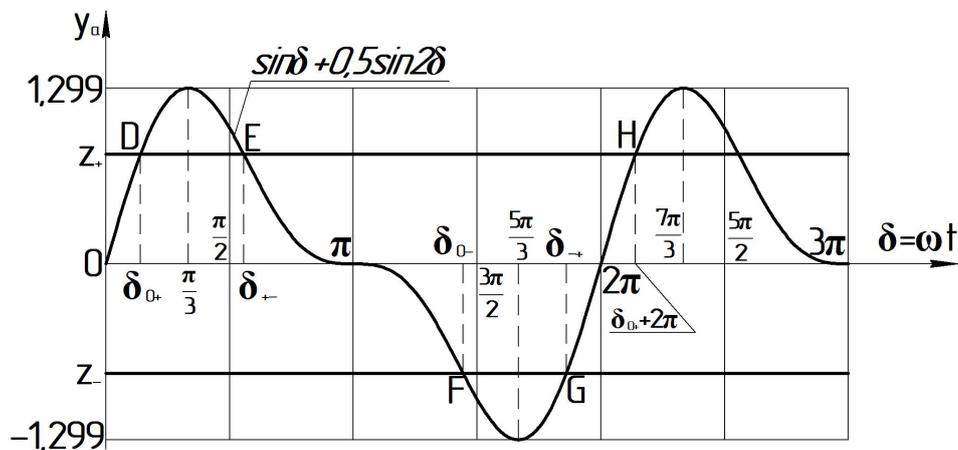


Рисунок 2 – Графическая интерпретация уравнения (4)  
 Figure 2. Graphic interoperation of the equation (4)

Положительный экстремум движущей силы имеет место при  $\delta = \pi \cdot (3)^{-1}$ , а отрицательный при  $\delta = 5\pi \cdot (3)^{-1}$ . Следовательно, в данном случае продолжительность интервала между положительным и отрицательным экстремумами движущей силы вдвое больше, чем между отрицательным и последующим положительным экстремумом. Модули экстремальных значений движущей силы в безразмерном выражении равны 1,299. Это означает, что движение частицы относительно поверхности возможно при условии  $|z_{\pm}| < 1,299$ .

Исследования вибрационного перемещения частицы при этих условиях позволили установить. При  $0,72 \leq |z_{\pm}| < 1,299$  частица совершает движение относительно поверхности в режиме двустороннего скольжения с двумя паузами. При  $0,36 < |z_{\pm}| < 0,72$  частица движется относительно поверхности в режиме двустороннего скольжения с одной паузой и одной мгновенной остановкой после скольжения в отрицательном направлении. При  $|z_{\pm}| \leq 0,36$  частица совершает относительно движение в режиме двустороннего скольжения без пауз (с двумя мгновенными остановками). Следует заметить, что последний режим является преобладающим в сепарирующих машинах [4], так как процессы самосортирования и просеивания происходят преимущественно при относительном движении частиц сыпучего тела. При таком режиме движения наиболее полно используется время пребывания сыпучего материала на рабочей поверхности.

Во всех перечисленных выше режимах движения имеет место, направленное в среднем движении частицы относительно рабочей поверхности, так называемое [2], вибрационное транспортирование. Причиной возникновения явления вибротранспортировки является отмеченная выше временная несимметрия в чередовании положительных и отрицательных экстремумов ускорения рабочей поверхности, то есть так называемая временная несимметрия закона колебаний ускорения поверхности. Возникновение явления вибротранспортировки при таком законе колебаний рабочей поверхности можно объяснить следующим образом. Весь промежуток времени, в течение которого рассматривается движение частицы, можно разбить на интервалы с границами, определяемыми соотношением движущей силы и силы сопротивления. Абсцисса точки D, определяющая начало первого интервала,

на котором движущая сила превышает силу сопротивления, соответствует минимальному значению фазового угла  $\delta_{0+}$  возможного начала движения частицы в положительном направлении. Заметим, что частица начинает движение в положительном направлении при фазовом угле  $\delta_{0+}$ , если до наступления этого момента времени она находится в состоянии относительного покоя, то есть, если этому движению предшествует пауза. Абсцисса точки  $E$  определяет значение фазового угла  $\delta_{+-}$ , соответствующее окончанию первого интервала и началу второго интервала, на котором сила сопротивления превышает движущую силу. Абсцисса точки  $F$  определяет начало третьего интервала, на котором движущая сила в отрицательном направлении превышает силу сопротивления, и соответствует минимальному значению фазового угла  $\delta_{0-}$  возможного начала движения частицы в отрицательном направлении. Угол  $\delta_{0-}$  соответствует углу начала движения частицы в отрицательном направлении из состояния покоя. Абсцисса точки  $G$  определяет значение фазового угла  $\delta_{-+}$  соответствующее окончанию третьего интервала и началу четвертого интервала, на котором сила сопротивления превышает движущую силу. Абсцисса точки  $H$ , равная  $\delta_{0+} + 2\pi$  соответствует окончанию четвертого интервала.

Пусть частица совершает движение относительно рабочей поверхности в режиме двустороннего скольжения с двумя паузами. Как видно из рисунка 2, продолжительность интервала  $(\delta_{0+}, \delta_{+-})$  ускоренного движения в положительном направлении равна продолжительности интервала  $(\delta_{0-}, \delta_{-+})$  ускоренного движения в отрицательном направлении. Ускоренное движение частицы в противоположных направлениях происходит при одинаковом различии в величинах движущей силы и силы сопротивления. Следовательно, частица заканчивает ускоренное движение в противоположных направлениях с одинаковыми по абсолютной величине скоростями. На втором и четвертом интервалах частица начинает замедленное движение и заканчивает его относительно рабочей поверхности соответственно в положительном и отрицательном направлениях. Заметим, что замедленное движение частицы происходит под действием тормозящей силы, равной разности движущей силы и силы сопротивления относительно движению с учетом их знаков. При этом, как видно из рисунка 2, сила тормозящая движение частицы в положительном направлении растет менее интенсивно, чем сила тормозящая движение частицы в отрицательном направлении. Это означает, что за период колебаний рабочей поверхности частица перемещается в положительном направлении оси  $x$  на расстояние, превышающее ее перемещение в отрицательном направлении. Следовательно, в данном случае при движении частицы относительно колеблющейся поверхности в режиме двустороннего скольжения с двумя паузами имеет место направленное в среднем движение материальной частицы в положительном направлении оси  $x$ .

Для упрощения дальнейших рассуждений используем следующие обозначения, принятые в основополагающих работах по теории вибрационного перемещения [2, 4, 9]:  $\delta_{1+}$  – фазовый угол начала относительного скольжения частицы в положительном направлении оси  $x$  в установившемся движении;  $\delta_{1-}$  – фазовый угол начала скольжения частицы в отрицательном направлении оси  $x$  в установившемся движении;  $\delta_{2+}$  и  $\delta_{2-}$  – соответственно фазовые углы окончания скольжения частицы в положительном и отрицательном направлениях оси  $x$  в установившемся движении.

Как отмечено выше, при  $0,36 < |z_{\pm}| < 0,72$  частица движется относительно поверхности в режиме двустороннего скольжения с одной паузой и одной мгновенной остановкой после скольжения в отрицательном направлении. В этом случае в установившемся движении частица начинает движение в положительном направлении оси  $x$  только после окончания ее движения в отрицательном направлении. То есть, в этом режиме частица начинает скольжение в положительном направлении при фазовом угле  $\delta_{1+} > \delta_{0+}$ , а в отрицательном направлении частица начинает скольжение при минимально возможном значении фазового угла  $\delta_{0-}$ . Следовательно, при скольжении частицы в этом режиме с уменьшением сопротивления  $z_{\pm}$  продолжительность интервала ускоренного движения в положительном направлении уменьшается, а продолжительность интервала ускоренного движения в отрицательном

направлении увеличивается. Это свидетельствует о том, что при движении частицы в этом режиме имеет место направленное в среднем ее движение относительно колеблющейся поверхности. Следует предположить, что с уменьшением сопротивления  $z_{\pm}$  при некоторых его значениях перемещение частицы в отрицательном направлении по абсолютной величине может превысить величину перемещения частицы в положительном направлении. Тогда, в этом случае, изменится направление средней скорости вибротранспортирования.

При  $|z_{\pm}| < 0,36$  частица совершает относительное движение в режиме двустороннего скольжения без пауз (с двумя мгновенными остановками). Очевидно, что при движении частицы в этом режиме также существует различие в продолжительности интервалов ускоренного скольжения частицы относительно поверхности в противоположных направлениях. Следовательно, и в этом случае имеет место направленное в среднем движение частицы относительно колеблющейся поверхности.

### Результаты и их обсуждение

В настоящей статье раскрыт физический механизм и установлен вид асимметрии системы, обуславливающий вибрационное транспортирование отдельных материальных тел или сыпучей среды по горизонтальной горизонтально колеблющейся плоскости по негармоническому закону, в котором абсолютные величины максимальных положительных и отрицательных значений ускорения равны друг другу.

Как отмечено выше, центробежный вибровозбудитель, содержащий четыре дебаланса, в зависимости от начальной фазировки дебалансов способен сообщить рабочему органу машины негармонические колебания, подчиняющиеся различным законам. Во-первых, закон колебаний может быть несимметричным по условию: максимальное положительное значение ускорения не равно абсолютной величине максимального отрицательного значения ускорения. Во-вторых, закон колебаний может быть симметричен по условию сравнения модулей максимальных положительного и отрицательного значений ускорения, но при этом закон несимметричен по условию неравенства интервалов между чередующимися друг за другом положительным – отрицательным – положительным экстремумами ускорения. Первый закон колебаний следует сообщать рабочим органам транспортных вибрационных машин, основная задача которых обеспечить требуемую производительность оборудования. Второй закон колебаний следует использовать в технологическом (сепарирующем) вибрационном оборудовании, задачей которого является обеспечение требуемой производительности при высокой технологической эффективности процесса [15], осуществляемого в данном оборудовании. Второй вид закона колебаний рабочего органа позволяет обеспечить вибротранспортирование, то есть непрерывность процесса сепарирования при интенсивном воздействии вибрации на обрабатываемый сыпучий материал.

### Заключение

Представленные в настоящей работе исследования позволяют сделать вывод о возможности создания на базе центробежного вибровозбудителя с четырьмя дебалансами унифицированного привода, при настройке которого путем изменения начального положения дебалансов, он может быть использован как в транспортном, так и в технологическом (сепарирующем) вибрационном оборудовании в отраслях промышленности, связанных с переработкой сыпучих материалов.

### Литература

1. Борискин М.А., Гортинский В.В., Демский А.Б. Сепарирующие машины зерноперерабатывающих предприятий. М.: Машиностроение, 1979. 109 с.
2. Блехман И.И., Джанелидзе Г.Ю. Вибрационное перемещение. М.: Наука, 1964. 412 с.
3. Блехман И.И. Что может вибрация?: О «вибрационной механике» и вибрационной технике М.: Наука, 1988. 208 с.
4. Гортинский В.В., Демский А.Б., Борискин М.А. Процессы сепарирования на зерноперерабатывающих предприятиях. М.: Колос, 1980. 304 с.
5. Осанов А.Б. Вибрационное разделение смеси шелушенного и нешелушенного риса самосортированием в кольцевом канале: дис. ... канд. техн. наук. М., 1991. 149 с.
6. Корнев А.С. Повышение эффективности сепарации зерна на плоских решетках зерноочистительных машин: дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2015. 156 с.

7. Вибрации в технике: справочник. В 6 т. Т. 4. Вибрационные процессы и машины / ред. Э.Э. Лавендела. М.: Машиностроение, 1981. 509 с.
8. Вайсберг Л.А. Проектирование и расчет вибрационных грохотов. М.: Недра, 1986. 144 с.
9. Блехман И.И. Вибрационная механика. М.: Наука, 1994. 400 с.
10. Блехман И.И. О двух резонансных эффектах при воздействии высокочастотной вибрации на нелинейные системы // Химическая промышленность. 2004. Т. 81. № 7. С. 329–331.
11. Васильев А.М., Васильев С.М., Мачихин С.А., Абрамов Э.В., Волков А.С., Киракосян Д.В. Способ возбуждения механических колебаний силовых факторов с прогнозируемыми параметрами: пат. 2528550 Российская Федерация. 2012. Бюл. 26. 29 с.
12. Васильев А.М., Мачихин С.А., Волков А.С., Киракосян Д.В. Вибрационное перемещение при негармонических колебаниях рабочих органов сепарирующих машин // Хранение и переработка сельхозсырья. 2013. № 10. С. 43–45.
13. Васильев А.М., Мачихин С.А., Стрелюхина А.Н., Оспанов А.Б. Вибрационное перемещение при негармоническом законе колебаний рабочей поверхности // Хранение и переработка сельхозсырья. 2017. № 7. С. 50–55.
14. Васильев А.М., Мачихин С.А., Стрелюхина А.Н., Оспанов А.Б. Движение частицы по негармонически колеблющейся плоскости // Хранение и переработка сельхозсырья. 2017. № 8. С. 36–46.
15. Федоренко А.С. Параметры сепаратора для очистки фуражного зерна от крупных примесей: дис. ... канд. техн. наук. Барнаул, 2014. 242 с.

### **References**

1. Boriskin M.A., Gortinskii V.V., Demskii A.B. *Separating machines of grain processing enterprises*. Moscow. Mashinostroenie Publ., 1979. 109 p. (In Russian).
2. Blekhman I.I., Dzhanelidze G.Yu. *Vibrational movement*. Moscow. Science Publ., 1964. 412 p. (In Russian).
3. Blekhman I.I. *What can vibration do?: About "vibration mechanics" and vibration engineering*. Moscow. Science Publ., 1988. 208 p. (In Russian).
4. Gortinsky V.V., Gortinskii V.V., Demskii A.B., Boriskin M.A. *Separation processes at grain processing enterprises*. Moscow. Kolos Publ., 1980. 304 p. (In Russian).
5. Ospanov A.B. Vibrational separation of a mixture of peeled and unshelled rice by self-sorting in the annular channel. *Candidate's thesis*. Moscow, 1991. 149 p. (In Russian).
6. Kornev A.S. Improving the efficiency of grain separation on flat sieves of grain cleaning machines. *Candidate's thesis*. Voronezh, 2015. 156 p. (In Russian).
7. Vibrations in technology. Handbook. 6 V. In red. Lavendela E.E. *Vibration processes and machines*, V. 4. Moscow. Mashinostroenie Publ., 1981. 509 p. (In Russian).
8. Weisberg L.A. *Design and calculation of vibrating screens*. Moscow. Nedra Publ., 1986. 144 p. (In Russian).
9. Blekhman I.I. *Vibration mechanics*. Moscow, Science Publ., 1994. 400 p. (In Russian).
10. Blekhman I.I. About two resonant effects when exposed to high-frequency vibration on nonlinear systems. *Industry & Chemistry*. 2004, V. 81, no. 7, pp. 329–331. (In Russian).
11. Vasiliev A.M., Vasiliev S.M., Machikhin S.A., Abramov E.V., Volkov A.S., Kirakosyan D.V. *Method of excitation of mechanical oscillations of power factors with predictable parameters*. Patent RF, no. 2528550. 2012.
12. Vasiliev A.M., Machikhin S.A., Volkov A.S., Kirakosyan D.V. Vibrational movement with non-harmonic oscillations of the working bodies of the separation machines. *Storage and processing of farm products*. 2013, no. 10, pp. 43–45 (In Russian).
13. Vasiliev A.M., Machikhin S.A., Strelyukhina A.N., Ospanov A.B. Vibrational movement in case of non-harmonic law of oscillations of the working surface. *Storage and processing of farm products*. 2017, no. 7, pp. 50–55 (In Russian).
14. Vasiliev A.M., Machikhin S.A., Strelyukhina A.N., Ospanov A.B. Motion of a particle along a non-harmonically oscillating plane. *Storage and processing of farm products*. 2017, no. 8, pp. 36–46 (In Russian).
15. Fedorenko A.S. The parameters of the separator for cleaning feed grain from large impurities. *Candidate's thesis*. Barnaul, 2014. 242 p. (In Russian).

Статья поступила в редакцию 22.04.2019