

## МЕХАНИЗАЦИЯ И СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 631.354.2 (043.3)

### АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ КЛАВИШИ СОЛОМОТРЕСА НА СОЛОМИСТУЮ МАССУ В ВАРИАНТЕ ТИПОВОГО КИНЕМАТИЧЕСКОГО РЕЖИМА

Л. И. КОВАЛЕВСКАЯ, В. Ф. КОВАЛЕВСКИЙ

УО «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции  
и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия»,  
г. Горки, Республика Беларусь, 213407, e-mail: kovalevskaalilia1@gmail.com

(Поступила в редакцию 02.04.2025)

С использованием представленной методики анализа взаимодействия клавиши соломотряса на солоmistую массу возможно проанализировать траекторию движения частицы соломы при взаимодействии с клавишным соломотрясом. Практическое значение имеет теоретический анализ воздействия клавиши на солоmistую массу при параметрах типового кинематического режима клавишного соломотряса. Определение характеристик производилось в математическом пакете MathCad. При этом некоторые параметры рассчитывались приближенно с помощью встроенных функций этого пакета с погрешностью, которая ограничивалась возможностями измерения соответствующих физических величин при проведении экспериментальных исследований.

В процессе исследований необходимо установить, какие параметры оказывают наибольшее воздействие на характер движения солоmistого вороха по поверхности клавишного соломотряса зерноуборочного комбайна. Так как от того, какие факторы и параметры оказывают влияние на солоmistый ворох, будет зависеть качество работы соломотряса, которое оценивается уровнем потерь зерна. При этом необходимо также предусмотреть возможность использования дополнительных устройств для активизации процесса сепарации зерна из слоя солоmistого вороха. Для того чтобы внедрить в конструкцию соломотряса дополнительные элементы, необходимо, чтобы данная конструкция не нарушала технологический процесс работы клавишного соломотряса.

В результате исследований необходимо обосновать траекторию движения солоmistого вороха с учетом современных характеристик зерноуборочных комбайнов. Необходимо построить графическую зависимость изменения положения вала соломотряса в направлениях по основным осям координат. Также обосновать и определить основные параметры временного цикла траектории движения вороха с момента отрыва от поверхности клавиши, до момента встречи с клавишей соломотряса. По полученным данным необходимо построить схему воздействия клавиши соломотряса зерноуборочного комбайна на солоmistую массу за время полного рабочего цикла.

**Ключевые слова:** соломотряс, солоmistая масса, показатель кинематического режима, угол наклона клавиши, траектория движения точки, сепарация.

Using the presented method of analyzing the interaction of the straw walker key on the straw mass, it is possible to analyze the trajectory of the movement of a straw particle when interacting with the key straw walker. The theoretical analysis of the key's effect on the straw mass under the parameters of the typical kinematic mode of the key straw walker is of practical importance. The characteristics were determined in the MathCad mathematical package. Some parameters were calculated approximately using the built-in functions of this package with an error that was limited by the capabilities of measuring the corresponding physical quantities during experimental studies. In the course of research, it is necessary to establish which parameters have the greatest impact on the nature of the movement of the straw heap on the surface of the key straw walker of a combine harvester. Since the quality of the straw walker's operation, which is estimated by the level of grain losses, will depend on which factors and parameters affect the straw heap. It is also necessary to provide for the possibility of using additional devices to activate the process of separating grain from the layer of the straw heap. In order to introduce additional elements into the straw walker design, it is necessary that this design does not disrupt the technological process of key straw walker work.

As a result of the research, it is necessary to substantiate the trajectory of the straw heap movement taking into account the modern characteristics of grain harvesters. It is necessary to construct a graphical dependence of the change in the position of the straw walker shaft in the directions along the main coordinate axes. Also, to substantiate and determine the main parameters of the time cycle of the heap movement trajectory from the moment of separation from the surface of the key until the moment of meeting with the straw walker key. Based on the data obtained, it is necessary to construct a diagram of the impact of the straw walker key of the grain harvester on the straw mass during the full working cycle.

**Key words:** straw walker, straw mass, kinematic mode indicator, key inclination angle, point movement trajectory, separation.

## Введение

Основным принципом работы соломотряса является периодическое подбрасывание соломистого вороха и последующие соударения о поверхность клавиш. За счет удара происходит смещение вниз зерен относительно структурной решетки соломистого вороха, сепарация их из этого вороха с последующим выделением через перфорированную поверхность клавиш соломотряса. Сила такого удара зависит от массы материала, взаимодействующего с клавишей, и траектории его полета. Скорость перемещения этого материала по соломотрясу зависит от траектории его движения.

Так как основная часть зерен выделяется до попадания их на соломотряс, то массой выделяемых соломотрясом зерен в единицу времени в силу ее незначительности можно пренебречь, а значит, массу движущегося вороха можно принять постоянной величиной. Учитывая, что точки рабочей поверхности соломотряса движутся по окружностям с постоянной угловой скоростью  $\omega$  (рад/с), изменение силы удара соломистой массы о поверхность клавиши можно считать незначительным. На основании этого можно было бы предположить, что при движении соломистой массы по соломотрясу сепарация зерна через слой вороха должна быть практически одинаковой. Но этого не происходит из-за того, что циклические удары соломистой массы о рабочую поверхность соломотряса влияют также и на общую структуру этой массы, частично уплотняя ее и тем самым затрудняя свободное прохождение зерна через ворох. Поэтому при перемещении соломистой массы по соломотрясу наблюдается некоторое замедление процесса сепарации, обусловленное, в том числе и уменьшением содержания зерна. Чтобы дополнительно активизировать процесс, необходимо разрыхление соломистой массы, начиная с некоторого момента ее движения дополнительными устройствами.

Цель исследования – установить, какие параметры оказывают наибольшее воздействие на характер движения соломистого вороха по поверхности клавишного соломотряса зерноуборочного комбайна; обосновать траекторию движения соломистого вороха с учетом современных характеристик зерноуборочных комбайнов.

## Основная часть

Возможное дополнительное воздействие активатора на обрабатываемую соломистую массу нельзя рассматривать в отрыве от основного процесса работы клавишного соломотряса. Исследованию характеристик рабочего процесса соломотряса посвящены классические работы академика В. П. Горячкина [1, 2], профессора М. Н. Летошнева [3, 4] и других исследователей [5, 6, 7, 8, 9].

Задаемся начальными условиями – конструктивными параметрами клавишного соломотряса: радиус коленчатого вала соломотряса  $r = 0,05$  м, частота вращения коленчатого вала соломотряса  $n = 215$  мин<sup>-1</sup>, угловая скорость вращения вала соломотряса  $\omega = 22,515$  рад/с, ускорение свободного падения  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>.

Время одного оборота коленчатого вала соломотряса определим по зависимости:

$$t_{\text{об}} = 60 / n = 60 / 215 = 0,279 \text{ с}, \quad (1)$$

где  $n$  – частота вращения коленчатого вала соломотряса, мин<sup>-1</sup>.

Угол наклона клавиши соломотряса примем:

$$\alpha = \frac{15\pi}{180} = 0,262 \text{ рад}. \quad (2)$$

Согласно исходным данным, рассчитаем показатель кинематического режима клавишного соломотряса и линейную скорость движения его коленчатого вала [2]:

$$k = \frac{\omega^2 r}{g} = 2,586, \quad (3)$$

где  $\omega$  – угловая скорость вращения вала соломотряса, рад/с;

$r$  – радиус вала соломотряса, м.

$$v = \frac{2\pi r}{t_{\text{об}}} = 1,1257 \text{ м/с}, \quad (4)$$

где  $t_{\text{об}}$  – время полного оборота, с.

Рассмотрим траекторию движения периферийных точек коленчатого вала привода соломотряса с постоянной угловой скоростью  $\omega$  как окружность с центром в начале координат радиуса  $r$ . Согласно [1, 2], такое движение точек может быть описано системой параметрических уравнений:

$$\begin{cases} x(t) = r \cos(\omega t - \alpha), \\ y(t) = r \sin(\omega t - \alpha). \end{cases} \quad (5)$$

Тогда скорость движения этих точек в проекциях на оси координат и ее величину можно определить по соответствующим формулам:

$$\vec{v}_{к.в}(t) = -\omega r \sin(\omega t - \alpha) \vec{i} + \omega r \cos(\omega t - \alpha) \vec{j}; \quad (6)$$

$$|\vec{v}_{к.в}(t)| = \sqrt{\omega^2 r^2 \sin^2(\omega t - \alpha) + \omega^2 r^2 \cos^2(\omega t - \alpha)} = \omega r. \quad (7)$$

Согласно принятым исходным данным, графические зависимости изменения проекций скоростей периферийных точек колесчатого вала соломотряса в направлениях осей  $Ox$  и  $Oy$  показаны на рис. 1.

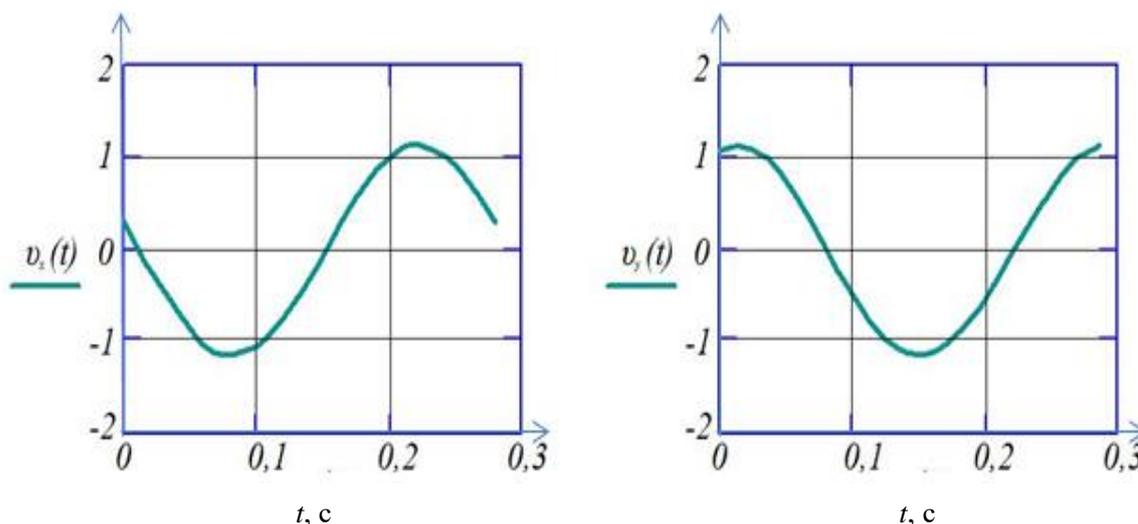


Рис. 1. Изменение положения вала соломотряса в направлениях  $X$  и  $Y$  с изменением времени  $t$  (с)

Рассмотрим перемещение соломистого вороха по соломотрясу как совокупность элементарных траекторий его движения.

Определим положения характерных точек:

- исходной ( $A$ );
- отрыва частицы ( $B$ );
- максимального подъема ( $C$ );
- встречи с клавишей после падения ( $E$ ).

Цикл 1 (точка  $A$  – исходная точка движения частицы вороха).

Положение точки  $A$  в системе координат  $xOy$ .

Исходя из принятых конструктивных и технологических параметров координаты точки  $A$  будут равны:

$$A_x = x_0 = 0,048 \text{ м}; \quad A_y = y_0 = -0,013 \text{ м} \quad (8)$$

и т. д.

Определим положение характерной точки  $B$ .

Время движения от исходной точки до момента отрыва соломы от клавиши составит:

$$t_1 = \frac{\arcsin\left(\frac{\cos(\alpha)}{k}\right)}{\omega} = 0,017 \text{ с}, \quad (9)$$

где  $k$  – показатель кинематического режима.

Определим положения характерных точек траектории движения соломистой частицы в динамике взаимодействия ее с клавишей соломотряса (рис. 2).

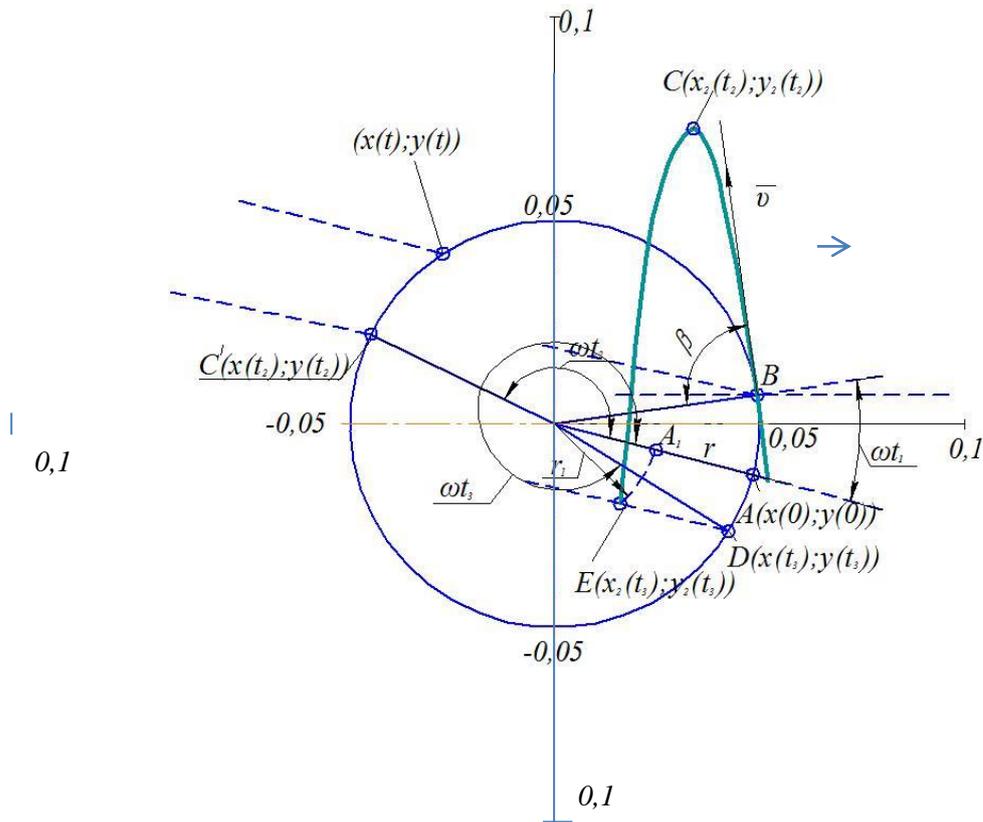


Рис. 2. Схема воздействия клавиши соломотрса на солоmistую массу за время полного рабочего цикла

Угол, при котором происходит отрыв соломы от клавиши, определим по выражению:

$$\omega t_1 \frac{180}{\pi} = 21,93^\circ. \quad (10)$$

Координаты точки отрыва соломы от клавиши определим по зависимостям:

$$B_x = x(t_1) = 0,0496 \text{ м}; \quad B_y = y(t_1) = 0,006 \text{ м}. \quad (11)$$

Угол  $\beta$  брошенной солоmistой массы к горизонту определим по следующей зависимости:

$$\beta = \frac{\pi}{2} - (\omega t_1 - \alpha) \frac{180}{\pi} = 83^\circ. \quad (12)$$

Проекции скорости на оси координат в точке отрыва солоmistого вороха составят:

$$v_x(t_1) = -0,136 \text{ м/с}; \quad v_y(t_1) = 1,118 \text{ м/с}. \quad (13)$$

Положение точки  $C$  может быть определено в результате рассмотрения проекции движения материальной точки солоmistой массы, брошенной под углом  $\beta$  к горизонту, по зависимостям:

$$x_2(t_2) = v_x(t_1)t_2 + x(t_1) - v_x(t_1)t_1; \quad (14)$$

$$y_2(t_2) = \frac{-gt_2^2}{2} + (v_y(t_1) + g(t_1))t_2 + y(t_1) + \frac{gt_1}{2} - (v_y(t_1) + g(t_1))t_1. \quad (15)$$

При этом проекция скорости примет следующий вид:

$$v_{x_2}(t_2) = v_x(t_1); \quad v_{y_2}(t_2) = v_y(t_1) + gt_1 - gt_2. \quad (16)$$

Время движения максимального отрыва определим по зависимости:

$$t_2 = \frac{\omega t_1 + k \cos(\omega t_1 - \alpha)}{\omega} = 0,131 \text{ с}. \quad (17)$$

Координаты точки  $C$  максимального подъема солоmistого вороха над клавишей будут иметь вид:

$$C_x = x_2(t_2) = 0,034 \text{ м}; C_y = y_2(t_2) = 0,07 \text{ м}. \quad (18)$$

Угол, на который при этом повернется коленчатый вал, при отсчете от исходной точки (точка  $A$ ) будет равен:

$$\omega t_2 \frac{180}{\pi} = 169,031^\circ. \quad (19)$$

Из уравнения получим:

$$v_{r,2}(t_3) = \operatorname{tg}(-\alpha)(x_2(t_3) - x(t_3)) + y(t_3) - y_2(t_3). \quad (20)$$

Определим время от точки  $A$  (исходное положение) начала движения соломистого вороха относительно клавиши соломотряса до момента падения его на клавишу соломотряса численным методом из условия  $v_r(t_3) = 0$ , используя функцию  $\operatorname{root}()$  MathCad.

При заданных условиях движения это время составит:

$$t_3 = \operatorname{root}(v_{r,2}(t_3), t_3) = 0,266 \text{ с}. \quad (21)$$

Тогда время полета соломистой массы после отрыва от клавиши соломотряса составит:

$$\Delta t_3 = t_3 - t_1 = 0,249 \text{ с}. \quad (22)$$

При этом угол, на который повернется коленчатый вал относительно исходного положения, будет равен:

$$\omega t_3 \frac{180}{\pi} = 343,004^\circ. \quad (23)$$

Определим координаты точки  $D$  клавиши, соответствующие повороту коленчатого вала в момент встречи, по зависимостям:

$$D_x = x(t_3) = 0,042 \text{ м}; D_y = y(t_3) = -0,026 \text{ м}. \quad (24)$$

Координаты точки  $E$  описывают падение соломистой массы на клавишу соломотряса и определяются по зависимостям:

$$E_x = x_2(t_3) = 0,016 \text{ м}; E_y = y_2(t_3) = -0,019 \text{ м}. \quad (25)$$

При этом расстояние от начала координат до точки падения соломистой массы на клавишу соломотряса будет равно:

$$r_1 = \sqrt{x_2(t_3)^2 + y_2(t_3)^2} = 0,025 \text{ м}. \quad (26)$$

Время от момента падения соломистой массы на клавишу до возврата клавиши в исходное положение (в точку  $A$ ) определим по зависимости:

$$\Delta t_4 = t_{06} - t_3 = 0,013 \text{ с}. \quad (27)$$

Характеристики движения вороха, определенные для усредненных параметров и режима работы соломотряса, позволяют количественно описать картину рассматриваемого взаимодействия и разработать предложения по обоснованию конструкции и параметров активаторов.

В результате проведенного анализа получены математические зависимости, определяющие траекторию движения соломистого вороха, ее характерные точки и соответствующие положения клавиши.

Определить величину радиус-вектор точки  $A$  можно по зависимости:

$$f_0(z_0) = \operatorname{tg}(-\alpha)z_0. \quad (28)$$

где  $z_0$  – время движения материальной точки от момента падения на клавишу соломотряса до момента начала отрыва, с.

Тогда траектория движения будет иметь вид:

$$f_1(z_1) = \operatorname{tg}(\omega t_1 - \alpha)z_1. \quad (29)$$

где  $z_1$  – время движения материальной точки от момента начала отрыва до величины наивысшего подъема, с.

Уравнение прямой, на которой лежит вектор скорости, определим по зависимости:

$$p = x(t_1) + 0,0025x(t_1) + 0,0025 - 0,00001 \dots x(t_1) - 0,008. \quad (30)$$

$$kas(p) = \frac{-x_2(t_1)}{\sqrt{r^2 - x_2(t_1)^2}}(p - x(t_1)) + y(t_1). \quad (31)$$

В результате радиус-вектор положения точки коленчатого вала при максимальном отрыве соломистой массы от клавиши примет вид:

$$z_2 = 0,00001...x(t_2); f_2(z_2) = tg(\omega t_2 - \alpha)z_2. \quad (32)$$

Определим радиус-вектор точки  $D$  по формуле:

$$z_3 = 0,00001...x(t_3); f_3(z_3) = tg(\omega t_3 - \alpha)z_3. \quad (33)$$

Определим положение клавиши в момент падения на нее соломистой массы по зависимости:

$$x_n = r \cos(\omega t_3 - \alpha) - r + r \cos(\omega t_3 - \alpha) + 0,00001...r \cos(\omega t_3 - \alpha). \quad (34)$$

$$y_n(x_n) = tg(-\alpha) - (x_n - x(t_1 + \Delta t_3)) + y(t_1 + \Delta t_3). \quad (35)$$

Координаты точки соломистого вороха при полном обороте коленчатого вала соломотряса примут вид:

$$x_4 = r_1 \cos(\omega(t_{ог}) - \alpha) = 0,02416 \text{ м}; \quad (36)$$

$$y_4 = r_1 \sin(\omega(t_{ог}) - \alpha) = -6,4743 \cdot 10^{-3} \text{ м}. \quad (37)$$

Опишем траекторию движения соломистой массы на клавише с момента их встречи до завершения:

$$t_{п} = t_3 + 0,00001t_{ог} + 0,013. \quad (38)$$

$$x_3(t_{п}) = r_1 \cos(\omega t_{п} - \alpha_2). \quad (39)$$

$$y_3(t_{п}) = r_1 \sin(\omega t_{п} - \alpha_2). \quad (40)$$

Проведенное теоретическое исследование позволило определить координаты характерных точек  $A, B, C, D, E$  возможной траектории движения соломистой частицы. Расчеты показывают, что траектория полета зависит от конструктивных параметров клавиши соломотряса и угловой скорости, а значит, и в целом от времени движения соломистого вороха по соломотрясу и силы удара массы о поверхность клавиши. Это именно те параметры, которые влияют на процесс выделения зерна из вороха.

### Заключение

Как показывают расчеты, на движение и взаимодействие соломистого вороха с клавишей влияют угловая скорость и угол наклона клавиши. Изменение угла наклона клавиши в конструкции современного комбайна также невозможно, так как угол наклона клавиши не имеет технологических регулировок и в каждом комбайне установлен свой оптимальный угол наклона. Так как реальное изменение конструкции конструктивных параметров элементов соломотряса не дает желаемого эффекта (увеличение сепарации зерна из слоя вороха), то выдвинем гипотезу о том, что поставленную задачу можно решить с помощью пружинно-пальцевых активаторов. Данная конструкция может быть установлена на клавишный соломотряс любого зерноуборочного комбайна, установка занимает мало времени, произвести ее возможно в полевых условиях без изменения конструкции и без нарушения технологического процесса работы комбайна.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Горячкин, В. П. Теория, конструкция и производство сельскохозяйственных машин / В. П. Горячкин; под общ. ред. проф. В. П. Горячкина. – М., 1936. – Т. 3: Теория. – 780 с.
2. Горячкин, В. П. Теория просеивания зерен из вороха / В. П. Горячкин // Собрание сочинений: в 3 т. – М.: Колос, 1968. – Т. 1. – 720 с.
3. Летошнев, М. Н. Основы теории клавишных соломотрясов / М. Н. Летошнев // Сб. науч. работ ЛИМЭСХ. – 1948. – Вып. № 5. – С. 54–72.
4. Летошнев, М. Н. Сельскохозяйственные машины. Теория, расчет, проектирование и испытание / М. Н. Летошнев. – Москва – Ленинград: Гос. изд-во с.-х. лит., 1955. – 764 с.
5. Алферов, С. А. Как работает зерноуборочный комбайн / С. А. Алферов, А. И. Калашин, А. Д. Угаров. – М.: Машиностроение, 1981. – 190 с.
6. Берг, Б. А. Движение материальной точки по наклонной плоскости с трением, совершающей круговое поступательное движение / Б. А. Берг // Теория, конструкция и производство сельскохозяйственных машин. – М., 1936. – Т. 3: Теория. – С. 522–539.
7. Ковалевский, В. Ф. Определение усилий на деформацию соломы прутковыми элементами / В. Ф. Ковалевский, А. В. Клочков // Агропанорама – Минск, БГАТУ. 2016. – № 1. – С. 9–13.
8. Клочков, А. В. Новый активатор соломотряса зерноуборочного комбайна / А. В. Клочков, В. Ф. Ковалевский // Наше сельское хозяйство. – 2016. – № 13. – С. 14–17.
9. Клочков, А. В. Характеристика технологического процесса пружинно-пальцевого активатора соломотряса / А. В. Клочков, В. Ф. Ковалевский. // Современные проблемы освоения новой техники, технологий, организации технического сервиса АПК: материалы Междунар. науч. – практ. конф. Минск, 9 июня 2016 г. / М-во с. х. и прод. Респ. Беларусь, РО «Белгроссервис», УО «Белорус. гос. аграр. техн. ун-т»; редкол.: Н. К. Лисай и [др.]. – Минск: БГАТУ, 2016. – С. 210–216.