10. Savelyev, Yu. A. Reduction of soil moisture losses by evaporation / Yu. A. Savelyev, O. N. Kukharev, N. P. Laryushin [et al.] // Agricultural machines and technologies. - 2018. - Vol. 12, No. 1. - pp. 42-47.

11. Savelyev, Yu. A. Theoretical study of the water balance of the soil and the process of evaporation of soil moisture / Yu. A. Savelyev, Yu. M. Dobrynin, P. A. Ishkin // Agricultural machines and technologies. - 2017. - No. 1. - pp. 23-28.

12. Savel'ev, Yu. a. Justification of the form of needles rotary working bodies traction-driven soil-cultivating tools / Y. A. Savel'ev, A. M. Petrov, P. A. Eskin, M. A. Petrov // proceedings of the Samara state agricultural Academy. – 2019. – No. 4. – P. 20-28.

13. Tarasenko, V. F. Erosion control multifunctional technological tool for tillage. / B. F. Tarasenko, S. V. Soboleva, A. V. Bondarchuk // Emergency: industrial and environmental safety. – 2007. - №1(29). – Pp.132-139.

Сведения об авторах

Принадлежность к организации

Киров Юрий Александрович - доктор технических наук, доцент, профессор Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный аграрный университет», Россия, Самарская обл., пгт. Усть-Кинельский, e-mail: kirov.62@mail.ru.

Иванайский Сергей Александрович - кандидат технических наук, доцент Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный аграрный университет», Россия, Самарская обл., пгт. Усть-Кинельский, e-mail: isa.7777@inbox.ru.

Афонин Александр Евгеньевич - кандидат технических наук, доцент Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный аграрный университет», Россия, Самарская обл., пгт. Усть-Кинельский, e-mail: imssaa@mail.ru.

Иванайский Максим Сергеевич - аспирант Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный аграрный университет», Россия, Самарская обл., пгт. Усть-Кинельский, e-mail: isa.7777@inbox.ru.

Author credentials

Affiliations

Kirov Yuri - Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Samara State Agrarian University", Samara Region, village, Russia, Ust-Kinelsky, e-mail: kirov.62@mail.ru.

Ivanaisky Sergey - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Samara State Agrarian University", Samara Region, village, Russia, Ust-Kinelsky, e-mail: isa.7777@inbox.ru.

Afonin Alexander - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Samara State Agrarian University", Samara Region, village, Russia, Ust-Kinelsky, e-mail: imssaa@mail.ru.

Ivanaisky Maxim - postgraduate student of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Samara State Agrarian University", Samara Region, village, Russia, Ust-Kinelsky, e-mail: isa.7777@inbox.ru

Поступила в редакцию (Received): 06.12.2021 Принята к публикации (Accepted): 20.12.2021

УДК 631.362.3
DOI: 10.35887/2305-2538-2021-6-56-67

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РЕЖИМА РАБОТЫ ГРАВИТАЦИОННОГО ПРИЕМНОГО РАСПРЕДЕЛИТЕЛЯ С ВИБРОКЛАПАНОМ

[1]Чернышов Алексей Викторович

[1]*Оробинский Владимир Иванович*
[1]*Гиевский Алексей Михайлович*
[1]*Баскаков Иван Васильевич*
[1]*Подорванов Данил Алексеевич*
[1]*ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I»*

Реферат. *Приведен анализ конструкций воздушно-решетчатых сепараторов. Рассмотрен гравитационный распределитель с виброклапаном, который монтируются отдельным модулем на сепараторе перед воздушной очисткой, составные части взаимозаменяемы, соединены при помощи болтов. Выявлены достоинства гравитационного распределителя с виброклапаном: равномерность распределения зернового вороха по ширине воздушного канала за счет наклонных поверхностей в конструкции; полнота выделения компонентов вороха за счет расслоения по плотности; отсутствие подвижных вращающихся частей, которые взаимодействуют с зерном, что важно для качественной работы пневмосистем зерноочистительных машин. Установлено, что работа приемно-распределительного устройства вибрационного типа зерноочистительной машины определяется параметрами системы «виброклапан-зерновой ворох». Цель работы - теоретические исследования работы виброклапана приемно-распределительного устройства при различных его режимах. Рассмотрены силы, действующие на частицу, движущуюся по поверхности виброклапана. Определено, что перемещение частиц зернового вороха в устройстве является прямолинейным относительным движением на колеблющейся плоскости. Выделено три этапа перемещения: первый этап – скольжение вперед и назад; второй этап – отрыв и полет; третий этап – относительный покой. Проведенные теоретические исследования режимов работы вибрационной поверхности гравитационного распределителя показали, что перемещение зерновой массы происходит лишь в направлении её уклона относительно горизонтали. При этом рациональные конструктивные и кинематические параметры виброклапана такие, как радиус и частота вращения эксцентрика, а также угол наклона вибрационной поверхности, которые соответственно составляли r=0,003 м, ω=140 мин$^{-1}$ и α=25°, позволяет исключить режим «подбрасывания».*

Ключевые слова: *зерноочистительная машина, виброклапан, приемно-распределительное устройство, питающее устройство, зерновой ворох, расслоение зернового вороха по плотности.*

Благодарности: *работа выполнена при поддержке и по заказу Минсельхоза России согласно тематическому плану-заданию научно-исследовательских работ за счёт средств федерального бюджета, регистрационный номер № НИОКТР АААА-А20-120072990002-8.*

THEORETICAL JUSTIFICATION OF THE OPERATING MODE OF THE GRAVITATIONAL RECEIVING DISTRIBUTOR WITH VIBROVALVE

[1]***Chernyshov Alexey***
[1]***Orobinsky Vladimir***
[1]***Gievsky Alexey***
[1]***Baskakov Ivan***
[1]***Podorvanov Danil***
[1]*FSBEI HE «Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great»*

Abstract. *An analysis of the designs of air-lattice separators is presented. A gravitational distributor with a vibration valve is considered, which is mounted as a separate module on the separator before air cleaning, the components are interchangeable, connected with bolts. The advantages of a gravitational distributor with a vibro-valve are revealed: uniform distribution of the grain heap along the width of the air channel due to inclined surfaces in the design; completeness of the selection of the components of the heap due to stratification by density; the absence of moving rotating parts that interact with the grain, which is important for the high-quality operation of the pneumatic systems of grain cleaning machines. It has been established that the operation of the receiving and distributing device of the vibration type of the grain cleaning machine is determined by the parameters of the "vibrovalve-grain heap" system. The purpose of the work is theoretical studies of the operation of the vibration valve of the receiving and distribution device under its various modes. The forces acting on a particle moving along the surface of the vi-*

brovalve are considered. It has been determined that the movement of the grain heap particles in the device is a rectilinear relative movement on an oscillating plane. There are three stages of movement: the first stage - sliding forward and backward; second stage - take off and flight; the third stage is relative peace. Theoretical studies of the modes of operation of the vibrating surface of the gravity distributor have shown that the movement of the grain mass occurs only in the direction of its slope relative to the horizontal. At the same time, rational design and kinematic parameters of the vibrating valve, such as the radius and rotation frequency of the eccentric, as well as the angle of inclination of the vibrating surface, which respectively were r = 0.003 m, ω = 140 min^{-1} and α = 25°, make it possible to exclude the "tossing" mode.

***Keywords**: grain cleaning machine, vibrating valve, receiving and distributing device, feeding device, grain heap, grain heap stratification by density.*

***Acknowledgements**: the work was carried out with the support and by order of the Ministry of Agriculture of Russia according to the thematic plan-task of research works at the expense of the federal budget, registration number No. R&D AAAAA-A20-120072990002-8.*

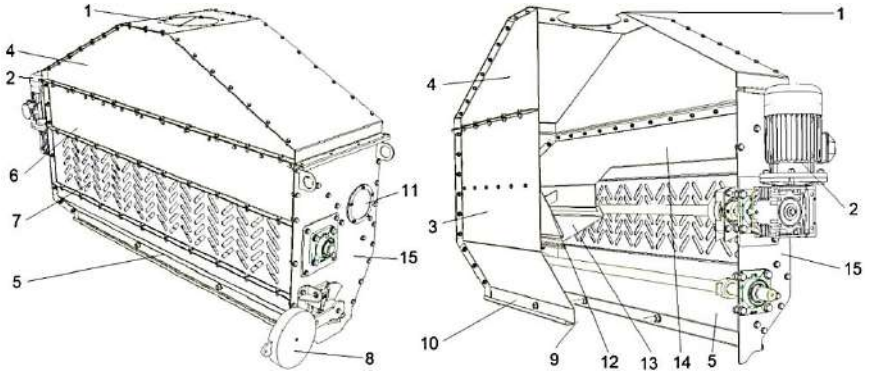
Введение. Современные универсальные воздушно-решетные сепараторы оснащаются питающими устройствами без рабочих органов, таких как шнеки, различного рода скребковые и лопастные конструкции травмирующие семена [1-5]. В настоящее время наблюдается следующая тенденция, при которой на зерноочистительных машинах с рабочей шириной менее 1,0 м в качестве питающего распределительного устройства устанавливают гравитационный распределитель, а при рабочей ширине более 1,0 м – дополнительно питающий валик или виброклапан. Последние устройства применяются фирмами «Westrup» (Дания), «Cimbria» (Германия), «Buhler» (Швейцария), «Воронежсельмаш» (Россия) [1-2, 6-7].

Одним из узлов зерноочистительной машины СВС–30 [8] является гравитационный распределитель с виброклапаном. Он монтируются отдельным модулем на сепараторе перед воздушной очисткой непосредственно по месту установки сепаратора. Рассматриваемое приемно-распределительное устройство является гравитационным, в нем установлены наклонные поверхности, в том числе и вибрационные посредством которых комбайновый ворох равномерно распределяется по его ширине и далее по каналу дорешетной очистки, а его производительность регулируется посредством грузового клапана [9].

Равномерность распределения зернового вороха по ширине воздушного канала непосредственно влияет на качественные показатели работы пневмосистемы и решетной очистки, в частности на полноту выделения компонентов вороха [1-2, 10-14]. У таких устройств есть одно неоспоримое преимущество это отсутствие подвижных вращающихся частей, которые взаимодействуют с зерном [7]. Также в виброподающих наклонных устройствах наблюдается расслоение компонентов вороха по плотности, что важно для качественной работы пневмосистем зерноочистительных машин [12-14].

Материалы и методы

Общий вид приемно-распределительного устройства приведен на рисунке 1. Конструкция составных частей приемного гравитационного распределителя предполагает их соединение при помощи болтовых соединений, каждая из которых в случае поломки может быть оперативно заменена. Приемно-распределительное устройство состоит из приемного кожуха *4* в верхней части которого, расположено загрузочное окно *1*, корпуса, выполненного в виде прямоугольного параллелепипеда усеченного в его нижней части и ограниченного боковыми стенками *15*, передней *5* и нижней частью передней стенки *10*, а также задними верхней *6*, нижней *5* и с воздухозаборными окнами *7* стенками, кроме того внутри смонтированы направляющий щиток.*12*, вибро- н гравитационный распределитель *13* и *8*. Боковые стенки *15* оснащены смотровыми окнами *11*. Для привода виброклапана на гравитационный распределитель монтируется мотор-редуктор *2*. При дальнейшем рассмотрении режимов работы устройства предполагается, что его установленная мощность на валу мотор-редуктора равна 0,55 кВт, а его частота вращения 140 мин $^{-1}$.



а) б)

Рисунок 1 – Общий вид приемно-распределительного устройства: а) вид сзади; б) вид спереди:
1 – загрузочное окно; 2 – мотор-редуктор привода вала эксцентриков; 3 – передняя стенка корпуса; 4 – приемный кожух; 5 – нижняя часть задней стенки корпуса; 6 – верхняя часть задней стенки корпуса; 7 – задняя стенка с воздухозаборными окнами; 8 – гравитационный распределитель; 9 – выгрузное окно; 10 – нижняя часть передней стенки корпуса; 11 – смотровое окно; 12 – передний направляющий щиток; 13 – виброклапан; 14 – задний направляющий щиток; 15 – боковые стенки кожуха

Общий вид виброклапана приемно-распределительного устройства представлен на рисунке 2.

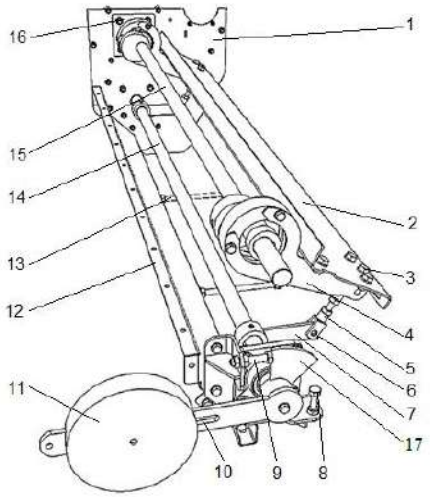


Рисунок 2 – Общий вид виброклапана приемно-распределительного устройства: 1 – боковая стенка приемно-распределительного устройства; 2 – поверхность виброклапана; 3 – крепеж виброклапана к рычагам; 4 – рычаг виброклапана; 5 – тяги; 6 – ось рычага вала грузового клапана; 7 – рычаг вала грузового клапана для связи с тягой; 8, 9 – ограничительные болты; 10 – рычаг для перемещения груза; 11 – груз; 12 – нижняя задняя стенка приемно-распределительного устройства; 13 – стяжки передней и задней стенок; 14 – вал грузового клапана; 15 – эксцентриковый вал; 16 – подшипниковый узел эксцентрикового вала, 17 – упор

Валы вибрационного *15* и грузового *14* клапанов закрепляются на боковинах *1* корпуса приемно-распределительного устройства при помощи подшипниковых узлов *16*.

Рычаг вала грузового клапана *7* при помощи оси *6* соединен с тягой *5* и далее с рычагом виброклапана *4*. На валу *14* грузового клапана установлен рычаг для перемещения груза *10* в пазу, которого перемещается груз *11*. Изменение зазора в виброклапане осуществляется следующим

образом. Поверхность виброклапана *2* с его рычагом *4* совершает возвратно-поступательные движения относительно подшипниковых узлов эксцентрикового вала *16,* при этом амплитуда перемещения составляет 0,006 м. Рычаг виброклапана *4* при помощи осей *6* и тяги *5* шарнирно соединен с рычагом вала грузового клапана 7, жестко фиксированного на валу *14*. Необходимый зазор между нижним краем поверхности виброклапана *2* и задним направляющим щитком *14* (рисунок 1) для прохода зернового материала из выгрузного окна *9* (рисунок 1) в воздушный канал зерноочистительной машины достигается из-за поворота вала *14* и ограничивается болтами *8* и *9* посредством упора *17*. Вращение вала *14* происходит из-за возникающего на нем дисбаланса крутящего момента посредством изменения положения груза *11* по пазу рычага *10* и силы тяжести комбайнового вороха действующего на поверхность виброклапана *2* предающейся посредством системы тяг на рычаг грузового клапана. Перестановка груза *11* в сторону от задней стенки приемно-распределительного устройства по пазу рычага *10* приводит к повороту вала *14* против вращения часовой стрелки и далее через рычаги *4, 7* посредством тяги *5* обеспечивают перемещение вибрационной поверхности в сторону уменьшения зазора. В случае, когда груз *11* перемещают ближе к гравитационному распределителю, зазор увеличивается. Максимальную величину зазора можно регулировать перемещением ограничительных болтов *8* и *9*.

Приемно-распределительное устройство работает следующим образом. Зерновой материал, подлежащий послеуборочной обработке, подается в устройство через загрузочное окно *1* (рис. 1) и далее по направляющему щитку *14* (рис. 1) под действием силы тяжести ворох перемещается на поверхность виброклапана *2* (рис.2). Поверхность виброклапана *2* (рис.2) расположена под постоянным углом относительно горизонтали и колеблется с постоянной частотой и амплитудой. Растекающийся по поверхности частицы под действием сил тяжести и инерции перемещаются в зазор образованный направляющей пластиной *12* (рисунок 1) и поверхностью виброклапана *2* (рисунок 2) в выгрузное окно *9* (рисунок 1) в пневмосепарирующий канал зерноочистительной машины.

Целью работы является теоретические исследования работы виброклапана приемно-распределительного устройства при различных режимах его работы.

Работа приемно-распределительного устройства вибрационного типа зерноочистительной машины в рассматриваемом случае должна определяться параметрами системы «виброклапан-зерновой ворох». В устройстве перемещение частиц входящих в состав зернового вороха является прямолинейным относительным движением на колеблющейся плоскости. В общем виде можно выделить три этапа перемещения: первый этап – скольжение вперед и назад; второй этап – отрыв и полет; третий этап – относительный покой. Последовательность и наличие вышеприведенных этапов зависит от устройств и технических характеристик виброклапана, так к ним можно отнести среднюю скорость перемещения за период *T* колебаний плоскости [15].

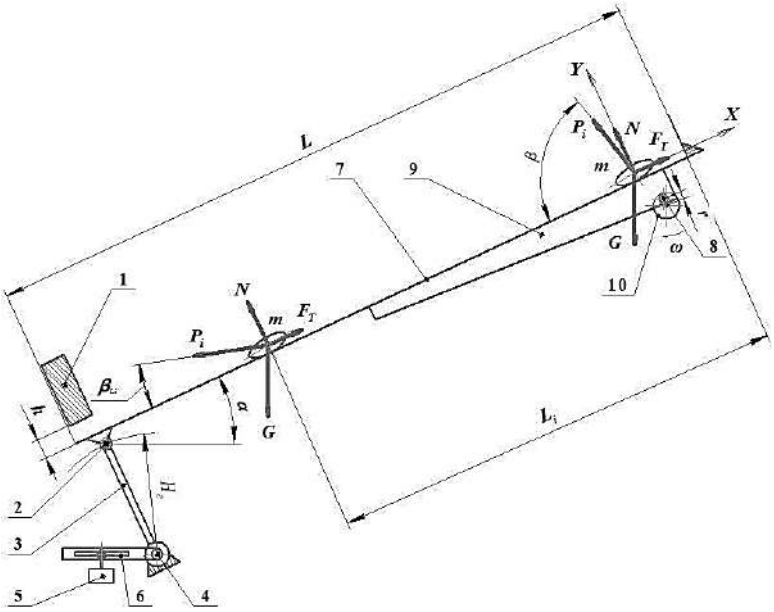
На рисунке 3 представлена схема для оценки функционирования виброклапана. В месте подачи зернового материала на поверхность виброклапана *7* частицы могут, двигаются как в направлении оси *X* так и в направлении оси *Y*, благодаря вращению эксцентрикового вала *10* закреплённого посредством оси *8* на его рычаге *9*. Центробежная сила инерции P_i, возникающая от вращения эксцентрикового вала *10* направлена в сторону эксцентриситета, при этом угол направления колебаний β будет равен углу между её вектором и поверхностью виброклапана. Амплитуда колебаний верхней части поверхности виброклапана по оси *X* и оси *Y* составляет $A = 2 \cdot r$ (м). Расстояние между направляющей поверхностью *7* и направляющей пластиной *h* изменятся посредством перемещения тяги грузового клапана *3* на вале *4* в зависимости от места установки груза *5* на рычаге *6*. Амплитуда перемещений поверхности виброклапан в направлении оси *Y* снижается до минимальных значений по мере удаления от эксцентрикового вала.

Результаты и их обсуждение

На частицу, движущуюся по поверхности виброклапана, действуют силы, К ним можно отнести силу тяжести *G*, центробежную силу инерции P_i, силу трения F_T и нормальная реакция со стороны поверхности виброклапана *N*.

Сила тяжести *G* определяется исходя из выражения 1.

$$G = m \cdot g, \text{ Н.} \quad (1)$$



N – реакция со стороны поверхности виброклапана, Н; *G* – сила тяжести, Н; P_i – центробежная сила инерции от эксцентрикового вала, Н; F_T – сила трения, Н; *r* – радиус эксцентрика, м; *h* – расстояние между направляющей пластиной и плоскостью колебаний, м; *m* – масса частицы кг; *L* – длина поверхности вибрации, м; L_i – расстояние от начала движения частицы до его нахождения на поверхности вибрации, м; H_c – радиус качения в направлении оси *Y*, м; *α* – угол между плоскостью колебаний и горизонталью; *β* – угол направления колебаний, град; β_{Li} – угол направления колебаний при его нахождения на поверхности вибрации, град; *ω* – угловая скорость эксцентрикового вала, $с^{-1}$

Рисунок 3 – Расчетная схема для оценки функционирования виброклапана:
1 – передний направляющий щиток; 2, 8 – ось крепления; 3 – тяга; 4 – вал грузового клапана; 5 – груз; 6, 9 – рычаги; 7 – поверхность виброклапана; 10 – эксцентриковый вал

Центробежную силу инерции P_i, возникающую от вращения эксцентрикового вала можно вычислить по выражению 2.

$$P_i = m \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \sin(\omega \cdot t), \text{ Н}; \quad (2)$$

Из выражения 3 определим силу трения F_T зерновки о вибрационную поверхность

$$F_T = N \cdot f = N \cdot tg\varphi, \text{ Н}, \quad (3)$$

где *f* – коэффициент трения зерновки.

Коэффициент рения *f* можно установить исходя из значений угла внешнего (внутреннего) трения *φ*. Угол внешнего трения в зерновой массе может меняться в пределах *φ*=10-32º [18].

Силу реакции вибрационной поверхности согласно рисунку 3 можно выразить следующим образом

$$N = G \cdot \cos\alpha - P_i \cdot \sin\beta, \text{ Н},$$

где *α* – угол наклона вибрационной поверхности, град *α*=25°. Это выражение можно выразить как

$$N = m \cdot g \cdot \cos\alpha - m \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \sin\beta, \text{ Н}, \quad (4)$$

где *β* – угол направления колебаний, относительно вибрационной поверхности, в дальнейших расчётах принимаем, что *β*=90°; *r* – радиус эксцентрика 0,003 м; *ω* – угловая скорость эксцентрикового вала, $с^{-1}$, принимаем *ω*=14,6 $с^{-1}$ при частоте вращения *n*=140 $мин^{-1}$; *α* – угол между вибрационной поверхностью и горизонтальной плоскостью, согласно конструктивным параметрам приемно-распределительного устройства принимаем, что *α*=25°.

Амплитуда колебаний вибрационной поверхности определяется исходя из выражения 5

$$A = r \cdot (1 - \cos(\omega \cdot t)), \text{ м.} \quad (5)$$

Конструктивные особенности гравитационного распределителя позволяют верхней части вибрационной поверхности выполнять колебания, как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости соответственно по осям *X* и *Y*. Зона схода зернового материала с виброклапана перемещается только по оси *X* (S_x). Показатель S_x можно определить по выражению (6) исходя из перемещения по оси *X* от среднего положения:

$$S_x = \frac{A}{2} = \text{r}, \text{ м.} \quad (6)$$

Величина перемещения зерновки по вибрационной поверхности в сторону оси *Y* равна сумме двух перемещений, одно из них эквивалентно значению радиусу кривошипа *r*, а другое – расстоянию ограниченным радиусом качения $H_г$ относительно центра оси *8* в направлении оси *Y*.

Тогда перемещение S_y по оси *Y* согласно рисунку 3 можно определить из прямоугольного треугольника с гипотенузой $H_г$ и катетом S_x по выражению (7):

$$S_y = H_г - \sqrt{H_г^2 - \frac{A^2}{4}}, \text{ м.} \quad (7)$$

Перемещение по оси *Y* любой точки находящейся на поверхности виброклапана на расстоянии L_i от его начала можно определить из выражения (8):

$$S_y^i = (A - S_Y) \cdot \frac{L_i}{L}, \text{ м.} \quad (8)$$

где *L* – длина вибрирующей поверхности, м.

Расстояние от начала движения частицы до его нахождения на поверхности вибрации при дальнейшем анализе работы виброклапана принимаем равным L_i=0,205 м, причем длину поверхности вибрации принимаем равной *L*=0,220 м согласно конструкторской документации.

Величину угла направления колебаний зерновки перемещающийся по вибрирующей поверхности для каждой его точки удаленной на расстояние L_i от начала подачи очищаемого вороха найдем по выражению (9):

$$\beta_i = \beta \cdot \frac{(L - L_i)}{L}, \text{ град} \quad (9)$$

Угол направления колебаний при нахождении частицы от начала подачи на расстоянии L_i = 0,205 м, будет иметь значение равным β_{Li}=6,1°.

Согласно рисунку 3 перемещение частицы зернового вороха по наклонной вибрирующей поверхности по осям *XOY* можно охарактеризовать дифференциальными уравнениями (10-11), которые имеют вид:

По оси *OX*:

$$\begin{aligned} m \cdot a_x &= m \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \cos\beta + m \cdot g \cdot \sin\alpha - \\ &- f \cdot (m \cdot g \cdot \cos\alpha - m \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \sin\beta) \end{aligned}. \quad (10)$$

По оси *OY*:

$$m \cdot a_y = m \cdot g \cdot \cos\alpha - m \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \sin\beta. \quad (11)$$

где a_x и a_y соответственно ускорение, сообщаемое поверхностью виброклапана по оси *OX* и *OY*.

Во время перемещения зернового вороха по поверхности рассматриваемого вибрационного клапана, частицы входящие в его состав и находящиеся на отдалении от точки подачи смеси имеют различный характер движения. Это связано, прежде всего, с условиями связи с другими частицами и опорной поверхностью виброклапана. Самые неподвижные зерновки находятся в нижних слоях, которые непосредственно контактируют с рабочей плоскостью, совершающей колебания [16]. Нижние слои взаимодействуют с верхними слоями посредством сил трения. Коэффициент сопротивления сдвигу будет максимальным в верхнем слое, а минимальный в нижнем слое относительно опорной плоскости. На наружный слой распределяющегося по ширине вибрационного распределителя материала действуют две составляющих сил (рис.3). Первая является проекцией

силы тяжести на ось X и направленна в сторону перемещения слоя, а вторая перпендикулярна первой и представляет собой силу инерции движения поверхности виброклапана. Они и позволяют двигаться зерновке [17].

Для оценки функционирования виброклапана необходимо оценить значение его показателя кинематического режима работы. Его можно определить по выражению 12.

$$k = \frac{\omega^2 \cdot r}{g}\ , \tag{12}$$

Учитывая, что начальные конструктивные и режимные параметры функционирования привода виброклапана известны, то показатель кинематического режима работы при указанных выше значениях равен k=0,07.

Зерновой ворох перемещающейся вибрационной поверхностью имеет три режима движения: первый – в сторону уклона; второй – в противоположную сторону уклона; третий – режим подбрасывания.

Определим условие, при котором частица двигается в режиме подбрасывания по выражению 13

$$k \geq \frac{\cos\alpha}{\sin\beta} \geq \frac{\cos\alpha}{\sin\beta_{Li}}. \tag{13}$$

Соотношение тригонометрических функций в начальном положении и конечном положении при угле направления колебаний при его нахождения на поверхности вибрации на расстоянии L соответственно будут равны 0,906 и 8,478, что больше кинематического режима работы k (k=0,07≤0,906≤8,478). Следовательно, при данных показателях работы виброклапана частицы будут двигаться без подбрасывания.

Условие, при котором зерновка перемещается в сторону противоположную уклону в месте подачи зернового материала, имеет следующий вид (14),

$$k \geq \frac{\sin(\varphi_{\max} + \alpha)}{\cos(\varphi_{\max} + \beta)} \geq \frac{\sin(\varphi_{\min} + \alpha)}{\cos(\varphi_{\min} + \beta)} \tag{14}$$

где φ_{min} – минимальный угол трения, принимаем, равным φ_{min}=10° [18]; φ_{min} – максимальный угол трения, принимаем, равным φ_{min}=32°[18]. Центробежная сила инерции P_i в данном случае направлена в противоположную сторону, тогда угол направленности колебаний принимаем равным β=-90°.

При угле направления колебаний β_{Li} при нахождении частицы на поверхности вибрации на расстоянии L_i, условие примет вид (15)

$$k \geq \frac{\sin(\varphi_{\min} + \alpha)}{\cos(\varphi_{\min} + \beta_{Li})} \geq \frac{\sin(\varphi_{\max} + \alpha)}{\cos(\varphi_{\max} + \beta_{Li})} \tag{15}$$

В рассматриваемом варианте направление силы инерции должно поменяться на противоположное. При этом при перемещении частиц зерновой смеси основополагающее влияние оказывают силы трения скольжения, которые возникают при вибротранспортировании. Данным силам свойственно минимальные значения углов трения. Многими исследователями отмечено, что при перемещении частиц по поверхности, совершающей амплитудные колебания с ускорением приближенным к ускорению свободного падения, фрикционные свойства зерновок находящиеся в ворохе значительно уменьшаются. Они периодически теряют сцепления между собой и контактирующей вибрирующей поверхностью приёмно-распределительного устройства и переходят в состояние псевдоожижение [18-20].

Определим соотношения тригонометрических функций при минимальном и максимальном значении угла трения φ согласно выражению 14. В результате расчётов получим, что кинематический режим работы устройства будет больше соотношений тригонометрических функций (k=0,07≤1,582≤3,303). Следовательно, ускорение, сообщаемое поверхностью виброклапана в начале движения зерновки не позволяет её двигаться вверх по ней при различном диапазоне углов трения.

Определим соотношения тригонометрических функций при минимальном и максимальном значении угла трения φ при угле направления колебаний β_{Li} согласно выражению 15. В результате расчётов получим, что кинематический режим работы устройства будет меньше соотношений тригонометрических функций (k=0,07≤0,593≤1,066). В конце движения процесс псевдоожижения становится постоянныv, при этом угол направления колебаний будет меньше минимального угла терния $\beta_{Li} < \varphi_{min}$. Следовательно, ускорение, сообщаемое поверхностью виброклапана не достаточно для подъема частиц вверх при минимальных и максимальных значениях углов трения. Поэтому зерновка в месте схода с вибрационной поверхности движется в направлении угла наклона вибрационной поверхности.

Условие, при котором зерновка перемещается в сторону уклона в месте подачи зернового материала при максимальных и минимальных значениях угла трения имеет следующий вид (16),

$$k \geq \frac{\sin(\varphi_{\max} - \alpha)}{\cos(\varphi_{\max} - \beta)} \geq \frac{\sin(\varphi_{\min} - \alpha)}{\cos(\varphi_{\min} - \beta)} \tag{16}$$

где φ_{min} – минимальный угол трения, принимаем равным φ_{min}=10° [18]; φ_{min} – максимальный угол трения, принимаем равным φ_{min}=32°[18].

При угле направления колебаний β_{Li} при нахождении частицы на поверхности вибрации на расстоянии L_i, при достижении выходного окна при максимальных и минимальных значениях угла трения условие примет вид (17)

$$k \geq \frac{\sin(\varphi_{\max} - \alpha)}{\cos(\varphi_{\max} - \beta_{Li})} \geq \frac{\sin(\varphi_{\min} - \alpha)}{\cos(\varphi_{\min} - \beta_{Li})} \tag{17}$$

Из выражения (16) и (17) определим соотношения тригонометрических функций в верхней части после подачи вороха в приемный бункер, а также в нижней части при достижении выходного окна при угле направления колебаний β_{Li}. В результате расчётов получим, что кинематический режим работы виброклапана будет больше соотношений тригонометрических функций для φ_{min}=10° (k=0,07≥-1,490 при β=90°; k≥-0.259 при β_{Li}=6,1°), и меньше для φ_{min}=32° (k=0,07≤2,256 при β=90°; k≤1,329 при β_{Li}=6,1°). В первом случае частица движется в сторону направления уклона равноускорено, во втором случае зерновка перемещается совместно с плоскостью движения вибрирующей поверхности независимо от направления колебаний.

Заключение

Проведенные теоретические исследования режимов работы вибрационной поверхности гравитационного распределителя показали, что перемещение зерновой массы происходит лишь в направлении её уклона относительно горизонтали. При этом рациональные конструктивные и кинематические параметры виброклапана такие, как радиус и частота вращения эксцентрика, а также угол наклона вибрационной поверхности, которые соответственно составляли r=0,003 м, ω=140 мин$^{-1}$ и α=25°, позволяет исключить режим «подбрасывания».

Список литературы

1. Ахматов А.А. Совершенствование процесса распределения зернового вороха по ширине рабочих органов воздушно-решетных зерноочистительных машин: дис. … канд. техн. наук : 05.20.01 / А.А. Ахматов. Воронеж, 2018. 155 с.

2. Оробинский В.И., Ахматов А.А., Гиевский А.М., Чернышов А.В., Баскаков И.В. Повышение эффективности процесса распределения зернового вороха по ширине рабочих органов зерноочистительных машин: монография. Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2020. 147 с.

3. Завражнов А.И., Тишанинов К.Н, Модернизация технологии подработки зерна путем применения авторегулируемых делителей потока сыпучих материалов. Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. 2008. № 3. С. 56–58.

4. Патрин В.А. Моделирование процесса взаимодействия зерновой среды с рабочими органами сортировальных машин. Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2008. № 6. С. 107–115.

5. Orobinsky V.I., Gievsky A.M., Gulevsky V.A., Baskakov I.V., Chernyshov A.V. Obtaining high-quality grain through the use of fractional technology for its cleaning. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference on Production and Processing of Agricultural Raw Ma-

terials (P2ARM 2020) (Russia, Voronezh, 26-29 February, 2020). IOP Publishing Ltd, 2021. Vol. 640. No. 022046. DOI: 10.1088/1755-1315/640/2/022046.

6. Агеев А.А. Совершенствование процесса загрузки зерноочистительных агрегатов : дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / А.А. Агеев.Воронеж, 2003. 145 с.

7. Жарких В. Ю., Тарасенко А. П. Обзор технических решений для равномерной загрузки зерноочистительных машин. Научно-исследовательские публикации. 2015. № 3(23). С. 76-81.

8. Исследование и разработка высокоэффективного воздушно-решетного сепаратора для фракционной технологии подготовки семенного материала. Отчет о НИР заключительный / ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ; Руководитель НИР В.И. Оробинский. Авторы: А.М. Гиевский, А.В. Чернышов. Рег. № НИОКТР АААА-А19-119070390018-5. 2019. 97 с.

9. Оробинский В.И., Гиевский А.М., Баскаков И.В., Ворохобин А.В., Чернышов А.В. Распределение зернового вороха по ширине зерноочистительной машины приёмно-распределительным устройством гравитационного типа. Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2021. Т.14. № 2(69). С. 12-18. DOI 10.53914/issn2071-2243_2021_2_12.

10. Патрин В.А. Графоаналитический метод определения энергии инерционного сдвигового течения зерновой среды на плоских рабочих органах сортировальных машин. Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2008. № 10. С. 86–94.

11. Тишанинов Н.П., Анашкин А.В. Классификация и анализ перспектив создания делителей потока сыпучих материалов. Наука в центральной России. 2013. № 5. С. 75–83.

12. Kharchenko S., Borshch Y., Piven M., Abduev M., Kovalyshyn S., Miernik A., Popardowski E., Kiełbasa P. Modeling of aerodynamic separation of preliminarily stratified grain mixture in vertical pneumatic separation duct. Applied Sciences (Switzerland). 2021. Vol. 11. № 10. DOI 10.3390/app11104383.

13. Тарабрин Д. С. Совершенствование процесса послерешетной пневмосепарации зернового вороха в зерноочистительных машинах. Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2017. № 1(52). С. 102-108. DOI 10.17238/issn2071-2243.2017.1.102.

14. Глушков А. Л. Анализ процесса движения компонентов зернового материала в приемной камере зерноочистительной машины. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2016. № 4(53). С. 69-75.

15. Сельвинский В. В. Вибрационное перемещение в процессах транспортирования. Вестник Амурского государственного университета. Серия: Естественные и экономические науки. 2016. № 75. С. 10-15.

16. Мачихин С. А., Рындин А. А., Васильев А. М., Стрелюхина А. Н. Движение верхнего слоя зерновой смеси на вибрирующей рифленой поверхности. Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2018. Т. 80. № 4(78). С. 55-62. DOI 10.20914/2310-1202-2018-4-55-62.

17. Рындин А. А. Совершенствование процесса вибросепарирования зерновых смесей от легких примесей: диссертация ... кандидата технических наук: 05.18.12 / Рындин А. А.; [Место защиты: Воронежский государственный университет инженерных технологий]. Москва, 2019. 182 с.

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

19. Тищенко Л. Н. Интенсификация сепарирования зерна. Харьков: Основа, 2004. 222 с.

Тищенко Л. Н., Ольшанский В. П., Ольшанский С. В. Виброрешетная сепарация зерновых смесей: монография. Харьков: Міськдрук, 2011. 279 с.

References

1. Akhmatov A.A. Improving the process of grain heap distribution across the width of the working bodies of air-sieve grain cleaning machines: dis. ... Candidate of Technical Sciences : 05.20.01 / A.A. Akhmatov. Voronezh, 2018. 155 p.

2. Orobinsky V.I., Akhmatov A.A., Gievsky A.M., Chernyshov A.V., Baskakov I.V. Improving the efficiency of the grain heap distribution process across the width of the working bodies of grain cleaning machines: monograph. Voronezh: Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter I, 2020. 147 p.

3. Zavrazhnov A.I., Tishaninov K.N., Modernization of grain processing technology through the use of autoregulated dividers of the flow of bulk materials. Reports of the Russian Academy of Agricultural Sciences. 2008. No. 3. pp. 56-58.

4. Patrin V.A. Modeling of the process of interaction of the grain medium with the working bodies of sorting machines. Siberian Bulletin of Agricultural Science. 2008. No. 6. pp. 107-115.

5. Orobinsky V.I., Gievsky A.M., Gulevsky V.A., Baskakov I.V., Chernyshov A.V. Obtaining high-quality grain through the use of fractional technology for its cleaning. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference on Production and Processing of Agricultural Raw Materials (P2ARM 2020) (Russia, Voronezh, 26-29 February, 2020). IOP Publishing Ltd, 2021. Vol. 640. No. 022046. DOI: 10.1088/1755-1315/640/2/022046.

6. Ageev A.A. Improving the process of loading grain cleaning units : dis. ... Candidate of Technical Sciences : 05.20.01 / A.A. Ageev.Voronezh, 2003. 145 p.

7. Zharkikh V. Yu., Tarasenko A. P. Review of technical solutions for uniform loading of grain cleaning machines. Research publications. 2015. No. 3(23). pp. 76-81.

8. Research and development of a highly efficient air-sieve separator for fractional seed preparation technology. Final R&D Report / Voronezh State Pedagogical University; Head of R&D V.I. Orobinsky. Authors: A.M. Gievsky, A.V. Chernyshov. Reg. No. R&D AAAA19-119070390018-5. 2019. 97 p.

9. Orobinsky V.I., Gievsky A.M., Baskakov I.V., Vorokhobin A.V., Chernyshov A.V. Distribution of the grain heap along the width of the grain cleaning machine by a gravity-type receiving and distributing device. Bulletin of the Voronezh State Agrarian University. 2021. Vol.14. No. 2(69). pp. 12-18. DOI 10.53914/issn2071-2243_2021_2_12.

10. Patrin V.A. Graphoanalytic method for determining the energy of inertial shear flow of grain medium on flat working bodies of sorting machines. Siberian Bulletin of Agricultural Science. 2008. No. 10. pp. 86-94.

11. Tishaninov N.P., Anashkin A.V. Classification and analysis of prospects for creating flow dividers of bulk materials. Science in central Russia. 2013. No. 5. pp. 75-83.

12. Kharchenko S., Borshch Y., Piven M., Abduev M., Kovalyshyn S., Miernik A., Popardowski E., Kiełbasa P. Modeling of aerodynamic separation of preliminarily stratified grain mixture in vertical pneumatic separation duct. Applied Sciences (Switzerland). 2021. Vol. 11. № 10. DOI 10.3390/app11104383.

13. Tarabrin D. S. Improving the process of post-flight pneumoseparation of grain heaps in grain cleaning machines. Bulletin of the Voronezh State Agrarian University. 2017. No. 1(52). pp. 102-108. DOI 10.17238/issn2071-2243.2017.1.102.

14. Glushkov A. L. Analysis of the process of movement of grain material components in the receiving chamber of a grain cleaning machine. Agrarian science of the Euro-North-East. 2016. No. 4(53). pp. 69-75.

15. Selvinsky V. V. Vibrational displacement in transportation processes. Bulletin of the Amur State University. Series: Natural and Economic Sciences. 2016. No. 75. pp. 10-15.

16. Machikhin S. A., Ryndin A. A., Vasiliev A.M., Strelyukhina A. N. Movement of the upper layer of the grain mixture on a vibrating corrugated surface. Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2018. vol. 80. No. 4(78). pp. 55-62. DOI 10.20914/2310-1202-2018-4-55-62.

17. Ryndin A. A. Improving the process of vibration separation of grain mixtures from light impurities : dissertation ... Candidate of Technical Sciences : 05.18.12 / Ryndin A. A.; [Place of defense: Voronezh State University of Engineering Technologies]. Moscow, 2019. 182 p.

18. Gortinsky V. V., Demsky A. B., Boriskin M. A. Separation processes at grain processing enterprises. M.: Kolos, 1980. 304 p.

Сведения об авторах

Принадлежность к организации

Чернышов Алексей Викторович – кандидат технических наук, доцент Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, г. Воронеж, e-mail: lexa-c@yandex.ru.

Оробинский Владимир Иванович – доктор сельскохозяйственных наук, профессор Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воро-

нежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, г. Воронеж, e-mail: main@agroeng.vsau.ru.

Гиевский Алексей Михайлович – доктор технических наук, профессор Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, г. Воронеж, e-mail: aleksej.gievskij@mail.ru.

Баскаков Иван Васильевич – доктор технических наук, профессор Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, г. Воронеж, e-mail: vasich2@yandex.ru.

Подорванов Даниил Алексеевич – лаборант кафедры сельскохозяйственных машин, тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, г. Воронеж, e-mail: smachin@agroeng.vsau.ru.

Authors credentials

Affiliations

Chernyshov Aleksey – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great”, Russia, Voronezh, e-mail: lexa-c@yandex.ru.

Orobinsky Vladimir – Full Doctor of Agricultural Sciences, Professor of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great”, Russia, Voronezh, e-mail: main@agroeng.vsau.ru.

Gievsky Aleksey – Full Doctor of Technical Sciences, Professor of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great”, Russia, Voronezh, e-mail: aleksej.gievskij@mail.ru.

Baskakov Ivan – Full Doctor of Technical Sciences, Professor of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great”, Russia, Voronezh, e-mail: vasich2@yandex.ru.

Podorvanov Daniil A. – Laboratory Assistant, the Dept. of Agricultural Machinery, Tractors and Cars, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russia, Voronezh, e-mail: smachin@agroeng.vsau.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию (Received): 09.12.2021 Принята к публикации (Accepted): 20.12.2021

УДК 621.311.24
DOI: 10.35887/2305-2538-2021-6-67-76

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАБЛЮДАТЕЛЯ СОСТОЯНИЯ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ФИЛЬТРА КАЛМАНА В ПРОГРАММЕ SIMINTECH

[1]Пиляев Сергей Николаевич
[1]Еремин Михаил Юрьевич
[1]Аксенов Игорь Игоревич
[1]Афоничева Дарья Дмитриевна
[1]ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I»

Реферат. *Актуальной является проблема обеспечения информацией о реальной частоте вращения ротора и электромагнитном моменте электродвигателя косвенным путем, с помощью расчетов по математической модели электродвигателя, используя только сравнительно просто измеряемые его параметры, такие как токи обмоток статора и напряжение питания. Задача*