

## АНАЛИЗ ЦИКЛА ДВИЖЕНИЯ СОЛОМИСТОЙ МАССЫ ПОД ДЕЙСТВИЕМ КЛАВИШ СОЛОМОТРЕСА ЗЕРНОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ УСИЛИЕМ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПАЛЬЦЕВ АКТИВАТОРА НА СОЛОМИСТЫЙ ВОРОХ

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 07.04.2025)

Детально рассмотрели процесс движения соломистого вороха при отрыве его от клавиши соломотреса зерноуборочного комбайна. Описали траекторию движения частицы по поверхности клавишного соломотреса. Определили основные точки, которые преодолевает частица в процессе движения по поверхности соломотреса. Проведен теоретический анализ взаимосвязи пропускной способности зерноуборочного комбайна с клавишным соломотресом с усилением воздействия соломистого вороха на палец пружинно-пальцевого активатора. Это позволяет получить зависимости, которые описывают процесс взаимодействия пальцев, установленных на клавишном соломотресе с соломистой массой.

Клавишный соломотрес зерноуборочного комбайна не имеет технологических регулировок и не всегда обеспечивает требуемого качества уборки по потерям зерна. Это также является сдерживающим фактором производительности комбайнов в реальных условиях уборки. Для активизации процесса выделения зерна из слоя соломы применяются различные устройства, среди которых перспективными являются пружинно-пальцевые активаторы (ППА).

Разработанная конструкция пружинно-пальцевого активатора была установлена на оборудованных типичным клавишным соломотресом зерноуборочных комбайнах ОАО «Гомсельмаш» КЗС-1218 «ПАЛЕССЕ GS12» в ходе производственных испытаний в хозяйствах Речицкого района Гомельской области. В филиале «Советская Белоруссия» ОАО «Речицкий комбинат хлебопродуктов» ППА были установлены на зерноуборочном комбайне с заводским номером 05898, а в хозяйстве КСУП «Агрокомбинат «Холмеч» – с заводским номером 02576.

**Ключевые слова:** частица, сепарация, соломистый ворох, траектория движения точки, соломотрес.

The process of movement of the straw heap when it is torn off from the straw walker key of the combine harvester was examined in detail. The trajectory of the particle movement along the surface of the key straw walker was described. The main points that the particle passes during the movement along the surface of the straw walker were determined. A theoretical analysis of the relationship between the throughput of a combine harvester with a key straw walker and the force of the straw heap impact on the finger of the spring-finger activator was carried out. This allows us to obtain dependencies that describe the process of interaction of the fingers installed on the key straw walker with the straw mass. The key straw walker of the combine harvester does not have technological adjustments and does not always provide the required quality of harvesting in terms of grain losses. This is also a limiting factor in the productivity of combines in real harvesting conditions. Various devices are used to activate the process of separating grain from the straw layer, among which spring-finger activators (SFAs) are promising. The developed design of the spring-finger activator was installed on grain harvesters of JSC Gomselmash KZS-1218 PALESSE GS12 equipped with a typical key straw walker during production tests in farms of the Rechitsa district of the Gomel region. In the branch "Sovetskaya Belorussiya" of JSC "Rechitsa Bread Products Plant" SFAs were installed on a grain harvester with serial number 05898, and in the farm of Collective Farming Unitary Enterprise "Agrokombinat Kholmec" – with serial number 02576.

**Key words:** particle, separation, straw heap, trajectory of point movement, straw walker.

### Введение

Современные зерноуборочные комбайны предназначены для работы в различных почвенно-климатических условиях, на различных культурах и с постоянно изменяющейся нагрузкой на рабочие органы. Исследования отдельных рабочих органов комбайна (режущего аппарата, мотовила, молотильно-сепарирующего устройства, соломотреса, очистки) показали, что наиболее чувствительным к изменению нагрузки является соломотрес [1]. Даже незначительное увеличение нагрузки приводит к увеличению толщины слоя соломистого вороха и, как следствие, к существенному снижению сепарирующей способности соломотреса, что обуславливает дополнительные потери урожая.

Соломистая масса, выходящая из молотильно-сепарирующего устройства, представляет собой смесь, состоящую из крупной соломы, сбины, половы и зерна [2]. Зерно, находящееся в ворохе в свободном (вне колоса) состоянии, в зависимости от многочисленных факторов (вида культуры, ее состояния, подачи массы, параметров МСУ и т. д.) может составлять от 10 до 30 % от убираемого урожая. Процесс воздействия соломотреса на ворох сводится к периодическому встряхиванию массы и перемещению ее к выходу из молотилки [3]. При этом зерно под воздействием сил инерции и тяжести, преодолевая пространственную решетку соломы, перемещается в нижние слои и выделяется сквозь жалюзийные отверстия клавиш соломотреса. Основная задача при этом состоит в разуплотнении соломистого вороха, снижении его объемной массы, что способствует расширению пространственной решетки и повышению сепарирующей способности.

Многолетней практикой использования соломотрясов различных типов и исследованиями доказана возможность получения сходной по качеству работы соломотрясов различных типов с равнозначной нагрузкой при условии, что параметры этих соломотрясов (размеры, число колебаний, углы наклона, тип и размеры решетки) обоснованы для каждого типа с учетом условий работы и особенностей конструкции.

Отличия в типах соломотрясов объясняются различием в способах сообщения движения соломиному вороху по соломотрясу и в способах образования пространственной решетки соломы, через которую просыпается свободное зерно. В остальном процесс выделения зерна из слоя соломы у соломотрясов различных типов совершается одинаково, а именно: сначала зерно просеивается через непрерывно изменяющуюся пространственную решетку, образуемую слоем соломы, а затем через отверстия в клавишах соломотряса.

Цель – описать процесс воздействия колеблющихся клавиш соломотряса на обрабатываемую массу и уточнить исходную траекторию ее движения до попадания под воздействие пальцев активатора.

### Основная часть

Процесс сепарации зерна из соломиного вороха протекает на фоне общего воздействия клавиш соломотряса на обрабатываемую массу [1]. Для уточнения характеристик движения соломиного вороха рассмотрим движение его частицы после отрыва от клавиши как движение материальной точки  $B$  с координатами  $(x(t_1); y(t_1))$  и массой  $m$  (кг), при этом время начала отрыва обозначим  $t_1$  (с), брошенной под углом  $\beta = \frac{\pi}{2} - (\omega t_1 - \alpha)$  к положительному направлению оси абсцисс рассматриваемой системы со скоростью  $\vec{v}_1$  (м/с), при этом  $\alpha$  (град) – это угол наклона клавиши соломотряса, а  $\beta$  (град) – угол бросания (рис. 1).

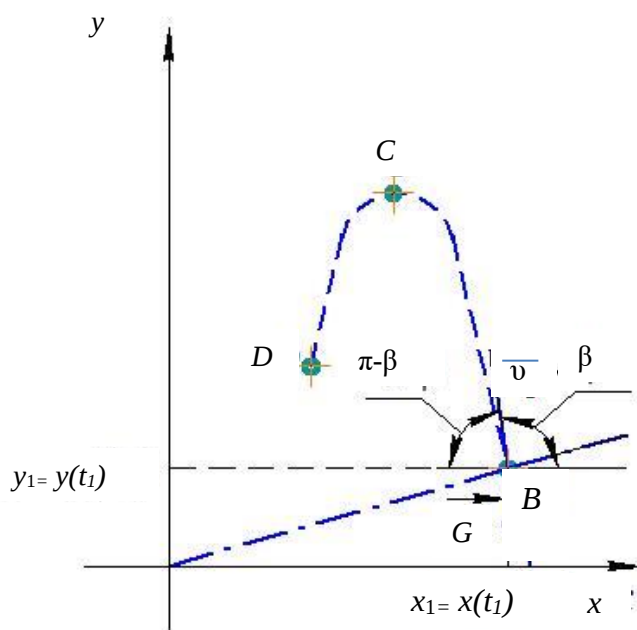


Рис. 1. Схема движения соломистой массы при отрыве от клавиши

Определим движение точки  $B$ , считая, что на нее действует только сила тяжести  $\vec{G} = mg$  (при этом сопротивлением воздуха пренебрегаем) и в точке  $B$  ей сообщена скорость  $\vec{v}_1$  ( $v_{1x}, v_{1y}$ ).

Тогда в общем виде закон движения запишется следующим образом:

$$m\vec{a} = \vec{G}, \quad (1)$$

где  $m$  – масса материальной точки, кг;  $\vec{a}$  – ускорение материальной точки, м/с<sup>2</sup>;  $\vec{G}$  – сила тяжести, Н.

В проекциях на оси, считая  $a_x = x''(t)$ ,  $a_y = y''(t)$ , получим следующие постановки задач Коши для дифференциальных уравнений второго порядка, описывающих движение материальной точки  $B$  в проекциях на оси системы координат:

$$\begin{cases} m x''(t) = 0, \\ x'(t_1) = v_{1x}, \\ x(t_1) = x_1; \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} m y''(t) = -m g, \\ y'(t_1) = v_{1y}, \\ y(t_1) = y_1, \end{cases} \quad (3)$$

где  $t_1$  – время начала отрыва, с;  $v$  – скорость точки, м/с;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.  
Решив систему (2), в общем виде получим зависимости:

$$\frac{d^2 x(t)}{dt^2} = 0, \quad x'(t) = \frac{dx(t)}{dt} = c_1, \quad x(t) = c_1 t + c_2,$$

где  $t$  – время, с;  $c_1, c_2$  – произвольные постоянные.

С учетом начальных условий  $x'(t_1) = v_{1x}$  и  $x(t_1) = x_1$  определим произвольные постоянные в этих зависимостях:  $x'(t_1) = c_1 \Rightarrow v_{1x} = c_1$ , а значит,  $x(t) = v_{1x} t + c_2$ ,  $x(t_1) = v_{1x} t_1 + c_2$ ,  $x_1 = v_{1x} t_1 + c_2$ , откуда  $c_2 = x_1 - v_{1x} t_1$ . Тогда в проекции на ось  $Ox$  перемещение материальной точки  $B$  будет осуществляться по закону

$$x(t) = v_{1x} t + x(t_1) - v_{1x} t_1. \quad (4)$$

Аналогичным образом поступим с системой (3):

$$\frac{d^2 y(t)}{dt^2} = -g, \quad y'(t) = \frac{dy(t)}{dt} = -gt + C_1, \quad y(t) = -\frac{gt^2}{2} + C_1 t + C_2,$$

где  $C_1, C_2$  – произвольные постоянные.

Используя начальные условия  $y'(t_1) = v_{1y}$  и  $y(t_1) = y_1$ , определим произвольные постоянные в этих зависимостях:  $y'(t_1) = -gt_1 + C_1 = v_{1y} \Rightarrow C_1 = v_{1y} + gt_1$ , т. е.  $y(t) = -\frac{gt^2}{2} + (v_{1y} + gt_1)t + C_2$ . Так как  $y(t_1) = y_1$ , то

$$y(t_1) = -\frac{gt_1^2}{2} + (v_{1y} + gt_1)t_1 + C_2 = y_1 \Rightarrow C_2 = y_1 + \frac{gt_1^2}{2} - (v_{1y} + gt_1)t_1.$$

Тогда в проекции на ось  $Oy$  перемещение материальной точки  $B$  будет осуществляться по закону

$$y(t) = -\frac{gt^2}{2} + (v_{1y} + gt_1)t + y_1 + \frac{gt_1^2}{2} - (v_{1y} + gt_1)t_1. \quad (5)$$

Если рассмотреть зависимость (5) как функцию, то она определяет график некоторой параболы с ветвями, ориентированными вниз вдоль оси параллельной оси ординат и параметрами  $a = -\frac{g}{2}$ ,  $b = v_{1y} + gt_1$  и  $c = y_1 + \frac{gt_1^2}{2} - (v_{1y} + gt_1)t_1$ . Тогда точка  $B$  достигнет наивысшего подъема в момент времени, который можно определить из выражения:

$$\Delta t_2 = \frac{-(v_{1y} + gt_1)}{-2\frac{g}{2}} = \frac{v_{1y} + gt_1}{g}, \quad (6)$$

тогда ординату этой точки (величину наивысшего подъема) определим по выражению:

$$y(\Delta t_2) = -\frac{g(\Delta t_2)^2}{2} + (v_{1y} + gt_1)\Delta t_2 + y_1 + \frac{gt_1^2}{2} - (v_{1y} + gt_1)t_1, \quad (7)$$

где  $\Delta t_2$  – время, за которое материальная точка достигнет наивысшего подъема, с.

Время падения соломистого вороха на клавиши определим из следующих условий [2]:

1) поверхность клавиши прошла соответствующий угол и находится в точке с координатами  $(x(t_1 + \Delta t_3); y(t_1 + \Delta t_3))$ ;

- 2) клавиша наклонена под углом  $-\alpha$  к горизонту;
- 3) солоmistая масса за время  $\Delta t_3$  падает на клавишу.

Рассмотрим траекторию движения солоmистого вороха (рис. 2).

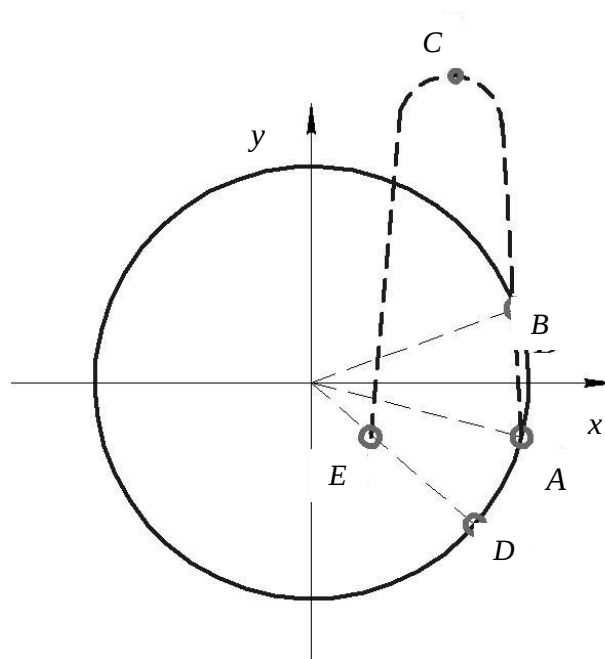


Рис. 2. Траектория движения частицы солоmистого вороха

Уравнение прямой, описывающей поверхность клавиши в этот момент, будет иметь вид:

$$y_2(t) = \operatorname{tg}(-\alpha)(x_2(t) - x(t_1 + \Delta t_3)) + y(t_1 + \Delta t_3), \quad (8)$$

где  $\alpha$  – угол наклона клавиш солоmотряса к горизонту, град;  $\Delta t_3$  – время, за которое материальная точка достигнет клавиши солоmотряса, с.

Точка падения при этом будет иметь координаты  $E(x_2(\Delta t_3); y_2(\Delta t_3))$ , а время  $\Delta t_3$  будет определяться из уравнения:

$$-\operatorname{tg}(\alpha)(x_2(\Delta t_3) - x(t_1 + \Delta t_3)) + y(t_1 + \Delta t_3) - y_2(\Delta t_3) = 0. \quad (9)$$

При этом описали основные уравнения при движении частицы солоmистого вороха по клавишам солоmотряса, теперь произведем взаимосвязь усилия, которое воздействует на палец активатора со стороны солоmистой массы, произведя взаимосвязь с пропускной способностью.

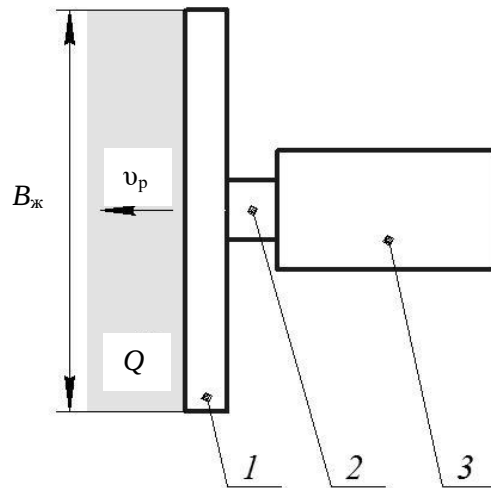
Подача (пропускная способность)  $q$  (кг/с) зерноуборочного комбайна зависит от общей урожайности культуры  $Q$  (кг/м<sup>2</sup>), которая складывается из урожайности зерна  $Q_3$  (кг/м<sup>2</sup>) и урожайности соломы  $Q_c$  (кг/м<sup>2</sup>), а также зависит от скорости движения комбайна  $v_p$  (м/с) и ширины захвата жатки  $B_{ж}$  (м). Общая урожайность (урожайность зерна  $Q_3$  и соломы  $Q_c$ ) определяется с учетом остающейся в поле соломы в виде стерни (коэффициент  $\varepsilon$ ) и коэффициента солоmистости  $\beta_{сол}$ :

$$Q = Q_3 + \varepsilon Q_c, \quad (10)$$

Коэффициент солоmистости  $\beta_{сол}$  определяется [42] по следующей зависимости:

$$\beta_{сол} = \frac{Q_c}{Q_3 + Q_c}, \quad (11)$$

Рассмотрим схему работы зерноуборочного комбайна с учетом основных факторов, оказывающих влияние на его пропускную способность (рис. 3).



1 – жатвенная часть; 2 – наклонная камера; 3 – молотильно-сепарирующая часть.  
Рис. 3. Схема для определения пропускной способности зерноуборочного комбайна

Пропускную способность зерноуборочного комбайна определим по следующему выражению [3]:

$$q = B_{ж} v_p Q, \quad (12)$$

Подставив в выражение (12) урожайность зерна и соломистого вороха, получим следующую зависимость:

$$q = B_{ж} v_p (Q_z + \varepsilon Q_c), \quad (13)$$

При этом выделим на соломотрясе зону воздействия пальцев активатора, обозначив длину данного участка  $L$  (м). В результате проведения теоретических исследований установим значения средней толщины слоя соломистого вороха на соломотрясе  $H$  (м), скорости продольного движения вороха  $v_c$  (м/с), объемной массы вороха  $\gamma$  (кг/м<sup>3</sup>) [4, 5].

Зная ширину соломотряса  $B_c$  (м), определим объем вороха, на который воздействуют активаторы, по следующей зависимости:

$$V = B_c L H, \quad (14)$$

Рассмотрим схему пятиклавишного соломотряса с указанием основных составляющих, оказывающих воздействие на подачу массы (рис.4).

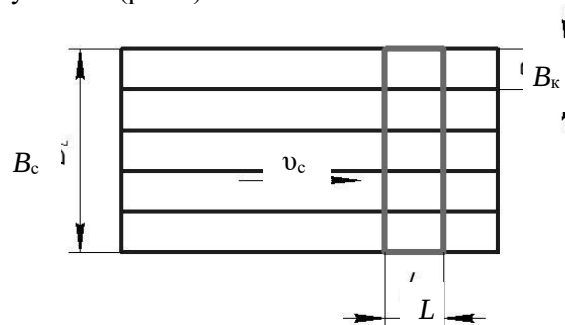


Рис. 4. Схема для определения пропускной способности пятиклавишного соломотряса

С учетом объемной массы вороха определим массу вороха по ширине соломотряса в зоне действия активаторов по выражению:

$$m = V\gamma = B_c L H \gamma, \quad (15)$$

В результате сможем определить усилие на пальцы активатора от воздействия соломистого вороха по зависимости:

$$P = mg = B_c L H \gamma g. \quad (16)$$

Определим усилие, которое действует на палец активатора:

$$P_{п} = \frac{P}{n_k n_{п}} = \frac{mg}{n_k n_{п}} = \frac{B_c L H \gamma g}{n_k n_{п}}, \quad (17)$$

где  $n_k$  – количество клавиш соломотряса, шт.;  $n_{п}$  – количество пальцев активатора на клавише соломотряса, шт.

Подача массы от жатвенной части должна соответствовать пропускной способности МСУ, в противном случае возникнет несогласованность работы и зерноуборочный комбайн будет работать с большими потерями зерна. Приравняем подачу массы в жатвенную часть и на клавишный соломотряс (с учетом просеивания зерна и мелкого вороха молотильным аппаратом), при этом урожайность зерна, поступающего на клавишный соломотряс, будет определена как 20 % от общей урожайности, так как 80 % выделится молотильным барабаном и на соломотряс поступит только часть зерна от общей массы. В результате малого выделения мелкого вороха через подбарабанье будем считать, что подача соломистого вороха не изменилась [6].

В результате получим зависимости:

$$B_{ж} v_p Q = \gamma B_c H v_c; \quad (18)$$

$$B_{ж} v_p (Q_3 + \varepsilon Q_c) = \gamma B_c H v_c. \quad (19)$$

Из выражения (19) определим толщину слоя соломистого вороха, так как она оказывает основное влияние на сепарацию зерна.

Получим следующую зависимость:

$$H = \frac{B_{ж} v_p (Q_3 + \varepsilon Q_c)}{\gamma B_c v_c}. \quad (20)$$

По выражению (20) определим толщину слоя соломистого вороха:

$$H = \frac{P_{п} n_k n_{п}}{B_c L \gamma g}. \quad (21)$$

Приравняв зависимости (20) и (21), получим:

$$\frac{B_{ж} v_p (Q_3 + \varepsilon Q_c)}{\gamma B_c v_c} = \frac{P_{п} n_k n_{п}}{B_c L \gamma g}. \quad (22)$$

Исходя из выражения (22) определим взаимосвязь усилия действия соломистого вороха с подачей массы:

$$P_{п} = \frac{B_{ж} v_p (Q_3 + \varepsilon Q_c) B_c L \gamma g}{\gamma B_c v_c n_k n_{п}} = \frac{B_{ж} v_p (Q_3 + \varepsilon Q_c) L g}{v_c n_k n_{п}} = \frac{q L g}{v_c n_k n_{п}}. \quad (23)$$

Для этого будет использована пропускная способность используемого зерноуборочного комбайна, длина его соломотряса, а также принятая скорость соломистого вороха с учетом количества клавиш и активаторов.

### Заключение

Полученные зависимости (4)...(9) позволяют описать процесс воздействия колеблющихся клавиш соломотряса на обрабатываемую массу и уточнить исходную траекторию ее движения до попадания под воздействие пальцев активатора. Зависимость (23) позволяет определить усилия действия соломистого вороха на палец активатора для любого зерноуборочного комбайна с клавишным соломотрясом с учетом пропускной способности. Определение данного усилия позволяет установить воздействие соломистой массы на любой элемент, установленный для дополнительной активации сепарации зерна, а также позволит определить характер загруженности клавишного соломотряса по его длине и ширине в процессе работы, и тем самым выявить самые загруженные части соломотряса.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Летошнев, М. Н. Сельскохозяйственные машины. Теория, расчет, проектирование и испытание / М. Н. Летошнев. – Москва–Ленинград: Гос. изд-во с.-х. лит., 1955. – 764 с.
2. Зубков, В. И. Алгоритм технологического процесса клавишного соломотряса / В. И. Зубков // Вестн. ДГТУ. – 2009. – Т. 9. – № 1 (40). – С. 36–44.
3. Кленин, Н. И. Сельскохозяйственные машины: учебник для вузов / Н. И. Кленин, С. Н. Киселев, А. Г. Левшин. – М.: КолосС, 2008. – 816 с.
4. Ковалевский, В. Ф. Обоснование активатора соломотряса зерноуборочного комбайна с учетом параметров соломистого вороха / В. Ф. Ковалевский // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления: материалы XVI Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 28–29 апр. 2016 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2016. – С. 45–48.
5. Ключков, А. В. Характеристика технологического процесса пружинно-пальцевого активатора соломотряса / А. В. Ключков, 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 сел. хоз-ва 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.
6. Ковалевский, В. Ф. Разрыхление соломистого вороха пальцами активатора клавишного соломотряса зерноуборочного комбайна / В. Ф. Ковалевский, А. В. Ключков, М. Л. Пархоменко // Вестн. Белорус. гос. с.-х. акад. – 2018. – № 2. – С. 175–180.