

УДК 631.354.2 (043.3)

## РАЗРЫХЛЕНИЕ СОЛОМИСТОГО ВОРОХА ПАЛЬЦАМИ АКТИВАТОРА КЛАВИШНОГО СОЛОМОТРЯСА ЗЕРНОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА

**В. Ф. КОВАЛЕВСКИЙ, А. В. КЛОЧКОВ, М. Л. ПАРХОМЕНКО**

*УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия»,  
г. Горки, Беларусь, 213407*

*(Поступила в редакцию 22.02.2018)*

*Своевременная и качественная уборка зерновых является стратегически важной задачей, для решения которой необходимо обеспечить снижение потерь зерна за комбайнами. Одной из причин потерь зерна при уборке является недостаточная его сепарация соломотрясом комбайна. Разработаны пружинно-пальцевые активаторы (ППА) для дополнительного воздействия на солоmistый ворох на заключительном этапе процесса сепарации. При колебаниях клавиши пружинные пальцы активаторов дополнительно протряхивают солоmistый ворох и выделяют остатки зерна. В статье представлены теоретические исследования сил, действующих на пружинно-пальцевый активатор соломотряса зерноуборочного комбайна. Получены аналитические зависимости для определения амплитуды, отклонения пальца активатора, а также получена зависимость для определения коэффициента разрыхления солоmistого вороха с учетом воздействия пальцев активатора.*

**Ключевые слова:** *соломотряс, пружинно-пальцевый активатор, толщина слоя солоmistого вороха, зерноуборочный комбайн, амплитуда, отклонения конца пальца активатора.*

*Timely and high-quality harvesting of cereals is a strategically important task, for the solution of which it is necessary to ensure a reduction in grain losses for harvesters. One of the reasons for the loss of grain during harvesting is its insufficient separation by the straw shaker of the combine. Spring-finger activators have been developed to further influence the straw stack during the final stage of separation process. With the vibrations of keys, the spring fingers of the activators additionally shake out the straw pile and secrete the remains of the grain. The article presents theoretical studies of the forces acting on the spring-finger activator of the straw walker of a combine harvester. We have obtained analytical dependencies for the determination of amplitude, deviation of the activator's finger, and also a dependence to determine the coefficient of straw heap loosening taking into account the influence of activator's fingers.*

**Key words:** *shaker, spring-finger activator, straw heap thickness, grain harvester, amplitude, deviations of the end of activator's finger.*

### **Введение**

Повышение производительности зерноуборочных комбайнов обеспечивается эффективным функционированием всех узлов и механизмов, среди которых сдерживающим фактором является работа клавишного соломотряса [1–3]. Потери зерна за соломотрясом особенно возрастают при повышенной урожайности убираемых культур, увеличении влажности и засоренности массы. Поставленная задача создания белорусского «суперкомбайна» включает необходимость повышения полноты выделения зерна из солоmistого вороха. Для этих целей могут использоваться пружинно-пальцевые активаторы, которые при работе разрыхляют солоmistый ворох и обеспечивают условия для прохождения зерен через пространственную решетку солоmistого вороха [4–7]. Параметры данного процесса заслуживают специального теоретического рассмотрения.

### **Основная часть**

В процессе работы клавишного соломотряса солоmistый ворох, двигаясь по поверхности клавиши, поступает на пружинно-пальцевый активатор, пальцами которого подбрасывается и разрыхляется. Слой солоmistого вороха делится на две части, которые находятся сверху и снизу пальца. При этом происходит не только разуплотнение солоmistого вороха, а также его сепарация, которая характеризуется тем, что в верхнем слое находится более грубый ворох (крупные солоmistые частицы совместно с зерном), а в нижнем – мелкая фракция солоmistого вороха с зерном. Для того, чтобы определить силы, действующие на палец активатора при его работе, проанализируем схему положения пальца в солоmistом ворохе (рис. 1) в определенный момент времени с установкой его под углом  $\beta$  к горизонтальной поверхности.

В процессе работы на палец действуют силы сопротивления как от верхнего слоя солоmistого вороха, так и от нижнего. Верхний слой вороха характеризуется массой, который определим по следующей зависимости:

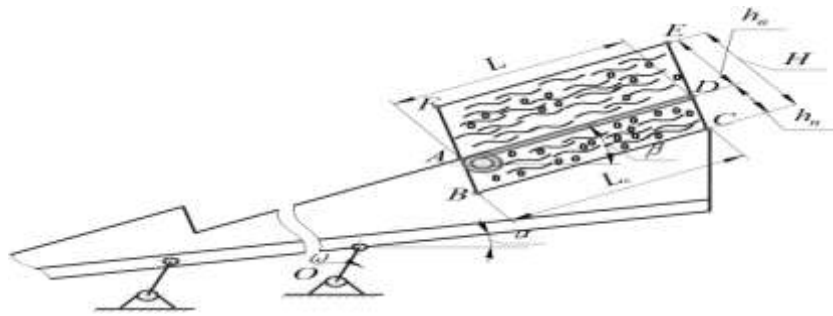
$$m_c^6 = V_{ADEF} \cdot \gamma_c, \quad (1)$$

где  $m_c^6$  – масса верхнего слоя вороха, кг;  $V_{ADEF}$  – объем верхнего слоя вороха, м<sup>3</sup>;  $\gamma_c$  – объемная масса вороха, кг/м<sup>3</sup>.

Масса нижнего слоя вороха:

$$m_c^H = V_{ABCD} \cdot \gamma_c, \quad (2)$$

где  $m_c^H$  – масса нижнего слоя вороха, кг;  $V_{ABCD}$  – объем нижнего слоя вороха, м<sup>3</sup>;  $\gamma_c$  – объемная масса вороха, кг/м<sup>3</sup>.



$L$  – длина пальца активатора, м;

$L_k$  – длина каскада клавиши соломотряса, м;

Рис. 1. Схема расположения пальца активатора в солоmistом ворохе

Толщина слоя солоmistого вороха на каскаде соломотряса определяется зависимостью:

$$H = h_n + h_v. \quad (3)$$

где  $H$  – толщина слоя вороха, м;  $h_n$  – толщина нижнего слоя, м;  $h_v$  – толщина верхнего слоя, м.

Ворох находится на пружинно-пальцевом активаторе (ППА) в состоянии относительного покоя в том случае, когда все действующие силы будут находиться в равновесии, в противном случае будут наблюдаться отклонения пальца активатора в вертикальной плоскости. Для того, чтобы установить величину перемещения конца пальца активатора –  $Y_{\max}$  (м), необходимо рассмотреть все силы, действующие на ППА в процессе работы, и при этом определить вертикальную результирующую силу –  $R_y$  (Н), от которой будет зависеть величина отклонения пальца активатора.

Рассмотрение действующих сил начнем с того, что первоначально определим силы, которые действуют в ворохе (в верхнем и нижнем слоях), а затем приложим найденные силы к пальцу активатора. Рассмотрим кинематическую схему привода клавишного соломотряса. Кривошип, к которому прикреплен клавишный соломотряс на двух валах, расположены параллельно друг другу и равны по длине. Следовательно, кривошип, совместно с клавишным соломотрясом, образуют параллелограмный механизм, в котором клавишный соломотряс совершает поступательное движение относительно остова комбайна. При таком движении все точки клавиши и активатора будут иметь в каждый момент времени одинаковые скорости и ускорения, равные по величине и направлению скорости и ускорению точки  $A$  кривошипа  $OA$  (рис. 2). В процессе устойчивой работы два вала клавишного соломотряса вращаются равномерно с угловой скоростью  $\omega$  (рад/с). При таком движении ускорения всех точек клавиши и активатора будут равны центростремительному (нормальному) ускорению точки  $A$  кривошипа, которое определим по формуле:

$$a_n = \omega^2 r. \quad (4)$$

где  $\omega$  – угловая скорость вращения вала соломотряса, рад/с;  $r$  – радиус коленчатого вала соломотряса, м.

Вектор этого ускорения параллелен кривошипу и направлен от точки  $A$  к точке  $O$  (рис. 2) при вращении кривошипа. Вначале рассмотрим силы, действующие в верхнем слое солоmistого вороха, затем – в нижнем слое, а после приложим полученные силы к пальцу активатора.

Направление сил инерции точек клавиши и активатора обусловлено поступательным движением каскада клавиши с жестко закрепленными на клавишах активаторами. Силы инерции

всех точек (центробежные) направлены противоположно их центростремительному ускорению, т.е. параллельно кривошипу, от точки  $O$  к точке  $A$ . В общем виде сила инерции пальца и соломистого вороха определяется по следующей зависимости:

$$P_i = ma_i = m\omega^2 r ,$$

(5)

где  $m$  – рассматриваемая масса пальца (соломистого вороха), кг.

Схема пружинно-пальцевого активатора с учетом действующих сил представлена на рис. 2.

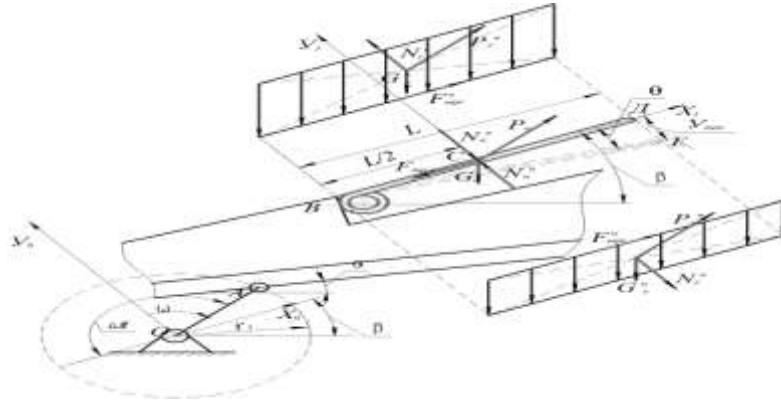


Рис. 2. Схема пружинно-пальцевого активатора и действия сил со стороны соломистого вороха

При этом сила инерции составит [8–9]:

для верхнего слоя:  $P_c^g = m_c^g \omega^2 r$  ; для нижнего слоя:  $P_c^h = m_c^h \omega^2 r$  ;

для пальца активатора:  $P_n = m_n \omega^2 r$ .

Сила тяжести, равная в общем виде:

$$G_i = m_i g ,$$

(6)

для верхнего слоя:  $G_c^g = m_c^g g$  ; для нижнего слоя:  $G_c^h = m_c^h g$  ;

для пальца активатора:  $G_n = m_n g$ .

Воздействие соломистого вороха на палец активатора представим в виде распределенной нагрузки по всей длине пальца –  $L$ . Силы действия пальца на ворох представим как сосредоточенную силу в середине пальца перпендикулярную ему и обозначим: для верхнего слоя –  $N_c^g$  , нижнего слоя –  $N_c^h$ . На палец активатора эти силы действуют в противоположном направлении –  $N_n$ .

$$\left| \overrightarrow{N_n^h} \right| = \left| \overrightarrow{N_c^h} \right| .$$

(7)

$$\left| \overrightarrow{N_n^g} \right| = \left| \overrightarrow{N_c^g} \right| .$$

В процессе движения вороха по поверхности пальца возникают силы трения: верхнего слоя –  $F_{трс}^g$ , нижнего слоя –  $F_{трс}^h$ , пальца –  $F_{трп}$ . Угол установки пальца активатора с горизонтальной поверхностью составляет  $\beta$ .

Рассмотрим верхний слой вороха, в котором определим силу реакции  $N_c^g$ , для чего спроектируем силы, действующие на ворох, на ось  $Y_1$ . Начало осей координат  $X_1$  и  $Y_1$  поместим в точку  $C$  и расположим ось  $X_1$  вдоль пальца, а ось  $Y_1$  перпендикулярно, т. е. параллельно осям  $X_0$  и  $Y_0$ . Положение точки  $B$  определяется углом поворота кривошипа привода соломотряса  $\omega t$ .

Спроектируем силы действующие на верхний слой соломистого вороха на ось  $Y_1$ :

$$N_c^g + P_c^g \sin \omega t - G_c^g \cos \beta = 0 .$$

(8)

Из выражения (8) определяем реакцию соломистого вороха:

$$N_c^g = G_c^g \cos \beta - P_c^g \sin \omega t .$$

Спроектируем силы действующие на нижний слой вороха на ось  $Y_1$ :

$$- N_c^h + P_c^h \sin \omega t - G_c^h \cos \beta = 0 .$$

(9)

Из уравнения (9) определим реакцию вороха:

$$N_c^H = P_c^H \sin \omega t - G_c^H \cos \beta.$$

После определения всех действующих на ворох сил, определим силы, действующие на палец активатора. При этом имеем следующие зависимости:

$$N_n^G = N_c^G = G_c^G \cos \beta - P_c^G \sin \omega t,$$

$$N_n^H = N_c^H = P_c^H \sin \omega t - G_c^H \cos \beta.$$

Силу трения в общем виде определим по зависимости:

$$F_{mp} = Nf,$$

где  $f$  – коэффициент трения соломистого о палец активатора (сталь 65Г).

Следовательно, трение для верхнего слоя соломистого вороха определим по выражению:

$$F_{mpc}^G = N_c^G f = (G_c^G \cos \beta - P_c^G \sin \omega t) f.$$

(10)

Силу трения нижнего слоя определим по выражению:

$$F_{mpc}^H = N_c^H f = (P_c^H \sin \omega t - G_c^H \cos \beta) f.$$

(11)

Силу трения пальца определим по следующей зависимости:

$$F_{mpn} = F_{mpc}^H + F_{mpc}^G.$$

(12)

Направление действия силы трения пальца противоположно направлению сил соломистого вороха в верхнем и нижнем слоях.

Из выражения (12) определим силу трения пальца:

$$F_{mpn} = [(G_c^G \cos \beta - P_c^G \sin \omega t) + (P_c^H \sin \omega t - G_c^H \cos \beta)] f.$$

Векторное уравнение всех сил, которые действуют на палец активатора, будет иметь вид:

$$\sum_{k=1}^5 \overline{F}_k = \overline{G}_n + \overline{N}_n^H + \overline{N}_n^G + \overline{P}_n + \overline{F}_{mpn}.$$

(13)

При этом суммарную проекцию данных сил на ось  $Y_1$  обозначим следующим образом:

$$\sum F_y = R_y.$$

Проекции сил на ось  $Y_1$ :

$$R_y = N_n^H - N_n^G + P_n \sin \omega t - G_n \cos \beta.$$

(14)

Подставим в выражение (14) определенные ранее зависимости:

$$\begin{aligned} R_y &= P_c^H \sin \omega t - G_c^H \cos \beta - G_c^G \cos \beta + P_c^G \sin \omega t + P_n \sin \omega t - G_n \cos \beta = \\ &= (P_c^H + P_c^G + P_n) \sin \omega t - (G_c^H + G_c^G + G_n) \cos \beta. \end{aligned}$$

Если угол поворота коленчатого вала  $\omega t$  будет больше  $180^\circ$ , то сила тяжести и сила инерции нижнего слоя на палец действовать не будут. После определения результирующей силы находим изгибающий момент, действующий на палец активатора. Так как палец жестко закреплен на каскаде клавиши, то изгиб пальца произойдет относительно места крепления – точки  $B$ .

Определим изгибающий момент его по следующей зависимости [9]:

$$M_u = R_y \frac{L}{2},$$

(15)

$$M_u = [(P_c^H + P_c^G + P_n) \sin \omega t - (G_c^H + G_c^G + G_n) \cos \beta] \frac{L}{2}.$$

Угловое перемещение конца пальца активатора определим по следующей зависимости:

$$\theta = \frac{M_u}{Z_0},$$

(16)

где  $Z_0$  – жесткость пружины кручения, Н/м.

При этом жесткость определим по зависимости [10]:

$$Z_0 = \frac{EJ_b}{\pi Dn},$$

(17)

где  $E$  – модуль упругости материала, Н/м<sup>2</sup>;  $J_b$  – осевой момент инерции сечения пальца, м<sup>4</sup>;  
 $D$  – средний диаметр пружины кручения пальца активатора, м;  $n$  – число витков пружины  
 пальца активатора.

Осевой момент инерции для пальца активатора круглого сечения [10]:

$$J_b = \frac{\pi d^4}{64},$$

(18)

где  $d$  – диаметр пальца активатора, м.

Угловое перемещение пальца активатора [10]:

$$\theta = \frac{[(P_c^H + P_c^e + P_n) \sin \omega t - (G_c^H + G_c^e + G_n) \cos \beta] \frac{L}{2}}{\frac{Ed^4}{64Dn}} =$$

$$= \frac{[(P_c^H + P_c^e + P_n) \sin \omega t - (G_c^H + G_c^e + G_n) \cos \beta] L 32 D n}{Ed^4}$$

Величина отклонения конца пальца активатора, исходя из треугольника  $BDE$  (рис. 2):

$$Y_{\max} = L \sin \theta.$$

(19)

Произведем подстановку известных величин в формулу (19):

$$Y_{\max} = L \sin \frac{[(P_c^H + P_c^e + P_n) \sin \omega t - (G_c^H + G_c^e + G_n) \cos \beta] L 32 D n}{Ed^4}.$$

При этом амплитуда колебаний конца пальца активатора будет представлена следующим уравнением:

$$A = 2L \sin \frac{[(P_c^H + P_c^e + P_n) \sin \omega t - (G_c^H + G_c^e + G_n) \cos \beta] L 32 D n}{Ed^4}.$$

(20)

Поэтому, за счет колебаний пальца активатора толщина соломистого вороха увеличится. Следовательно, толщина слоя соломистого вороха с учетом воздействия ППА примет вид:

$$H_{\kappa} = H + Y_{\max},$$

(21)

где  $H$  – толщина слоя соломистого вороха, м.

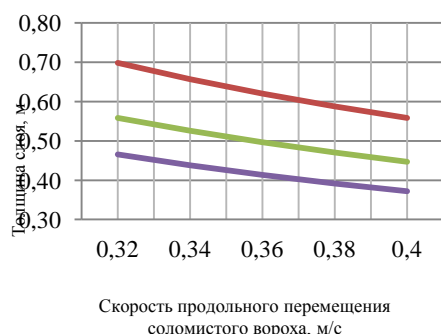
Толщина слоя соломистого вороха определяется по выражению [11]:

$$H = \frac{(1 - \beta) \cdot q}{B_c \cdot \gamma_c \cdot v_c}.$$

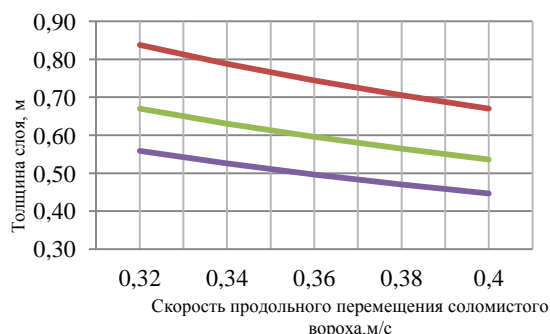
(22)

где  $\beta$  – коэффициента соломистости, 0,33 [12];  $q$  – пропускная способность зерноуборочного комбайна, кг/с;  $B_c$  – ширина клавишного соломотряса, м;  $v_c$  – скорость продольного движения соломистого вороха по клавишам соломотряса, м/с.

При расчетах принимаем значения пропускной способности зерноуборочного комбайна с учетом перспектив развития комбайностроения: 10, 12, 14, 16 и 18 кг/с. Значения скоростей принимаем исходя из оптимального интервала показателя кинематического режима:  $v_{c1}=0,32$  м/с,  $v_{c2}=0,34$  м/с,  $v_{c3}=0,36$  м/с,  $v_{c4}=0,38$  м/с,  $v_{c5}=0,40$  м/с [11]. Значения объемной массы соломистого вороха на соломотрясе:  $\gamma_{c1}=20$  кг/м<sup>3</sup>,  $\gamma_{c2}=25$  кг/м<sup>3</sup>,  $\gamma_{c3}=30$  кг/м<sup>3</sup> [12]. Полученные зависимости толщины соломистого вороха от скорости движения представлены на рис. 3.



а)



б)

—  $\gamma=20 \text{ кг/м}^3$  —  $\gamma=25 \text{ кг/м}^3$  —  $\gamma=30 \text{ кг/м}^3$

а) при подаче 10 кг/с, б) при подаче 12 кг/с

Рис. 3. Зависимость толщины слоя соломистого вороха от скорости продольного перемещения при различной пропускной способности

Пределы изменения толщины слоя соломистого вороха в зависимости от подачи имеют следующие расчетные значения: для подачи 10 кг/с – 0,37...0,70 м, 12 кг/с – 0,45...0,84 м, 14 кг/с – 0,52...0,98 м, 16 кг/с – 0,60...1,12 м, 18 кг/с – 0,67...1,26 м.

Уравнения для определения воздействия ППА на слой соломистого вороха примет вид:

$$H_{\kappa} = H + L \sin \frac{[(P_c'' + P_c^e + P_n) \sin \omega t - (G_c'' + G_c^e + G_n) \cos \beta] L 32 D n}{E d^4}.$$

Таким образом, в результате воздействия пальцев активатора происходит увеличение толщины слоя соломистого вороха за счет его разуплотнения и, как следствие, снижение объемной массы, что приведет к улучшению условий выделения зерна из вороха, повышению коэффициента разрыхления вороха, что в итоге обеспечит снижение потерь зерна за соломотрясом. Коэффициент разрыхления вороха, определяющий эффективность воздействия пальцев активатора на соломистый ворох, определим по зависимости:

$$\varepsilon = H_{\kappa} / H,$$

(23)

При подстановке в зависимость (23) определенных ранее величин (19,21,22) получим следующее уравнение:

$$\varepsilon = (H + L \sin \frac{[(P_c'' + P_c^e + P_n) \sin \omega t - (G_c'' + G_c^e + G_n) \cos \beta] L 32 D n}{E d^4}) / H.$$

$$\varepsilon = \left( \frac{(1 - \beta) \cdot q}{B_c \cdot \gamma_c \cdot v_c} \right) +$$

$$+ L \sin \frac{[(P_c'' + P_c^e + P_n) \sin \omega t - (G_c'' + G_c^e + G_n) \cos \beta] L 32 D n}{E d^4} / \frac{(1 - \beta) \cdot q}{B_c \cdot \gamma_c \cdot v_c}.$$

(24)

Как видно, численное значение коэффициента разрыхления вороха будет больше единицы, то есть толщина вороха при воздействии активатора увеличивается, при этом объемная масса его пропорционально уменьшается. При этом для различной пропускной способности установили, что коэффициент разрыхления соломистого вороха изменяется в пределах 1,01...1,07.

#### Заключение

Установили пределы изменения толщины слоя соломистого вороха в зависимости от подачи имеют следующие расчетные значения: для подачи 10 кг/с – 0,37...0,70 м, 12 кг/с – 0,45...0,84 м, 14 кг/с – 0,52...0,98 м, 16 кг/с – 0,60...1,12 м, 18 кг/с – 0,67...1,26 м. Полученные аналитические зависимости для определения отклонения конца пальца активатора  $Y_{\max}$  (м) (19), амплитуды колебания пальца  $A$  (м) (20) и коэффициента разрыхления соломистого вороха  $\varepsilon$  (24), который находится в пределах 1,01...1,07, позволяют оценить эффективность воздействия пальцев активатора на слой вороха. При этом чем больше будет данный коэффициент, тем большее разрыхляющее воздействие окажет палец активатора на слой вороха, что приведет к снижению потерь зерна за клавишным соломотрясом зерноуборочного комбайна.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Зубков, В. И. Исследование сепарации грубого вороха: научное издание / В. И. Зубков // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2005. – № 7. – С. 10–14.
2. Красноступ, С. М. К вопросу интенсификации процесса сепарации грубого вороха на клавишном соломотрясе / С.М.Красноступ. – Машиностроение: интеграция отраслевой и вузовской науки: матер. науч.-техн. конф. 20–22 апреля 1998/РГАСХМ, Ростов-нД, 1998. – 308 с.
3. Григорьев, А. А. Исследование процесса сжатия слоя сеносоломистых материалов / А. А. Григорьев // Тракторы и сельхозмашины. – 1964. – №8. С. 19–21.
4. Ковалевский, В. Ф. Оптимизация конструкции и выбор параметров пружинно-пальцевого активатора соломотряса зерноуборочного комбайна / В. Ф.Ковалевский, С. В. Курзенков, А. В. Клочков // Вестн. Белорус.гос. с.-х. акад. – 2017. – № 1. – С. 109–113.
5. 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 : матер. 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, 2016. С. 45–48.

6. 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.

7. Липская, В. К. Экономическая эффективность применения зерноуборочных комбайнов с активаторами соломотряса / В. К. Липская, А. В. Клочков, В. Ф. Ковалевский // Вестн. Белорус. гос. с.-х. акад. – 2017. – № 2. – С. 123–126.

8. Анурьев, В. И. Справочник конструктора–машиностроителя / В. И. Анурьев. – В 3 т. Т. 3. – 8-с изд., перераб. и доп. Под ред. И. Н. Жестковой. – М.: Машиностроение, 2001. – 864 с.

9. Теоретическая механика в примерах и задачах, т. III (специальные главы механики), / М. И. Бать [и др.] – М., 1973 г. – 488 с.

10. Пономарев, С. Д. Расчет упругих элементов машин и приборов / С. Д. Пономарев, Л. Е. Андреева. — М.; 1980. – 326 с.

11. Кленин, Н. И. Сельскохозяйственные и мелиоративные машины: Элементы теории рабочих процессов, расчет регулировочных параметров и режимов работы / Н. И. Кленин, В. А. Сақун. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Колос, 1980. – 671 с.

12. Летошнев, М. Н. Сельскохозяйственные машины. Теория, расчет проектирование и испытание / М.Н. Летошнев. – М., 1955. – 764 с.