

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ РЕШЁТНОГО СТАНА НА ПНЕВМОПОДУШКЕ

Аксенов Игорь Игоревич
Оробинский Владимир Иванович
Шацкий Владимир Павлович
Корнев Андрей Сергеевич

Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I

В настоящее время решётные зерноочистительные машины отличаются высокой универсальностью и широко применяются как в России, так и за рубежом. В решётных зерноочистительных машинах для крепления плоских качающихся решёт в основном используются плоские упругие подвески. Такой способ крепления решётного стана имеет определённые минусы, обусловленные значительной вибрационной нагрузкой, передающейся на раму сепаратора. Снизить уровень вибрации можно за счёт крепления решётного стана на пневмоподушке. Выполнен математический анализ физических процессов и смоделировано движение решётного стана на пневмоподушке. Процессы колебательного движения экспериментальной установки сравнивались с базовым исполнением решётного стана, крепление которого осуществлено на плоских упругих подвесках. Моделирование показало, что за счёт закрепления решётного стана с помощью пневмоподушки вертикальными перемещениями можно пренебречь. Зависимости скорости и ускорения решётного стана от времени рассчитывали при следующих численных значениях геометрических параметров: высота установки решётного стана (H) = 0,2 м; расстояние от решётного стана до эксцентрикового механизма (L) = 0,5 м; радиус эксцентрика (R) = 0,025 м; угловая скорость (ω) = 30 с⁻¹. Установлено, что применение пневмоподушки снижает реактивные силы, действующие на привод решётного стана. Доказана возможность применения координатного способа для определения закона движения решётного стана, его скорости и ускорения в зависимости от времени. С учётом силы упругости на изгиб пневмоподушки определены горизонтальные и вертикальные составляющие реактивных сил, действующих на сепарационную установку. Анализ влияния геометрических параметров привода решётного стана на значения реактивных сил позволил сделать вывод о необходимости уменьшения вертикального отклонения эксцентрика от центральной горизонтальной оси решётного стана.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: решётный стан, пневмоподушка, эксцентрик, ускорение, момент инерции.

SIMULATION OF THE MOVEMENT OF A CLEANER SHOE SUPPLIED WITH PNEUMATIC CUSHION

Aksenov Igor I.
Orobinsky Vladimir I.
Shatsky Vladimir P.
Kornev Andrey S.

Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great

Sieve grain cleaning machines are highly versatile and are widely used both in Russia and abroad. In sieve grain cleaning machines, flat elastic suspensions are mainly used to attach flat shaking sieves. This method of cleaner shoe fixing has certain disadvantages, due to the significant vibration load transmitted to the cleaner frame. The vibration level can be reduced by cleaner shoe attaching to the pneumatic cushion. The mathematical analysis of physical processes is carried out and the movement of a cleaner shoe supplied with pneumatic cushion is modeled. The processes of oscillatory motion of the experimental setup were compared with the basic design of a cleaner shoe mounted on flat elastic suspensions. The simulation showed that due to cleaner shoe fixing with the help of pneumatic cushion, vertical movements can be neglected. The dependences of the speed and acceleration of a cleaner shoe on time were calculated for the following numerical values of geometric parameters: the height of cleaner shoe installation (H) is 0.2 m; the distance from the cleaner shoe to the eccentric mechanism (L) is 0.5 m; the radius of the eccentric (R) is 0.025 m; angular velocity (ω) is 30 s⁻¹. It is defined that the use of a pneumatic cushion reduces the reactive forces acting on the drive of the cleaner shoe. The possibility of using the coordinate method to determine the law of motion of a cleaner shoe, its speed and acceleration as a function of time is proved.

Taking into account the transverse elasticity force of pneumatic cushion, the horizontal and vertical components of the reactive forces acting on the separation unit are determined. Having considered the influence of geometric parameters of the drive of a cleaner shoe on the values of reactive forces the authors concluded that it is necessary to reduce the vertical deviation of the eccentric from the central horizontal axis of a cleaner shoe.

KEYWORDS: cleaner shoe, pneumatic cushion, eccentric, acceleration, moment of inertia.

Введение

Решётные зерноочистительные машины отличаются высокой универсальностью и широко применяются как в России, так и за рубежом. В решётных зерноочистительных машинах для крепления плоских качающихся решёт в основном используются плоские упругие подвески, физика процесса работы которых описана в трудах отечественных и зарубежных специалистов [1, 2, 3, 5]. У такого способа крепления решётного стана есть определённые минусы, обусловленные значительной вибрационной нагрузкой, передающейся на раму сепаратора. Снизить уровень такой вибрации, предположительно, можно за счёт крепления решётного стана на пневмоподушке [4, 9].

Для определения закона движения решётного стана, его скорости и ускорения в зависимости от времени при предлагаемом способе крепления необходимо смоделировать процесс движения решётного стана на пневмоподушке [11]. Это позволит определить горизонтальные и вертикальные составляющие реактивных сил, действующих на сепарационную установку, и дать рекомендации по численным значениям геометрических параметров.

Материалы и методы исследования

Рассмотрим движение сепарационного решётного стана, совершающего колебания за счёт эксцентрика радиуса R с центром в точке D (рис. 1) [6], при повороте эксцентрика на угол $\alpha = \omega t$, где ω – угловая скорость вращения, c^{-1} .

Радиус эксцентрика $|DM| = R$, м; $|EO| = |BQ| = H$, м; $|QD| = L$, м.

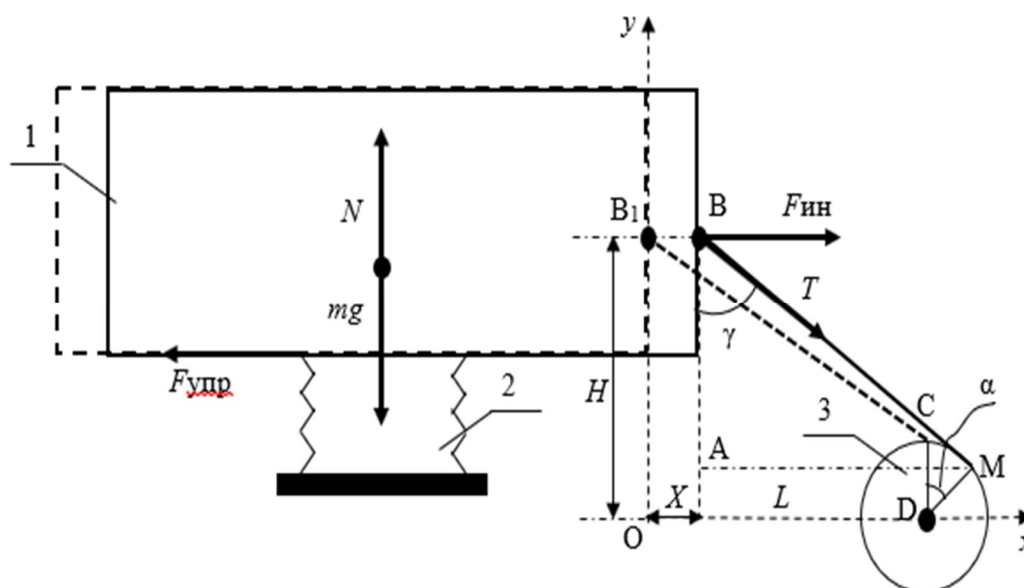


Рис. 1. К определению закона движения решётного стана на упругом основании:
1 – решётный стан; 2 – пневмоподушка; 3 – эксцентрик

Отметим, что в случае колебаний решётного стана, подвешенного на двух парах упругих стержней, он совершает поступательное движение по окружности радиуса, равного длине стержней, что вызывает как горизонтальные, так и вертикальные биения (рис. 2) [7, 8, 10].

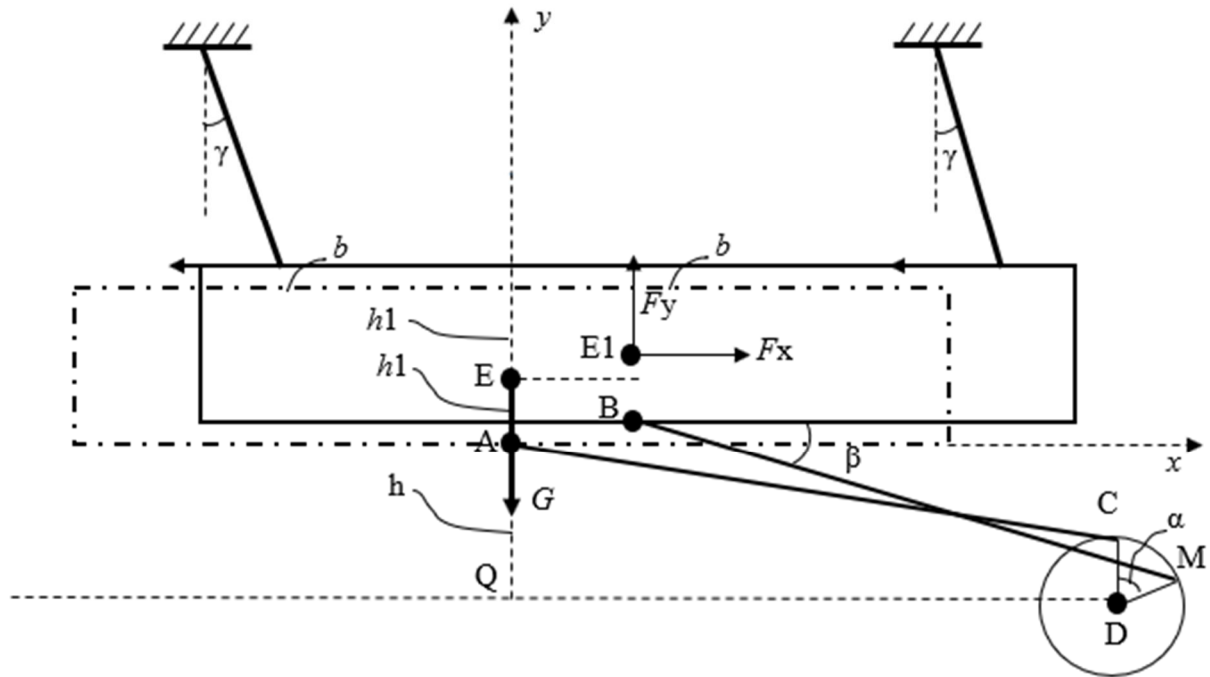


Рис. 2. Колебания решётного стана при стержневой подвеске

В нашем случае за счёт закрепления решётного стана с помощью пневмоподушки вертикальными перемещениями можно пренебречь.

При $t = 0$ решётный стан находится в положении, обозначенном на рисунке 1 штриховой линией, и квадрат длины толкателя B_1C определяется по формуле $(H - R)^2 + L^2 = |B_1C|^2$.

В текущий момент времени t точка C эксцентрика переместится в точку M с координатами $x_1 = L + R \sin \omega t$, $y_1 = R \cos \omega t$, а точка B_1 – в точку B с координатами (X, H) . Тогда квадрат длины толкателя BM определяется по формуле

$$(H - R \cos \omega t)^2 + (L - X + R \sin \omega t)^2 = |BM|^2. \quad (1)$$

Так как $B_1C = BM$, координату X точки B можно определить из уравнения

$$(H - R \cos \omega t)^2 + (L - X + R \sin \omega t)^2 = (H - R)^2 + L^2. \quad (2)$$

$$X(t) = R \sin \omega t + L - \sqrt{R^2 \sin^2 \omega t + L^2 - 2HR + 2HR \cos \omega t}. \quad (3)$$

Горизонтальная скорость точки B определяется дифференцированием уравнения (3)

$$V(t) = R\omega \cos \omega t - \frac{R\omega \sin \omega t (R \cos \omega t - H)}{\sqrt{R^2 \sin^2 \omega t + L^2 - 2HR + 2HR \cos \omega t}}, \quad (4)$$

а ускорение – дифференцированием уравнения (4) по формуле (5)

$$a(t) = -R\omega^2 \sin \omega t + \frac{[R\omega \sin \omega t (R \cos \omega t - H)]^2}{[R^2 \sin^2 \omega t + L^2 - 2HR + 2HR \cos \omega t]^{1.5}} - \frac{R^2 \omega^2 \cos 2\omega t - HR \omega^2 \cos \omega t}{\sqrt{R^2 \sin^2 \omega t + L^2 - 2HR + 2HR \cos \omega t}}. \quad (5)$$

Результаты и их обсуждение

Расчёты, проведённые по формулам (3) и (4), позволили определить зависимости скорости и ускорения решётного стана от времени (рис. 3, 4) при следующих численных значениях геометрических параметров: высота установки решётного стана (H) = 0,2 м; расстояние от решётного стана до эксцентрикового механизма (L) = 0,5 м; радиус эксцентрика (R) = 0,025 м; угловая скорость (ω) = 30 с⁻¹.

Максимальное по модулю ускорение в этом случае равно 23,5 м/с².

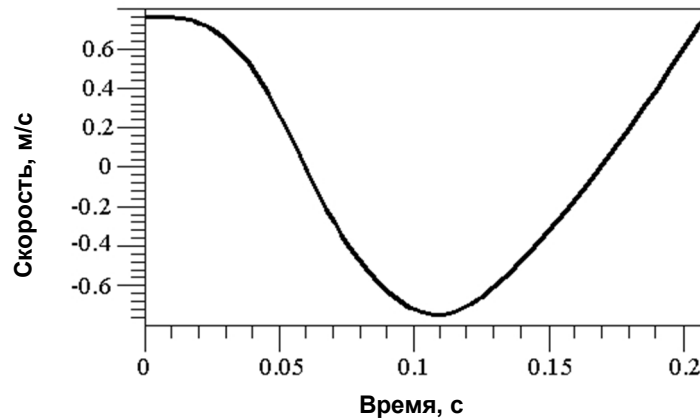


Рис. 3. Зависимость скорости решётного стана от времени

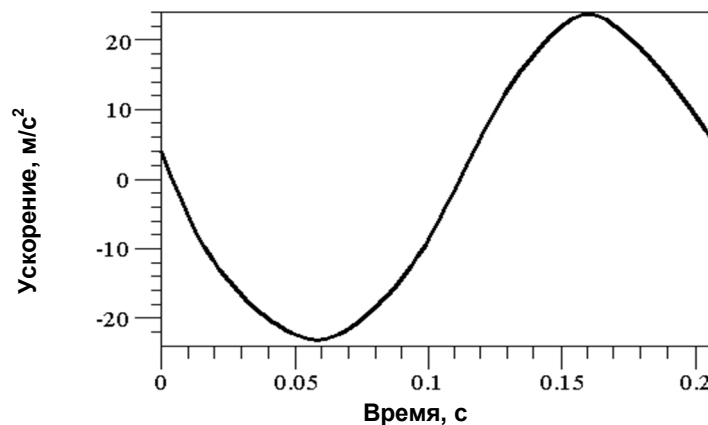


Рис. 4. Зависимость ускорения решётного стана от времени

Спроектируем силы, действующие на решётный стан (рис. 1), на ось x :

$$F_{ин} + T \sin \gamma - F_{упр} = 0, \tag{6}$$

откуда сила реакции $T = (F_{упр} - F_{ин}) / \sin \gamma$, $\sin \gamma = \frac{L - X(t) + R \sin \omega t}{\sqrt{(H - R)^2 + L^2}}$.

В силу жёсткого закрепления пневмоподушки к стану и корпусу установки при её изгибе возникает переменная горизонтальная сила упругости, определяемая по известной формуле

$$F_{упр}(t) = -\frac{3EI \cdot X(t)}{S^3}, \tag{7}$$

где E – модуль упругости материала пневмоподушки, Па;

I – момент инерции, м⁴;

S – высота пневмоподушки, м

Отметим, что при изменении давления воздуха в пневмоподушке значения параметров, входящих в формулу (7), могут значительно изменяться, в связи с чем, предполагая линейность зависимости силы упругости от $X(t)$, будем рассчитывать её из соотношения $F_{\text{упр}}(t) = -k \cdot X(t)$, где коэффициент k определяется экспериментально.

Тогда

$$F_{\text{упр}}(t) = -\frac{3EI \cdot \left(R \sin \omega t + L - \sqrt{R^2 \sin^2 \omega t + L^2 - 2HR + 2HR \cos \omega t} \right)}{S^3}. \quad (8)$$

Горизонтальную силу инерции $F_{\text{ин}}$ можно определить как $F_{\text{ин}} = -ma$, где m – масса решётного стана.

$$F_{\text{ин}} = mR\omega^2 \sin \omega t - \frac{m[R\omega \sin \omega t (R \cos \omega t - H)]^2}{[R^2 \sin^2 \omega t + L^2 - 2HR + 2HR \cos \omega t]^{1.5}} + m \frac{R^2 \omega^2 \cos 2\omega t - HR \omega^2 \cos \omega t}{\sqrt{R^2 \sin^2 \omega t + L^2 - 2HR + 2HR \cos \omega t}}. \quad (9)$$

Тогда силу T можно представить в виде

$$T = (F_{\text{упр}} - F_{\text{ин}}) / \sin \gamma. \quad (10)$$

Горизонтальная и вертикальная составляющие силы T соответственно равны:

$$T_x = F_{\text{упр}} - F_{\text{ин}}, \quad T_y = (F_{\text{упр}} - F_{\text{ин}}) \cdot \text{ctg} \gamma. \quad (11)$$

На рисунках 5 и 6 представлены графики этих составляющих при указанных выше геометрических параметрах установки и $k = 4000$ Н/м.

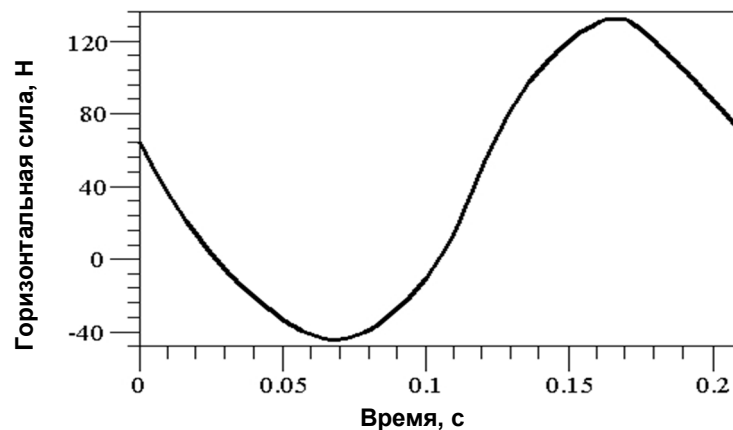


Рис. 5. Зависимость горизонтальной силы реакции решётного стана от времени

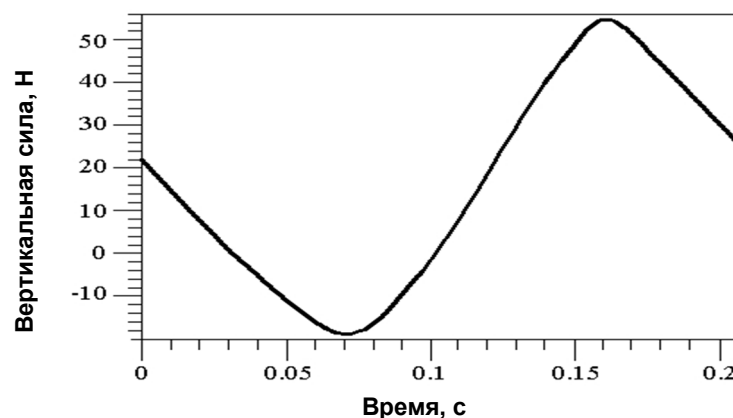


Рис. 6. Зависимость вертикальной силы реакции решётного стана от времени

Остановимся на влиянии положения эксцентрика на величины составляющих реактивной силы, вызывающих горизонтальные и вертикальные биения установки.

При уменьшении величины H , характеризующей вертикальное положение эксцентрика относительно решётного стана, максимальные горизонтальные и вертикальные силы реакций установки снижаются. Так, при фиксированной величине $L = 0,5$ м и при $H = 0,2$ м $T_x = 133$ Н и $T_y = 53$ Н, а при $H = 0$ м $T_x = 90$ Н и $T_y = 3,5$ Н, что свидетельствует о необходимости уменьшить значение H (в зависимости от конструктивных возможностей).

При уменьшении величины L , характеризующей горизонтальное положение эксцентрика относительно решётного стана, горизонтальные и вертикальные силы реакций установки увеличиваются. Так, при фиксированной величине $H = 0,2$ м и при $L = 0,5$ м $T_x = 133$ Н и $T_y = 53$ Н, а при $L = 0,3$ м $T_x = 177$ Н и $T_y = 120$ Н, что свидетельствует о необходимости увеличить значение L (в зависимости от конструктивных возможностей).

Отметим, что при $H = 0$ значение параметра L практически не влияет на изменение горизонтальных и вертикальных сил реакций установки.

Также следует отметить, что интенсивность биений корпуса установок определяется не величинами реактивных сил, а их изменением, равным разности между максимальным и минимальным значениями этих сил. Так, при фиксированной величине $L = 0,5$ м и при $H = 0,2$ м $\Delta T_x = T_{x,\max} - T_{x,\min} = 175$ Н и $\Delta T_y = T_{y,\max} - T_{y,\min} = 71$ Н, а при $H = 0$ м $\Delta T_x = T_{x,\max} - T_{x,\min} = 158$ Н, $\Delta T_y = T_{y,\max} - T_{y,\min} = 6,7$ Н.

При фиксированной величине $H = 0,2$ м и при $L = 0,5$ м $\Delta T_x = T_{x,\max} - T_{x,\min} = 175$ Н и $\Delta T_y = T_{y,\max} - T_{y,\min} = 71$ Н, а при $L = 0,3$ м $\Delta T_x = T_{x,\max} - T_{x,\min} = 208$ Н, $\Delta T_y = T_{y,\max} - T_{y,\min} = 140$ Н.

Выводы

Установлено, что применение пневмоподушки снижает реактивные силы, действующие на привод решётного стана.

Доказана возможность применения координатного способа для определения закона движения решётного стана, его скорости и ускорения в зависимости от времени.

С учётом силы упругости на изгиб пневмоподушки определены горизонтальные и вертикальные составляющие реактивных сил, действующих на сепарационную установку.

Анализ влияния геометрических параметров привода решётного стана на значения реактивных сил позволил сделать вывод о необходимости уменьшения вертикального отклонения эксцентрика от центральной горизонтальной оси решётного стана.

Библиографический список

1. Анализ тенденций развития современных зерноочистительных и сортировальных машин / В.П. Чеботарев, И.В. Барановский, А.А. Князев, П.М. Немцев // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве. – Минск : Науч.-практ. центр Нац. Академии наук Беларуси по механизации сельского хозяйства, 2010. – Т. 1. – С. 184–189.
2. Бурков А.И. Определение оптимальной амплитуды и частоты колебаний решётного стана машины предварительной очистки зерна МПЗ-50 / А.И. Бурков, А.Л. Глушков // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. – 2011. – № 2 (21). – С. 62–67.
3. Влияние режима работы решётного стана на качественные показатели работы решёт / М.К. Харитонов, А.М. Гиевский, А.В. Чернышов и др. // Инновационные технологии и технические средства для АПК : матер. международной науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов (Россия, г. Воронеж, 12–13 ноября 2019 г.). – Воронеж : ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2019. – С. 421–425.

4. Пат. 189555 Российская Федерация, СПК В07В 1/28 (2018.08). Решётный стан / В.И. Оробинский, А.С. Корнев, И.И. Аксенов ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. – № 2018143170 ; заявл. 05.12.2018 ; опубл. 28.05.2019, Бюл. № 16. – 2 с.

5. Расположение колосовых решёт в современных зерноочистительных машинах / А.В. Чернышов, А.М. Гиевский, И.В. Баскаков, М.К. Харитонов // Наука и образование в современных условиях : матер. международной науч. конф. (Россия, г. Воронеж, 10 марта – 22 апреля 2016 г.). – Воронеж : ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2016. – С. 173–178.

6. Свиридов Л.Т. Теоретические исследования движения рабочего органа плоскорешётного сепаратора с новой конструкцией подвесок решётного стана / Л.Т. Свиридов, Г.Н. Вахнина // Депонированная рукопись № 372-И2010, 17.06.2010.

7. Харитонов М.К. Способы повышения эффективности работы решётных станков зерноочистительных машин / М.К. Харитонов, В.В. Марычев, А.В. Чернышов // Инновационные технологии и технические средства для АПК : матер. международной науч.-практ. конф. (Россия, г. Воронеж, 15–17 ноября 2016 г.). – 2016. – С. 96–99.

8. Чернышов А.В. Исследование работы решётного стана при фракционировании зернового вороха / А.В. Чернышов // Инновационные технологии и технические средства для АПК : матер. Всероссийской науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов, посвященной 100-летию Воронежского гос. аграр. ун-та им. императора Петра I (Россия, г. Воронеж, 28–29 ноября 2011 г.). – Ч. IV. – Воронеж : ФГБОУ ВПО Воронежский ГАУ. – 2012. – С. 128–131.

9. Analysis of the beats of separation sieve pans / V.P. Shatsky, V.I. Orobinsky, I.I. Axenonov, A.S. Kornev // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference on Engineering Studies and Cooperation in Global Agricultural Production. – Bristol, 2021. – No. 012106.

10. Design of a grain cleaning machine for small farms / K.D. Astanakulov, Y.Z. Karimov, G. Fozilov // Ama, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America. – 2011. – Vol. 42 (4). – Pp. 37–40.

11. Mathematical modeling of the grain material separation in the pneumatic system of the grain-cleaning machine / I. Badretidinov, S. Mudarisov, M. Tuktarov, E. Dick, S. Arslanbekova // Istrazivanja i Projektovanja za Privredu. – 2019. – Vol. 17 (4). – Pp. 529–534. DOI:10.5937/jaes17-22640.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ Принадлежность к организации

Игорь Игоревич Аксенов – старший преподаватель кафедры электротехники и автоматики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, г. Воронеж, e-mail: igor.aksenov1989@ya.ru.

Владимир Иванович Оробинский – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, зав. кафедрой сельскохозяйственных машин, тракторов и автомобилей, декан агроинженерного факультета ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, г. Воронеж, e-mail: main@agroeng.vsau.ru.

Владимир Павлович Шацкий – доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой математики и физики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, г. Воронеж, e-mail: sha.vladim@yandex.ru.

Андрей Сергеевич Корнев – кандидат технических наук, доцент кафедры технологического оборудования, процессов перерабатывающих производств, механизации сельского хозяйства и безопасности жизнедеятельности ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, г. Воронеж, e-mail: kornev.andr@mail.ru.

Дата поступления в редакцию 18.02.2021

Дата принятия к печати 26.03.2021

AUTHOR CREDENTIALS Affiliations

Igor I. Aksenov, Senior Lecturer, Dept. of Electrical Engineering and Automation, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russia, Voronezh, e-mail: igor.aksenov1989@ya.ru.

Vladimir I. Orobinsky, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Head of the Dept. of Agricultural Machinery, Tractors and Cars, Dean of the Faculty of Rural Engineering, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russia, Voronezh, e-mail: main@agroeng.vsau.ru.

Vladimir P. Shatsky, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Dept. of Mathematics and Physics, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russia, Voronezh, e-mail: main@agroeng.vsau.ru.

Andrey S. Kornev, Candidate of Engineering Sciences, Docent, Dept. of Technological Equipment, Processing Plants' Processes, Agricultural Engineering, Health and Safety, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russia, Voronezh, e-mail: kornev.andr@mail.ru.

Received February 18, 2021

Accepted after revision March 26, 2021