

ISSN 1817-7204 (Print)
ISSN 1817-7239 (Online)
УДК 631.362.3

Поступила в редакцию 01.08.2017
Received 01.08.2017

И. Н. Шило, В. М. Поздняков, С. А. Зеленко

Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск, Беларусь

ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ПРЯМОТОЧНОГО ВИБРОПНЕВМАТИЧЕСКОГО СЕПАРАТОРА ЗЕРНОВОЙ СМЕСИ

Аннотация: Урожайность сельскохозяйственных культур во многом зависит от качества семян, их биологической ценности. При этом биологическую ценность семян характеризуют не столько геометрические параметры, сколько их плотность, которая связана со спелостью и натурой семени. Семена с наибольшей плотностью обладают высокой энергией прорастания, всхожестью и, соответственно, дают высокий урожай. Наиболее эффективным методом сортирования семян по плотности является вибропневматическое сортирование в псевдоожиженном слое. На основании проведенных исследований научно обоснована и практически реализована конструктивно-технологическая схема прямоточного вибропневматического сепаратора с новыми техническими решениями. Для изучения процесса сортирования семян в псевдоожиженном слое разработан и изготовлен экспериментальный стенд, главным элементом которого является разработанный прямоточный вибропневматический сепаратор, позволяющий значительно повысить эффективность сортирования компонентов зерновой смеси на фракции, отличающиеся между собой плотностью в пределах 10–15 %. На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований получена математическая модель для определения производительности вибропневматического оборудования, учитывающая физико-механические свойства обрабатываемых семян и конструктивные особенности оборудования. Анализ математических уравнений позволил определить основные направления повышения эффективности процесса вибропневматического сортирования зерна и семян в псевдоожиженном слое. Полученные математические зависимости могут быть использованы при обосновании рациональных режимно-конструктивных параметров работы вибропневматического оборудования для сортирования семян по плотности. Внедрение результатов исследований позволит создать научную и техническую основу создания высокопроизводительных машин для предпосевной подготовки зерна и семян.

Ключевые слова: вибропневматический сепаратор, сортирование, плотность, производительность, семена

Для цитирования: Шило, И. Н. Производительность прямоточного вибропневматического сепаратора зерновой смеси / И. Н. Шило, В. М. Поздняков, С. А. Зеленко // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. аграр. навук. – 2018. – Т. 56, № 1. – С. 99–108.

I. N. Shilo, V. M. Pozdniakov, S. A. Zelenko

The Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Belarus

PERFORMANCE OF STRAIGHT-FLOW VIBRO-PNEUMATIC SEPARATOR FOR GRAIN MIXTURE

Abstract: Crop yield greatly depends on quality and biological value of seeds. And biological value of seeds is characterized here not as much by geometric parameters as by their density, which is related to ripeness and nature of seed. Seeds with the greatest density have high germination energy, viability and, respectively, show high yield. The most efficient method for seed sorting by density is vibro-pneumatic sorting in a fluidized bed. Based on the studies carried out, the design and engineering layout of a direct-flow vibro-pneumatic separator with new engineering solutions has been scientifically substantiated and practically implemented. To study the process of seed sorting in a fluidized bed, a test rig was designed and manufactured, with the main element of developed direct-flow vibro-pneumatic separator allowing to significantly improve the efficiency of sorting the components of grain mixture into fractions that differ in density by 10–15 %. Based on the theoretical and experimental studies carried out, a mathematical model is obtained to determine the performance of vibro-pneumatic equipment, considering physical and mechanical properties of processed seeds and design features of the equipment. Analysis of mathematical equations allowed to determine the main directions for increasing the efficiency of vibro-pneumatic sorting of grain and seeds in a fluidized bed. The obtained mathematical dependencies can be used in substantiating rational mode and constructive parameters of vibro-pneumatic equipment operation for seed sorting by density. Implementation of research results will allow forming research and engineering basis for creation of high-performance machines for pre-seeding grain and seed preparation.

Keywords: vibro-pneumatic separator, sorting, density, performance, seeds

For citation: Shilo I. N., Pozdniakov V. M., Zelenko S. A. Performance of straight-flow vibro-pneumatic separator for grain mixture / *Vestsi Natsyyanal'nay akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk* = *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2018, vol. 56, no 1, pp. 99–108 (in Russian)

Введение. В современных условиях эффективность производства продукции растениеводства зависит от соблюдения технологии возделывания культуры и качества используемых для посева семян. Повышение качества семенного материала является одним из ключевых вопросов в семеноводстве. Проведенные исследования [1–4] показали, что посевные качества семян во многом определяются их плотностью: чем выше плотность, тем выше содержание в семени протеина, который влияет на энергию прорастания, а также крахмала, расщепление которого обеспечивает питание зародыша в процессе прорастания семени¹ [5–9].

Одним из перспективных способов повышения качества семенного материала путем сортирования по плотности является вибропневмосортирование в псевдооживленном слое. Сортирование сыпучих материалов по плотности посредством воздействия вибрации и восходящих потоков воздуха на обрабатываемый продукт является предметом изучения многих отечественных и зарубежных исследователей [10–16].

Математическое описание процессов, протекающих при сортировании компонентов сыпучей зерновой смеси на вибропневматическом сепараторе, требует учета большого количества факторов, а также стохастического характера перемещения отдельных частиц в псевдооживленном слое.

Существующие математические модели не позволяют адекватно описать процесс сортирования и перемещения семян с незначительным различием плотностей на рабочей деке вибропневматического сепаратора с прямоточным разделением фракций. Следовательно, для получения адекватных математических моделей необходимо провести дополнительные теоретические исследования с проверкой адекватности полученных уравнений реальному процессу на основе экспериментальных данных.

Цель настоящей работы – исследование процесса сортирования семян в псевдооживленном слое с разработкой математической модели для определения производительности вибропневматического оборудования с прямоточным разделением фракций.

Материалы и методы исследования. Для достижения поставленной цели на базе лаборатории послеуборочной обработки зерна и семян БГАТУ разработан и изготовлен экспериментальный стенд, позволяющий проводить исследования процессов сортирования семян сельскохозяйственных культур по плотности под действием вибрации и восходящих потоков воздуха. Схема экспериментального стенда представлена на рис. 1.

Основным элементом экспериментального стенда является разработанный прямоточный вибропневматический сепаратор для сортирования смеси семян по плотности [17–19]. Новизна технических решений, реализованных в новой конструкции вибропневматического сепаратора, подтверждена полученными патентами Республики Беларусь².

Принцип действия разработанного вибропневматического сепаратора с прямоточным разделением фракций для сортирования семян сельскохозяйственных культур основан на избирательном транспортировании отличающихся плотностью семян в псевдооживленном слое. Исходя из теоретических предпосылок вибропневмосепарирования семян, а также визуального контроля за поведением семян в рабочей камере лабораторного вибропневмосепаратора с использованием средств видеосъемки была разработана схема движения семян рапса в прямоточном вибропневматическом сепараторе (рис. 2).

Результаты и их обсуждение. Для описания процесса вибропневмосортирования целесообразно заменить реальный процесс соответствующей математической моделью, которая после

¹ Kwiatkowski J. Wplyw wielkosci ziarniakow pszenzyta na ich wartosc siewna // *Pamiętnik Puławski*. – 2004. – Z. 135. – S. 145–155.

² Устройство для сортирования семян : пат. ВУ 20450 / В.М. Поздняков, С.А. Зеленко, А.И. Ермаков. – Оpubл. 30.10.2016; Вибропневмосепаратор неоднородной зерновой смеси с рециркуляцией воздуха : пат. ВУ 20680 / В.М. Поздняков, С.А. Зеленко, А.И. Ермаков. – Оpubл. 30.12.2016; Вибропневмосепаратор для сыпучего продукта : пат. ВУ 21027 / В.М. Поздняков, А.И. Ермаков, С.А. Зеленко. – Оpubл. 30.04.2017.

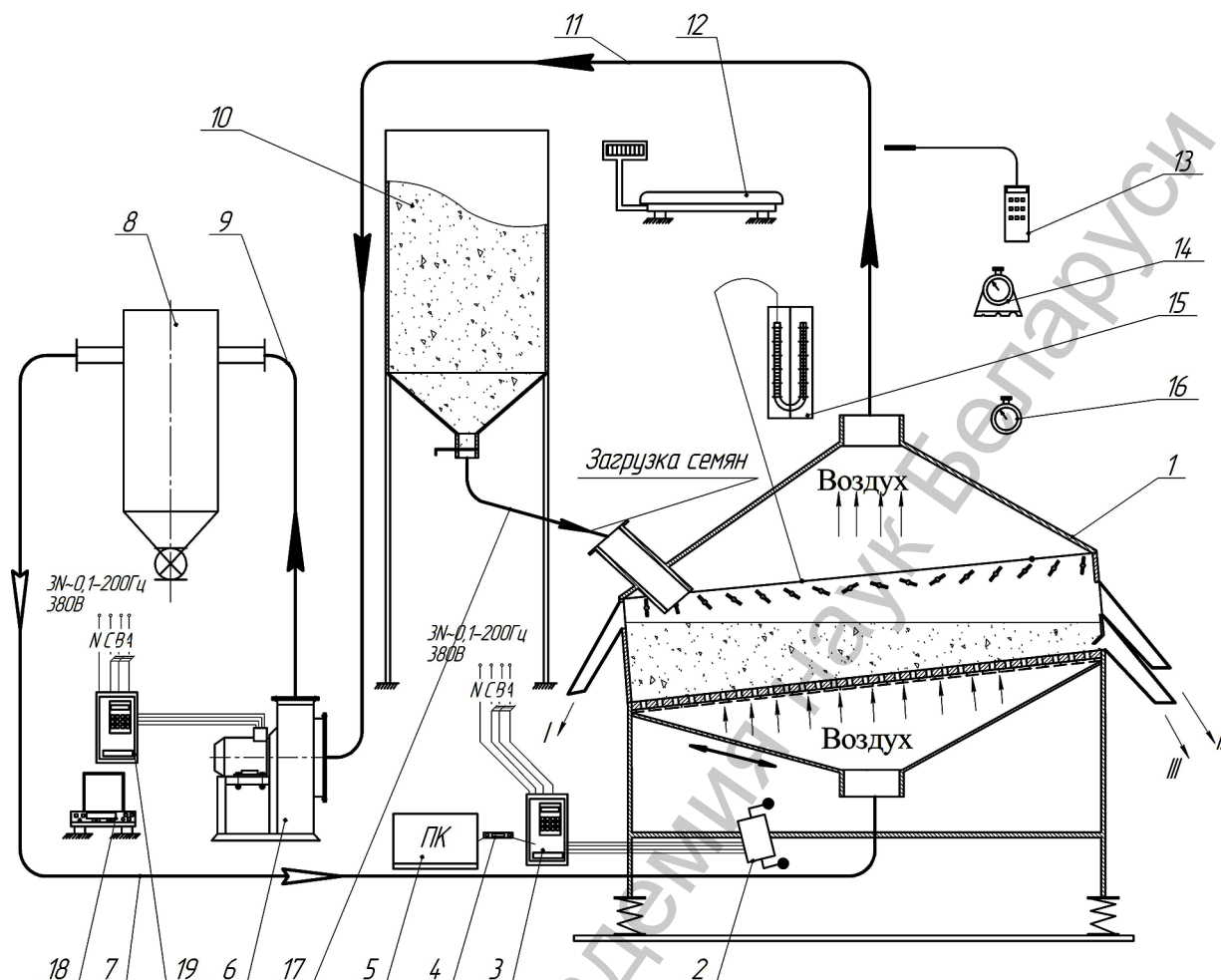


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1 – вибропневматический сепаратор; 2 – электровибратор ИВ-99Б; 3 – частотный преобразователь PROSTAR PR 6100; 4 – преобразователь интерфейса AC4; 5 – персональный переносной компьютер ASUS X550C; 6 – вентилятор ВЦП-3; 7 – нагнетающий воздуховод; 8 – осадочная камера; 9 – воздуховод; 10 – бункер; 11 – всасывающий воздуховод; 12 – весы; 13 – анемометр ТКА-ПКМ50; 14 – угломер маятниковый ЗУРИ-М; 15 – виброанализатор серии СД-21; 16 – секундомер; 17 – патрубок для подачи семян; 18 – анализатор влажности; 19 – частотный преобразователь ВЕСПЕР E2-8300-007Н

Fig. 1. Scheme of experimental stand: 1 – vibro-pneumatic separator; 2 – electrovibrator IV-99B; 3 – PROSTAR PR 6100 frequency converter; 4 – AC4 interface converter; 5 – personal laptop ASUS X550S; 6 – fan VTSP-3; 7 – air supply line; 8 – sedimentation chamber; 9 – air duct; 10 – bunker; 11 – air intake duct; 12 – scale; 13 – anemometer TKA-PKM50; 14 – pendulum inclinometer 3URI-M; 15 – vibro-analyzer SD-21; 16 – stopwatch; 17 – pipe for seed supply; 18 – moisture analyzer; 19 – VESPER E2-8300-007N frequency converter

экспериментальной проверки может служить средством получения достоверной информации о ходе протекания процесса и существенно упростить проведение инженерных расчетов при проектировании данного вида оборудования [20, 21].

Схема сил, действующих на частицу при вибропневматическом сортировании в псевдооживленном слое, представлена на рис. 3.

В системе координат, связанной с сетчатой декой вибропневмосепаратора, на частицу в общем случае действуют силы тяжести F_g , трения о поверхность сетчатой деки $F_{тр}$, нормальной реакции поверхности на частицу F_n , инерции $F_{ин}$, аэродинамического воздействия воздушного потока на частицу F_a , Архимеда $F_{ар}$, сопротивления F_c , вынуждающая сила $F_{вн}$, которая меняется по синусоидальному гармоническому закону $A \sin \omega t$ и образует угол β с сетчатой декой.

Для рассматриваемой системы сил и ускорений дифференциальные уравнения движения частицы относительно вибрирующей сетчатой деки в проекциях на оси OX и OY запишутся в следующем виде:

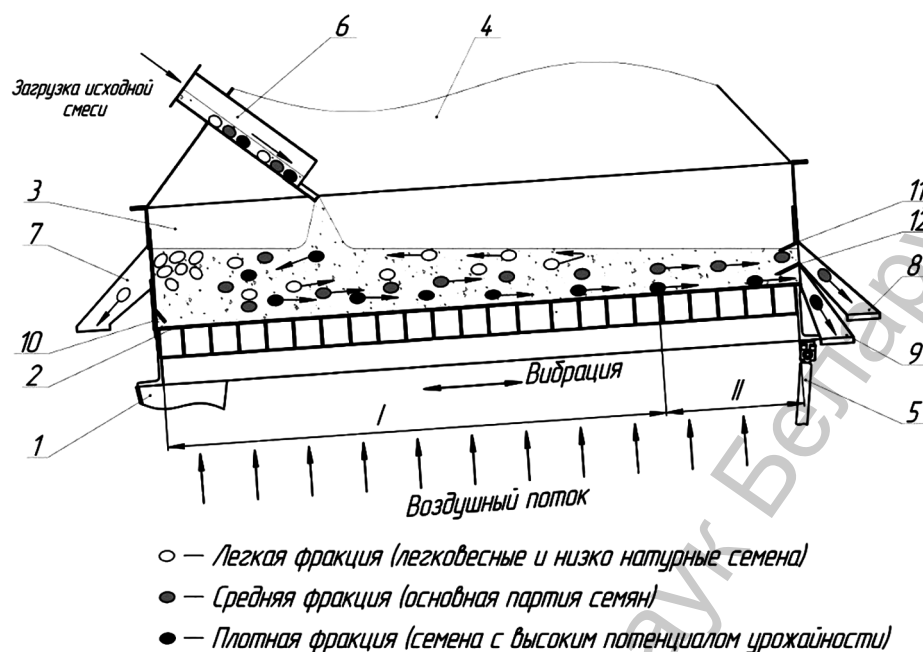


Рис. 2. Схема движения семян в рабочей камере прямооточного вибропневматического сепаратора: I – зона расслоения семян по плотности; II – зона перемещения плотной фракции семян; 1 – виброопоры; 2 – сетчатая дека; 3 – рабочая камера; 4 – конфузор; 5 – регулировочный винт; 6 – патрубок загрузки исходного продукта; 7 – патрубок для легкой фракции; 8 – патрубок для средней фракции; 9 – патрубок для плотной фракции; 10 – отражающая пластина; 11 – отбойная пластина; 12 – пластина регулировки уровня выходного продукта

Fig. 2. Scheme of seeds movement in operating chamber of straight-flow vibro-pneumatic separator: I – separation zone by density; II – movement zone of dense seeds fraction; 1 – vibration mounts; 2 – reticulated deck; 3 – operating chamber; 4 – converging tube; 5 – adjustment screw; 6 – seed supply pipe; 7 – light fraction pipe; 8 – basic fraction pipe; 9 – dense fraction pipe; 10 – reflecting plate; 11 – baffle plate; 12 – seeds regulating plate

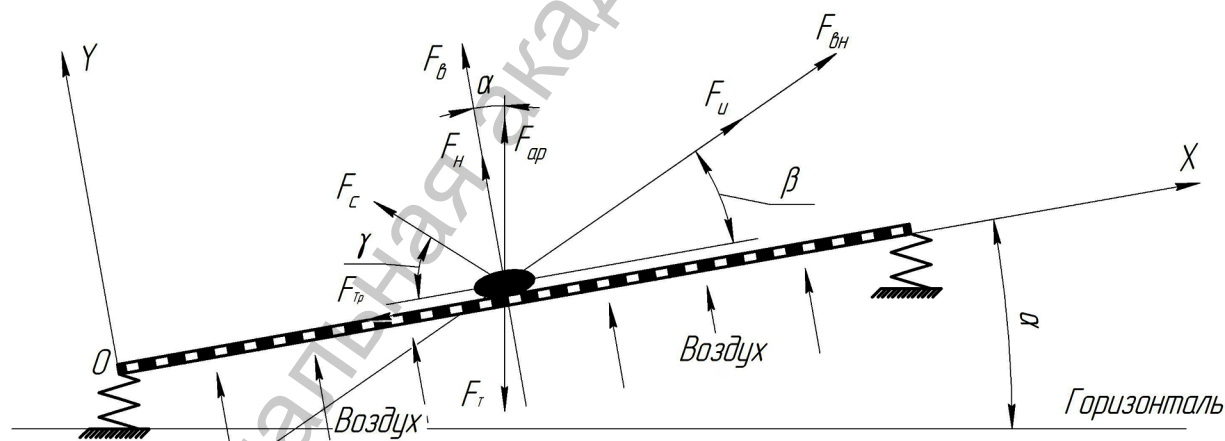


Рис. 3. Схема действующих на частицу сил при вибропневматическом сортировании в псевдоожиженном слое: 1 – сетчатая дека; 2 – электровибратор; 3 – виброопора; 4 – материальная частица

Fig. 3. Scheme of the forces acting on a particle in the case of vibration-pneumatic sorting in a fluidized bed: 1 – reticulated deck; 2 – electrovibrators; 3 – vibration mount; 4 – material particle

$$m \left(\frac{d^2 x}{dt^2} \right) = \sum_{i=1}^n F_{ix}; \quad (1)$$

$$m \left(\frac{d^2 y}{dt^2} \right) = \sum_{i=1}^n F_{iy} \quad (2)$$

(t – время движения частицы, с).

В нашем случае уравнения (1) и (2) примут следующий вид:

$$m \left(\frac{d^2 x}{dt^2} \right) = F_{\text{иx}} - F_{\text{тx}} + F_{\text{аpx}} - F_{\text{тp}} - F_{\text{cx}}; \quad (3)$$

$$m \left(\frac{d^2 y}{dt^2} \right) = F_{\text{иy}} + F_{\text{apy}} + F_{\text{н}} + F_{\text{в}} + F_{\text{cy}} - F_{\text{ты}}. \quad (4)$$

После подстановки в уравнения (3) и (4) значений соответствующих сил получим

$$m \left(\frac{d^2 x}{dt^2} \right) = m A \omega^2 \sin \omega t \cos \beta - mg \sin \alpha + F_{\text{ap}} \sin \alpha - F_{\text{тp}} - F_{\text{c}} \cos \gamma; \quad (5)$$

$$m \left(\frac{d^2 y}{dt^2} \right) = m A \omega^2 \sin \omega t \sin \beta + F_{\text{ap}} \cos \alpha + F_{\text{н}} + F_{\text{в}} + F_{\text{c}} \sin \gamma - mg \cos \alpha \quad (6)$$

(γ – угол приложения силы сопротивления F_{c} , рад).

Значение силы трения $F_{\text{тp}}$ зависит от направления мгновенных перемещений частиц. В первом приближении представим величину силы трения $F_{\text{тp}}$ в виде выражения

$$F_{\text{тp}} = f F_{\text{н}} = \operatorname{tg} \varphi_{\text{т}} F_{\text{н}}, \quad (7)$$

где f – коэффициент сопротивления перемещению частиц; $\varphi_{\text{т}}$ – угол трения частиц о сетчатую деку, рад.

Сила сопротивления F_{c} равна скорости колебаний $v_{\text{к}} = A \omega \cos \omega t$:

$$F_{\text{c}} = v_{\text{к}} = A \omega \cos \omega t \quad (8)$$

Частица не отрывается от вибрирующей сетчатой деки (находится на ее поверхности) в случае, если ее ускорение равно нулю, т. е. $\frac{d^2 y}{dt^2} = 0$ [22]. Тогда из уравнения (6) следует

$$F_{\text{н}} = mg \cos \alpha - m A \omega^2 \sin \omega t \sin \beta - A \omega \cos \omega t \sin \gamma - F_{\text{ap}} \cos \alpha - F_{\text{в}}. \quad (9)$$

Подставляем в уравнение (5) значение $F_{\text{тp}} = \operatorname{tg} \varphi_{\text{т}} F_{\text{н}}$. Величину $F_{\text{н}}$ определяем из выражения (9), тогда имеем

$$m \left(\frac{d^2 x}{dt^2} \right) = m A \omega^2 \sin \omega t \cos \beta - A \omega \cos \omega t \cos \gamma - mg \sin \alpha + F_{\text{ap}} \sin \alpha - \\ - (mg \cos \alpha - m A \omega^2 \sin \omega t \sin \beta - F_{\text{ap}} \cos \alpha - F_{\text{в}} - A \omega \cos \omega t \sin \gamma) \operatorname{tg} \varphi_{\text{т}}. \quad (10)$$

Зная зависимость каждого слагаемого от времени, проинтегрируем уравнение (10). Такая зависимость для силы сопротивления F_{c} установлена в выражении (8). Силу аэродинамического воздействия воздушного потока на частицу $F_{\text{в}} = S_{\text{сл}} \Delta P_{\text{сл}} = S_{\text{сл}} (\rho_{\text{т}} - \rho_{\text{в}}) (1 - \varepsilon_{\text{сл}}) g h_{\text{т}}$ принимаем, согласно [23], по времени постоянной.

Силу Архимеда также принимаем постоянной по времени и определяем из выражения

$$F_{\text{ap}} = \frac{\pi d_{\text{т}}^3}{6} \rho_{\text{в}} g, \quad (11)$$

где $d_{\text{т}}$ – эквивалентный диаметр частиц, м; $\rho_{\text{в}}$ – плотность воздуха, кг/м³; $\rho_{\text{т}}$ – плотность частиц, кг/м³; $\varepsilon_{\text{сл}}$ – порозность слоя частиц; $h_{\text{т}}$ – высота слоя частиц, м; g – ускорение свободного падения м/с²; $S_{\text{сл}}$ – площадь поперечного сечения слоя частиц, м²; $\Delta P_{\text{сл}}$ – перепад давления для воздуха, проходящего через слой частиц, Па.

После преобразования выражения (10), сгруппировав слагаемые с $\sin \omega t$ и $\cos \omega t$, получим

$$m \left(\frac{d^2 x}{dt^2} \right) = \frac{m A \omega^2 \sin \omega t \cos(\varphi_{\text{т}} - \beta)}{\cos \varphi_{\text{т}}} - \frac{A \omega \cos \omega t \cos(\varphi_{\text{т}} + \gamma)}{\cos \varphi_{\text{т}}} - \\ - \frac{mg \sin(\varphi_{\text{т}} + \alpha)}{\cos \varphi_{\text{т}}} + \frac{F_{\text{ap}} \sin(\varphi_{\text{т}} + \alpha)}{\cos \varphi_{\text{т}}} + F_{\text{в}} \operatorname{tg} \varphi_{\text{т}}. \quad (12)$$

Разделив обе части уравнения (12) на величину m , проинтегрировав его по времени t , можно найти значение скорости частицы $v_{\text{чх}}$:

$$v_{\text{чх}} = \int \left(\frac{d^2x}{dt^2} \right) dt = \frac{A\omega \cos \omega t \cos(\varphi_{\text{т}} - \beta)}{\cos \varphi_{\text{т}}} - \frac{A \sin \omega t \cos(\varphi_{\text{т}} + \gamma)}{m \cos \varphi_{\text{т}}} - \frac{gt \sin(\varphi_{\text{т}} + \alpha)}{\cos \varphi_{\text{т}}} + \frac{F_{\text{ап}} t \sin(\varphi_{\text{т}} + \alpha)}{m \cos \varphi_{\text{т}}} + \frac{F_{\text{в}} t}{m} \operatorname{tg} \varphi_{\text{т}} + C_1. \quad (13)$$

В нашем случае рассматривается поведение слоя после включения электровибраторов, поэтому постоянную интегрирования C_1 можно найти из начального условия: при $t=0$ также $v_{\text{чх}}=0$, так как без вибрации нет движения частиц. Тогда с учетом, что при $t=0$ выполняется $\sin \omega t=0$, выражение для определения постоянной интегрирования C_1 запишется в следующем виде:

$$C_1 = \frac{A\omega \cos(\varphi_{\text{т}} - \beta)}{\cos \varphi_{\text{т}}}. \quad (14)$$

Подставив значение C_1 из выражения (14) в (13), после преобразования получим окончательную формулу для определения скорости перемещения частицы:

$$v_{\text{чх}} = \frac{A\omega(1 - \cos \omega t) \cos(\varphi_{\text{т}} - \beta)}{\cos \varphi_{\text{т}}} - \frac{A \sin \omega t \cos(\varphi_{\text{т}} + \gamma)}{m \cos \varphi_{\text{т}}} - \frac{gt \sin(\varphi_{\text{т}} + \alpha)}{\cos \varphi_{\text{т}}} + \frac{F_{\text{ап}} t \sin(\varphi_{\text{т}} + \alpha)}{m \cos \varphi_{\text{т}}} + \frac{F_{\text{в}} t}{m} \operatorname{tg} \varphi_{\text{т}}. \quad (15)$$

Здесь $v_{\text{чх}}$ – скорость перемещения частицы, м/с; A – амплитуда колебания наклонной поверхности (сетчатой деки), мм, ω – частота колебания сетчатой деки, рад/с; α – угол наклона сетчатой деки, рад; t – время, с; $\varphi_{\text{т}}$ – угол трения частиц о наклонную плоскость, рад; β – угол действия вынуждающей силы, рад; m – масса частицы, кг; γ – угол приложения силы сопротивления, рад; g – ускорение свободного падения м/с²; $F_{\text{ап}}$ – сила Архимеда, Н; $F_{\text{в}}$ – сила аэродинамического воздействия воздушного потока на частицу, Н.

Таким образом, по формуле (15) можно рассчитать скорость частиц для безотрывного движения по наклонной оси OX .

Чтобы по выражению (15) можно было определить среднюю скорость перемещения частиц по сетчатой деке вибропневмосепаратора, необходимо ввести поправочный коэффициент, учитывающий аэродинамические явления, стохастический характер перемещения отдельных частиц и трение между ними.

С точки зрения практического использования скорость перемещения частицы по сетчатой деке не является показателем, характеризующим эффективность работы вибропневматического сепаратора. Критерием оценки эффективной работы вибропневматического сепаратора, наряду с качественными показателями, является его производительность, которую можно определить из условия неразрывности потока:

$$Q = Bh_{\text{дин}} \rho_{\text{н}} v_{\text{ср}}, \quad (16)$$

где $v_{\text{ср}}$ – средняя скорость перемещения частицы по сетчатой деке, м/с; Q – подача семян на сетчатую деку, кг/с; B – ширина сетчатой деки, м; $\rho_{\text{н}}$ – насыпная плотность семян, поступивших на вибропневмосортирование, кг/м³; $h_{\text{дин}}$ – высота слоя семян в процессе самосортирования, м.

Так как в процессе сортирования высота слоя продукта на сетчатой деке остается постоянной, то подача семян на деку равна производительности. Ширина канала B равна ширине слоя потока семян у выходных патрубков для плотной и средней фракций.

Высоту слоя семян в процессе сортирования $h_{\text{дин}}$ можно рассчитать по выражению

$$h_{\text{дин}} = h_1 + h_2, \quad (17)$$

где h_1 – высота зазора между сетчатой декой и выходным патрубком для плотной фракции, м; h_2 – высота зазора между выходным патрубком для плотной и средней фракций, м.

Тогда выражение (16) относительно производительности можно представить в следующем виде:

$$Q = B(h_1 + h_2)k\rho_n v_{cp}, \quad (18)$$

где Q – производительность вибропневматического сепаратора, кг/с; k – поправочный коэффициент.

С учетом выражения для определения скорости перемещения частицы по сетчатой деке (15) и поправочного коэффициента получим окончательную формулу для определения производительности прямооточного вибропневматического сепаратора:

$$Q = B(h_1 + h_2)k\rho_n \times \left[\left(\frac{A\omega(1 - \cos \omega t) \cos(\varphi_T - \beta)}{\cos \varphi_T} - \frac{A \sin \omega t \cos(\varphi_T + \gamma)}{m \cos \varphi_T} \right) - \left(\frac{gt \sin(\varphi_T + \alpha)}{\cos \varphi_T} + \frac{F_{ap} t \sin(\varphi_T + \alpha)}{m \cos \varphi_T} + \frac{F_B t}{m} \operatorname{tg} \varphi_T \right) \right]. \quad (19)$$

Для определения поправочного коэффициента k была проведена дополнительная серия экспериментальных исследований по оценке влияния скорости воздушного потока в рабочей камере вибропневмосепаратора и частоты колебаний сетчатой деки.

После обработки экспериментальных данных при помощи статистического пакета программы STATISTIKA 10 была получена регрессионная модель, позволяющая определить поправочный коэффициент k , описывающий изменение расчетной производительности разработанного вибропневматического сепаратора от скорости воздушного потока, частоты колебания сетчатой деки:

$$k = 120,05 - 80,28v_B - 7,64f + 7,23v_B^2 + 3,34v_B f + 0,10f^2.$$

На рис. 4. представлена графическая зависимость, показывающая изменение производительности вибропневматического сепаратора от угла наклона деки на основании экспериментальных и расчетных данных.

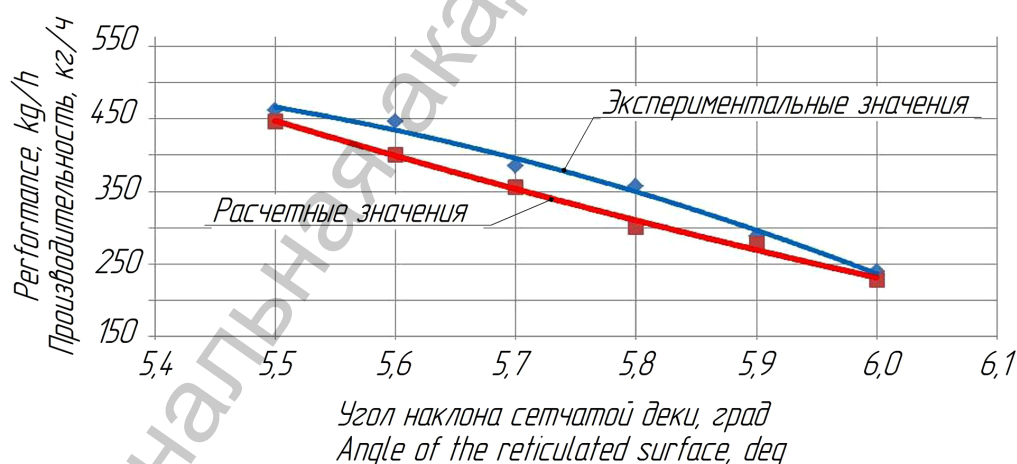


Рис. 4. Изменение расчетной и экспериментальной производительности вибропневмосепаратора от угла наклона деки

Fig. 4. Variation of calculated and experimental performance of the vibration-pneumatic separator depending on the deck tilt angle

Анализ графической зависимости показывает высокую сходимость расчетных и экспериментальных данных производительности вибропневматического сепаратора при одинаковых значениях режимно-конструктивных параметров работы.

Анализ полученного уравнения (19) показал, что производительность вибропневматического сепаратора с прямооточным разделением фракций зависит от угла наклона, амплитуды и частоты колебания сетчатой деки, а также параметров скорости воздушного потока в рабочей камере.

Заклучение. В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований получена математическая модель (19), описывающая изменение производительности разработанного вибропневмосепаратора с прямоточным разделением фракций в зависимости от частоты колебаний и угла наклона сетчатой деки, угла действия вынуждающей силы, силы аэродинамического воздействия воздушного потока на частицу и массы частицы. Анализ полученной математической модели позволил определить основные направления повышения производительности вибропневматического оборудования: уменьшение угла наклона сетчатой деки, повышение амплитуды и частоты колебаний сетчатой деки, снижение скорости воздушного потока в рабочей камере. Полученные математические зависимости могут быть использованы при обосновании рациональных режимно-конструктивных параметров работы вибропневматического оборудования для сортирования семян по плотности.

Результаты исследований представляют интерес для сельскохозяйственных предприятий и научных организаций, связанных с подготовкой семян. Важность и значимость изложенных материалов заключается в достижении социального и экономического эффекта за счет обеспечения сельскохозяйственных предприятий Республики Беларусь высококачественными посевными и товарными семенами, что позволит повысить урожайность возделываемых культур и, соответственно, экономические показатели.

Список использованных источников

1. Жатова, Г. О. Загальне насіннєзнавство : навч. посібник / Г. О. Жатова. – Суми : Унів. кн., 2010. – 273 с.
2. Зерновые культуры. Выращивание, уборка, хранение и использование : учеб.-практ. рук. / Д. Шпаар [и др.] ; под общ. ред. Д. Шпаара. – 4-е изд., испр. – Киев : Зерно, 2012. – 704 с.
3. Насіннєзнавство та методи визначення якості насіння сільськогосподарських культур : навч. посібник / за ред. С. М. Каленської. – Вінниця : ФОП Данилюк В. Г., 2011. – 320 с.
4. Макрушин, М. М. Насіннєзнавство польових культур : навч. посібник / М. М. Макрушин. – Київ : Урожай, 1994. – 208 с.
5. Фадеев, Л. В. Сильные семена на каждое поле. Щадящая пофракционная технология Фадеева / Л. В. Фадеев. – Харьков : Спецэлеватормелъмаш, 2012. – 178 с.
6. Фадеев, Л. В. Отборные семена – на каждое поле / Л. В. Фадеев // Хлебопродукты. – 2014. – № 5. – С. 31–33.
7. Фадеев, Л. В. Без пневмовибростала нельзя получить сильные семена / Л. В. Фадеев // Хлебопродукты. – 2013. – № 8. – С. 24–27.
8. Moshatati, A. Effect of grain weight on germination and seed vigor of wheat / A. Moshatati, M. H. Gharineh // Intern. J. of Agriculture a. Crop Sciences. – 2012. – Vol. 4, № 8. – P. 458–460.
9. Umarani, R. The effect of specific gravity separation on germination and biochemical potential of *Casuarina equisetifolia* seeds / R. Umarani, K. Vanangamudi // J. of Tropical Forest Science. – 2002. – Vol. 14, № 2. – P. 207–212.
10. Оценка работы вибропневмосепараторов усовершенствованной конструкции при очистке семян от низкона-турных примесей / В. Д. Галкин [и др.] // Перм. аграр. вестн. – 2017. – № 1 (17). – С. 65–72.
11. Дринча, В. М. Исследование параметров вибропневмосепараторов с прямоточной декой / В. М. Дринча, Л. М. Суконкин // Техника в сел. хоз-ве. – 1997. – № 5. – С. 13–15.
12. Blekhtman, I. I. On dynamic materials / I. I. Blekhtman, K. A. Lurie // Doklady Physics. – 2000. – Vol. 45, № 3. – P. 118–122.
13. Тарасевич, С. В. Анализ движения зернового материала на вибрационно-качающейся решетной поверхности сепаратора / С. В. Тарасевич // Изв. высш. учеб. заведений. Пищевая технология. – 2006. – № 6. – С. 59–61.
14. Галкин, В. Д. Теоретические и экспериментальные исследования вибропневмосепаратора / В. Д. Галкин, А. А. Хавыев ; Перм. гос. с.-х. акад. им. Д. Н. Прянишникова. – Пермь, 2004. – 20 с. – (Деп. в ВИНТИ РАН 11.08.2004; № 1388-B2004).
15. Drincha, V. M. Increase of efficiency of seed separation in gravity separator / V. M. Drincha, S. A. Pavlov // Actual tasks on agricultural engineering : proc. of the 30 Intern. symp. on agr. engineering, Opatija, Croatia, 12–15 March 2002 / Fac. of Agr. Univ. of Zagreb ; ed. S. Košutić. – Zagreb, 2002. – P. 265–273.
16. A numerical simulation of separation of crop seeds by screening – effect of particle bed depth / J. Li [et al.] // Food a. Bioproducts Processing. – 2002. – Vol. 80, № 2. – P. 109–117. DOI: 10.1205/09603080252938744
17. Поздняков, В. М. Повышение эффективности подготовки семенного материала на основе совершенствования конструкции сепаратора вибропневматического принципа действия / В. М. Поздняков, С. А. Зеленко, А. И. Ермаков // Вестн. Белорус. гос. с.-х. акад. – 2014. – № 1. – С. 163–167.
18. Поздняков, В. М. Экспериментальное исследование скорости воздушного потока и частоты колебаний сетчатой деки вибропневматического оборудования / В. М. Поздняков, С. А. Зеленко // Исследования, результаты. – 2014. – № 4. – С. 253–260.
19. Экспериментальное исследование сортирования семян рапса на вибропневматическом сепараторе / В. М. Поздняков [и др.] // Вестн. Алмат. технол. ун-та. – 2017. – № 2. – Р. 76–83.

20. Поздняков, В. М. Математическое описание процесса вибропневмосортирования семян по плотности / В. М. Поздняков, С. А. Зеленко, П. И. Павлюкевич // Переработка и управление качеством сельскохозяйственной продукции : сб. ст. III междунар. науч.-практ. конф., Минск, 23–24 марта 2017 г. / Белорус. гос. аграр. техн. ун-т ; редкол.: В. Я. Груданов [и др.]. – Минск, 2017. – С. 47–50.
21. Хавыев, А. А. К теории движения слоя семян по деке / А. А. Хавыев, В. А. Хандриков // Пермский аграрный вестник : сб. науч. тр. / Перм. гос. с.-х. акад. им. Д. Н. Прянишникова. – Пермь, 2003. – Вып. 9. – С. 93–95.
22. Гортинский, В. В. Процессы сепарирования на зерноперерабатывающих предприятиях / В. В. Гортинский, А. Б. Демский, М. А. Борискин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Колос, 1980. – 304 с.
23. Эпштейн, Л. В. Истечение твердых частиц из псевдооживленного слоя через отверстие в газораспределительной решетке / Л. В. Эпштейн, Ю. И. Черняев, А. Н. Цетович // Теорет. основы хим. технологии. – 1992. – Т. 26, № 3. – С. 438–441.

References

1. Zhatova G. O. *General seed production*. Sumi, Universitets'ka kniga Publ., 2010. 273 p. (in Ukrainian).
2. Shpaar D., Ginapp Kh., Dreger D., Zakharenko A., Kalenskaya S. *Cereals. Cultivation, harvesting, storage and use*. 4th ed. Kiev, Zerno Publ., 2012. 704 p. (in Russian).
3. Kalens'ka S. M. (ed.) *Seed production and methods of determining the quality of seeds of agricultural crops*. Vinnytsya, FOP Danilyuk V. G. Publ., 2011. 320 p. (in Ukrainian).
4. Makrushin M. M. *Seed production of field crops*. Kiev, Urozhay Publ., 1994. 208 p. (in Ukrainian).
5. Fadeev L. V. *Strong seeds for every field. Fadeev's environmen fractional technology*. Kharkov, Spetsselevatormel'mash Publ., 2012. 178 p. (in Russian).
6. Fadeev L. V. Selected seeds – for every field. *Khleboпродукты* [Khleboproducty], 2014, no. 5, pp. 31–33 (in Russian).
7. Fadeev L.V. Strong seeds can't be obtained without pneumo-vibration table *Khleboпродукты* [Khleboproducty], 2013, no. 8, pp. 24–27 (in Russian).
8. Moshatati A., Gharineh M.H. Effect of grain weight on germination and seed vigor of wheat. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 2012, vol. 4, no. 8, pp. 458–460.
9. Umarani R., Vanangamudi K. The effect of specific gravity separation on germination and biochemical potential of Casuarina equisetifolia seeds. *Journal of Tropical Forest Science*, 2002, vol. 14, no. 2, pp. 207–212.
10. Galkin V. D., Khavyev A. A., Khandrikov V. A., Grubov K. A., Galkin S. V. Estimation of vibro-pneumatic separator with an improved design by the seeds' purification from lightweight impurities. *Permskii agrarnyi vestnik* [Perm Agrarian Journal], 2017, no. 1 (17), pp. 65–72 (in Russian).
11. Drincha V. M., Sukonkin L. M. Investigation of the parameters of vibro-pneumatic separators with a direct-current deck plate. *Tekhnika v sel'skom khozyaistve* [Machinery in Agriculture], 1997, no. 5, pp. 13–15 (in Russian).
12. Blekhman I. I., Lurie K. A. On dynamic materials. *Doklady Physics*, 2000, vol. 45, no. 3, pp. 118–122.
13. Tarasevich S. V. Analysis of the movement of grain material on the vibration-swaying sieve surface of a separator. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Pishchevaya tekhnologiya* = *News of Institutes of Higher Education. Food Technology*, 2006, no. 6, pp. 59–61 (in Russian).
14. Galkin V. D., Khavyev A. A. *Theoretical and experimental research on a vibro-pneumo separator*. Permian, 2004. 20 p. No. 1388-B2004 VINITI. (in Russian, unpublished).
15. Drincha V. M., Pavlov S. A. Increase of efficiency of seed separation in gravity separator. Actual tasks on agricultural engineering: proceedings of the 30 International symposium on agricultural engineering, Opatija, Croatia, 12–15 March 2002. Zagreb, 2002, pp. 265–273.
16. Li J., Webb C., Pandiella S. S., Campbell G. M. A numerical simulation of separation of crop seeds by screening – effect of particle bed depth. *Food and Bioprocess Technology*, 2002, vol. 80, no. 2, pp. 109–117. DOI: 10.1205/09603080252938744
17. Pozdnyakov V. M., Zelenko S. A., Ermakov A. I. Increased efficiency of preparation of seed material on the basis of improved design of separator with vibro-pneumatic principle of operation. *Vestnik Belorusskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii* [Bulletin of the Belarusian State Agricultural Academy], 2014, no. 1, pp. 163–167 (in Russian).
18. Pozdnyakov V. M., Zelenko S. A. Experimental research on air flow velocity and frequency of variation of reticulated surface of vibro-pneumatic equipment. *Issledovaniya, rezul'taty* [Research, Results], 2014, no. 4, pp. 253–260 (in Russian).
19. Pozdnyakov V. M., Zelenko S. A., Pavlyukevich P. I., Matveev E. Z. The experimental research sorting canola on gravity separator's. *Vestnik Almatinskogo tekhnologicheskogo universiteta* = *The Journal of Almaty Technological University*, 2017, no. 2, pp. 76–83 (in Kazakh).
20. Pozdnyakov V. M., Zelenko S. A., Pavlyukevich P. I. Mathematical description of vibro-pneumatic sorting of seeds in respect of density. *Pererabotka i upravlenie kachestvom sel'skokhozyaystvennoy produktsii : sbornik statei III mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Minsk, 23–24 marta 2017 g.* [Processing and quality management of agricultural products: a collection of articles of the III International scientific and practical conference, Minsk, March 23–24, 2017]. Minsk, 2017, pp. 47–50 (in Russian).
21. Khavyev A. A., Khandrikov V. A. On the theory of seed motion on a deck plate. *Permskii agrarnyi vestnik: sbornik nauchnykh trudov* [Perm Agrarian Journal: a collection of scientific papers]. Permian, 2003, no. 9, pp. 93–95 (in Russian).
22. Gortinskii V. V., Demskii A. B., Boriskin M. A. *Separating processes at grain processing enterprises*. 2nd ed. Moscow, Kolos Publ., 1980. 304 p. (in Russian).
23. Epshtein L. V., Chernyaev Yu. I., Tsetovich A. N. Expulsion of solid particles from fluidized bed through a gas distribution lattice hole. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoi tekhnologii* [Theoretical Foundations of Chemical Engineering], 1992, vol. 26, no. 3, pp. 438–441 (in Russian).

Информация об авторах

Шило Иван Николаевич – доктор технических наук, профессор, ректор университета, Белорусский государственный аграрный технический университет (пр. Независимости, 99, 220023, Минск, Республика Беларусь). E-mail: bgatu@gmail.com

Поздняков Владимир Михайлович – кандидат технических наук, доцент, проректор по учебной и воспитательной работе, Белорусский государственный аграрный технический университет (пр. Независимости, 99, 220023, Минск, Республика Беларусь). E-mail: bgatu-nii@tut.by

Зеленко Сергей Анатольевич – магистр технических наук, ассистент, Белорусский государственный аграрный технический университет (пр. Независимости, 99, 220023, Минск, Республика Беларусь). E-mail: sergey-zelenko@mail.ru

Information about authors

Shilo Ivan N. – D.Sc. (Engineering), Professor. The Belarusian State Agrarian Technical University (99 Nezavisimosti Ave, Minsk 220023, Republic of Belarus). E-mail: bgatu@gmail.com

Pozdniakov Vladimir M. – D.Sc. (Engineering), Associate Professor. The Belarusian State Agrarian Technical University (99 Nezavisimosti Ave, Minsk 220023, Republic of Belarus). E-mail: bgatu-nii@tut.by

Zelenko Sergei A. – M.S., Assistant. The Belarusian State Agrarian Technical University (99 Nezavisimosti Ave, Minsk 220023, Republic of Belarus). E-mail: sergey-zelenko@mail.ru