

УДК 631.358:633.521

## МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ РЕМНЕЙ ФИГУРНЫМИ ШКИВАМИ В ЛЬНОУБОРОЧНЫХ МАШИНАХ

**М.М. Ковалев**, докт. техн. наук, проф., академик РАЕН, директор  
*ГНУ ВНИИМЛ Россельхозакадемии*

---

*Наведено результати досліджень деформації стиснення насів шківками з циліндричними виступами на робочих поверхнях у льноозбиральних машинах. Розроблений метод визначення заглиблення циліндричних виступів у гумовий шар насів при їх прямолінійному та вигнутому положенні.*

**Ключові слова:** шків, нас, циліндр, сила, тиск, деформація.

---

**Постановка проблеми.** Уборка льна-долгунца в агротехнічні терміни є гарантією збереження врожаю та якості льнопродукції. Це обставина вимагає високопродуктивної роботи льноуборочних машин в будь-яких погодних умовах, коли в уборочний період стеблестої льна, наприклад, має підвищену вологість через ранні роси, дощову погоду, заростання посівів тощо. При роботі в таких умовах через наявність вологи на робочих поверхнях шківів та ремней відбувається зачіпання між ними через зменшення коефіцієнта тертя ковзання однієї поверхні відносно іншої, що призводить до пробуксовки та навіть буксування ремней теревального апарату, поперечного та зажимного транспортерів [1]. Для усунення пробуксовки ремней значно збільшують їх натягнення, збільшують тиск в теревальних ручьях, ручьях поперечного та зажимного транспортерів, що призводить до значного пошкодження стебел та зменшенню довговічності ремней.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Теоретичні та експериментальні дослідження ременних передач наведені в багатьох роботах [2-4] тощо. Аналогічні дослідження парних ременних передач виконані Г.А. Хайлісом [5,6]. Всі ці дослідження проведені застосовуючи до плоских ременних передач. Деякі аспекти деформації стиснення ремней фігурними шківками наведені в роботі [7].

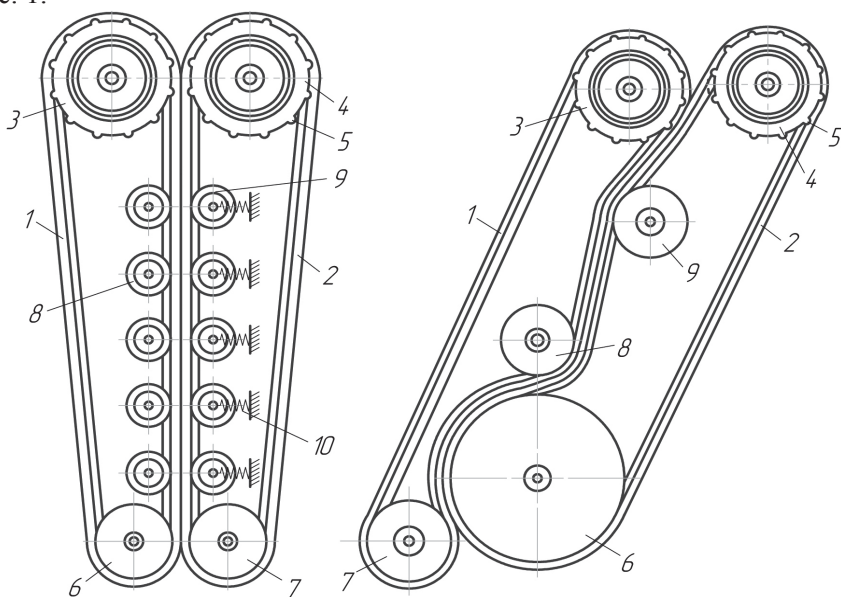
---

© М.М. Ковалев.

Механізація та електрифікація сільського господарства. Вип. 97. 2013.

**Цель работы.** Исследовать деформацию сжатия ремней шкивами с цилиндрическими выступами на рабочих поверхностях в льноуборочных машинах. Разработать метод определения углубления цилиндрических выступов в резиновый слой ремней при их прямолинейном и изогнутом положении.

**Результаты исследований.** Увеличение сцепления рабочих поверхностей шкивов с ремнями достигается закреплением вдоль образующих указанных поверхностей шкивов металлических цилиндрических выступов в соответствии со схемами, представленными на рис. 1.



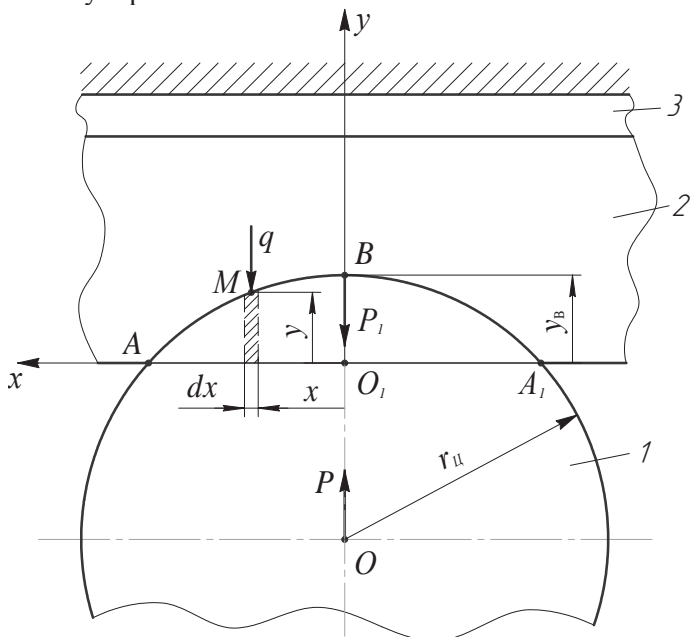
**Рис. 1.** Схемы льнотеребильных секций с продольными прямолинейными (а) и криволинейными (б) ручьями и шкивами, снабженными цилиндрическими выступами. На рис. 1,а,б: 1, 2 – ремни; 3, 4 – шкивы; 5 – цилиндрические выступы. На рис. 1,а: 6, 7 – натяжные ролики; 8 – опорные ролики; 9 – нажимные ролики; 10 – нажимные пружины. На рис. 1,б: 6 – теребильный шкив; 7 – натяжной ролик; 8, 9 – отклоняющие ролики

При взаимодействии шкивов, снабженных цилиндрическими выступами, с ремнями происходит деформация сжатия (вдавливание) этих выступов в резину ремня, которая может осуществляться при не-

изогнутом его положении (прямолинейное положение ремня) и при изогнутом его положении, когда он обхватывает часть поверхности шкива с выступами. Рассмотрим деформацию сжатия ремней цилиндрическими выступами шкива при таком взаимодействии.

Сначала рассмотрим силы, действующие со стороны цилиндра (цилиндрического выступа шкива) на ремень неизогнутый (прямолинейный), что имеет место в теребильных аппаратах льноуборочных машин при рядовом расположении опорных и нажимных роликов (рис. 1,а) [2].

На рис. 2 представлена схема цилиндра, внедряющегося в резину ремня. На цилиндр, со стороны шкива, действует сила  $P$ . Эта сила, приложенная в центре окружности цилиндра, вдавливает его в резину прямолинейного ремня. Прямолинейная форма ремня может быть, если ремень растягивается силами или при наличии над ремнем прямолинейной упорной пластины.



**Рис. 2.** Схема вдавливания цилиндра (цилиндрического выступа) в прямолинейный ремень: 1 – цилиндр; 2 – ремень; 3 – упорная пластина

Проведем систему координат  $xO_1y$  с началом в точке  $O_1$  на пере-

сечении линии действия силы  $P$  с поверхностью ремня; ось  $x$  направлена по поверхности ремня, а ось  $y$  – перпендикулярна поверхности ремня. Наибольшее углубление цилиндра в ремень обозначено  $y_B$ . При углублении цилиндра в ремень нижние слои резины ремня не будут плотно прижиматься к цилиндрической поверхности – это явление изображено на схеме, а точками  $A$  и  $A_1$  обозначены те точки цилиндра, к которым резина должна была бы прижаться, если бы у нее не было бы упругих свойств и сцепленности частиц.

Выделим на поверхности соприкосновения резины ремня с цилиндром точку  $M$  с координатами  $x$  и  $y$ . Обозначим через  $q$  давление резины ремня на цилиндр. При деформации резины ремня в определенных пределах давление  $q$  прямо пропорционально глубине сжатия [5], т.е.

$$q = c \cdot y, \quad (1)$$

где  $c$  – показатель твердости резины (измеряется в Н/мм<sup>3</sup>);  $y$  – глубина деформации ремня.

Тогда элементарная сила противодействия внедрению точки  $M$  цилиндра в резину будет  $q \cdot dx = c \cdot y \cdot dx$  где  $dx$  – ширина элемента в точке  $M$ , а вся сила противодействия внедрению цилиндра в резину

ремня будет  $\int_{A_1}^A B_p \cdot c \cdot y \cdot dx$  где  $B_p$  – ширина ремня, а интегрирование

указанного интеграла производится в пределах от точки  $A_1$  до точки  $A$ .

Дуга  $A_1BA$  является дугой окружности, и если исходить из этого при составлении зависимости  $y$  от  $x$ , то получится весьма сложный интеграл. Для его упрощения поступим так же, как это сделано в литературе [6], а именно, представим зависимость  $y$  от  $x$  следующей приближенной формулой:

$$y \approx y_B - \frac{x^2}{2r_{\text{ц}}}, \quad (2)$$

где  $r_{\text{ц}}$  – радиус  $OB$  цилиндра.

Так как по величине сила  $P_1$  противодействия внедрению цилиндра в резину ремня равна силе  $P$ , то

$$P \approx \int_{-x_{A_1}}^{x_A} B_p c \left( y_B - \frac{x^2}{2r_{\text{ц}}} \right) \cdot dx, \quad (3)$$

где  $x_{A_1}$  и  $x_A$  – абсциссы точек  $A_1$  и  $A$ .

Абсциссы  $x_{A_1}$  и  $x_A$  находятся из (2) при  $y \approx 0$ . Тогда  $x_{A_1} = -\sqrt{2r_{ц}y_B}$ , а  $x_A = \sqrt{2r_{ц}y_B}$ .

На основе изложенного получаем:

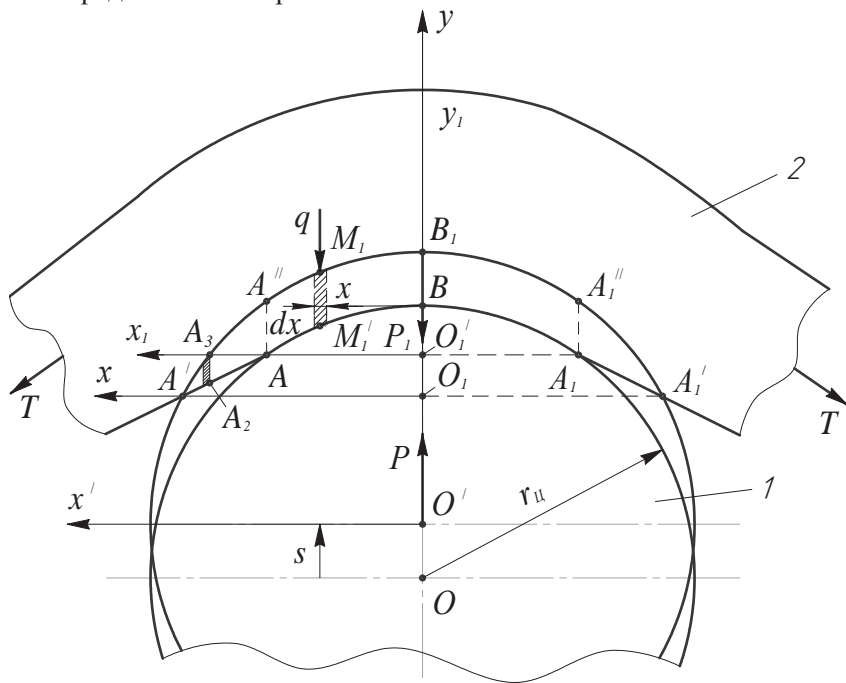
$$P \approx \frac{4}{3} B_p \cdot c \cdot y_B \cdot \sqrt{2r_{ц}y_B}. \quad (4)$$

Отсюда находим глубину  $y_B$  погружения цилиндра в резину ремня:

$$y_B \approx \sqrt[3]{\frac{9P^2}{32B_p^2 c^2 r_{ц}}}. \quad (5)$$

Так вдавливается цилиндр (цилиндрический выступ) в резину прямолинейного ремня.

Рассмотрим теперь силы, действующие со стороны цилиндра (цилиндрического выступа) шкива на ремень изогнутый. Схема этого явления представлена на рис. 3.



**Рис. 3.** Схема вдавливания цилиндра (цилиндрического выступа) в изогнутый ремень: 1 – цилиндр; 2 – ремень

Под действием силы  $P$  цилиндрический выступ углубится на расстояние  $BB_1$  в резину изогнутого под действием растягивающих сил  $T$  ремня. Расстояние  $BB_1$  равно пути  $OO' = s$  перемещения центра  $O$  сечения выступа.

До углубления выступа в ремень дуга обхвата сечения выступа ремнем была  $ABA_1$ , то после его углубления под действием силы  $P$  дуга обхвата его сечения стала  $A'B_1A_1'$ . Под действием силы  $P$  выступ деформировал резину ремня по фигуре  $A'B_1A_1'A_1BAA'$ , состоящей из трех частей:  $A'A \gg A$ ,  $AA \gg A_1 \gg A_1$  и  $A_1A_1 \gg A_1'$ . Из этих частей в фигуре  $AA \gg A_1 \gg A_1$  деформирование резины происходит с самого начала соприкосновения выступа с ремнем, а в фигурах  $A'A \gg A$  и  $A_1A_1 \gg A_1'$  деформация резины нарастает постепенно по мере углубления выступа в резину ремня.

Деформация сжатия резины в левой половине фигуры  $A'B_1A_1'A_1BAA'$  такая же, как деформация резины в правой половине этой же фигуры. Ввиду этого достаточно исследовать деформацию сжатия резины в одной ее половине, например, в левой  $A'A \gg B_1BAA'$ , в которой деформация сжатия резины ремня происходит под действием силы  $P/2$ .

Выделим на поверхности соприкосновения левой части резины ремня с цилиндрическим выступом точку  $M_1$ . Давление  $q$  в этой точке определяется по формуле (1), где  $y$  будет расстояние  $M_1'M_1$ , т.е. деформация сжатия резины ремня в точке  $M_1$ .

Проведем систему координат  $xO_1y$  с началом в точке  $O_1$  пересечения линии  $A'A_1'$  с вертикалью  $OB_1$ . Как видно из схемы на рис. 3, расстояние  $M_1'M_1$  равно  $BB_1$ , которое в свою очередь равно  $s$ . Ввиду изложенного на участке  $AB$   $q = c \cdot s$ , т.е.  $q$  не зависит от  $x$ . Элементарная сила сопротивления сжатию  $dQ_1$  в точке  $M_1$  равна

$$dQ_1 = B_p \cdot c \cdot s \cdot dx, \quad (6)$$

где  $B_p$  – ширина ремня.

Вся сила  $Q_1$  сопротивления деформации сжатия на участке  $O_1'A$  бу-

дет равна  $\int_0^{x_A} B_p c s dx$ , где  $x_A$  – расстояние  $O_1'A$ . Для нахождения расстоя-

ния  $O_1'A$  проведем еще одну систему координат  $x_1O_1'y_1$  с началом в точке  $O_1'$ , а ось  $y_1$  направим по оси  $y$ , но с началом в точке  $O_1'$ . Воспользуемся уравнением (2), которое применительно к системе координат  $x_1O_1'y_1$  имеет вид

$$y_1 \approx y_{O_1B} - \frac{x_1^2}{2r_{II}}, \quad (7)$$

где  $y_{O_1B}$  - расстояние  $O_1'B$ .

В этой системе координат при  $y_1 = 0$ ,  $x_1 = x_{1A}$ . Подставляя эти данные в (7) для решения полученного уравнения относительно  $x_{1A}$ , будем

иметь:  $0 = y_{O_1B} - \frac{x_{1A}^2}{2r_{II}}$ , откуда  $x_{1A} = \pm \sqrt{2r_{II}y_{O_1B}}$ . Знак «+» будет при  $x_1 = x_{1A}$ , а знак «-» будет при  $x_1 = O_1'A_1$ .

Подставляя полученное значение  $x_{1A}$  в интеграл

$$Q_1 = \int_0^{x_{1A}} B_p \cdot c \cdot s \cdot dx, \text{ получим} \\ Q_1 = B_p c s \int_0^{x_{1A}} dx = B_p c s \sqrt{2r_{II}y_{O_1B}}. \quad (8)$$

На участке  $AA'$  (рис. 3) деформация сжатия резины ремня меняется от величины  $AA$  в точке  $A$  до нуля в точке  $A'$ . В некоторой промежуточной точке  $A_2$  деформация сжатия резины будет  $A_2A_3$ . Следовательно, в зоне  $AA'$  с увеличением расстояния  $x$  деформация сжатия резины ремня уменьшается. Для точного определения этой деформации необходимо вычесть из ординат кривой  $A'A_3A$  ординаты прямой  $A'A_2A$ . При этом получаются сложные расчеты. Для их упрощения, с достаточной для практических целей точностью, примем кривую  $A'A_3A$  за прямую.

Из рис. 3 видно, что при  $x_1 = O_1'A$  (т.е.  $x_{1A}$ ), деформация сжатия  $y_d$  резины равна  $AA$  (т.е.  $s$ ), а при  $x = O_1'A'$  (или  $x_A$ ), деформация  $y_d = 0$ .

Приняв линейный закон изменения деформации резины ремня [2, 3], составим уравнение прямой в системе координат  $xO_1y$ :

$\frac{y_d - y_{AA''}}{0 - y_{AA''}} = \frac{x - x_A}{x_{A'} - x_A}$ , где  $y_{AA''}$  - деформация сжатия  $AA$ , равная  $s$ ,  $x_A$  - абсцисса  $x_A$ , а  $x_{A'}$  - абсцисса точки  $A'$ , т.е. расстояние  $O_1A'$ .

Для определения абсциссы  $x_{A'}$  воспользуемся уравнением (7), которое применительно к окружности с центром в точке  $O'$  в системе координат  $x'O'y$  будет иметь вид:

$$y \approx y_{O_1B_1} - \frac{(x')^2}{2r_{II}}, \quad (9)$$

где  $y_{O_1B_1}$  - расстояние  $O_1B_1$ .

В уравнении (9) при  $y = 0$ ,  $x' = x_{A'}$ . Подставляя эти данные в (9) и решая полученное уравнение относительно  $x_{A'}$ , найдем:  $x_{A'} = \pm \sqrt{2r_{\text{II}} y_{O_1 B_1}}$ . Знак «+» будет у  $x_{A'}$ , а «-» будет у  $x_{A'}$ , что соответствует точке  $A_1$ . С учетом этого

$$x_{A'} = \sqrt{2r_{\text{II}} y_{O_1 B_1}}. \quad (10)$$

С учетом изложенных данных приведенное выше уравнение прямой примет вид:

$$\frac{y_d - y_{AA''}}{0 - y_{AA''}} = \frac{x - x_A}{\sqrt{2r_{\text{II}} y_{O_1 B_1}} - x_A}, \quad (11)$$

где  $x_A = \sqrt{2r_{\text{II}} y_{O_1 B}}$ , а  $y_{AA''} = s$ .

Из (11) получаем:

$$y_d = s \frac{x_{A'} - x}{x_{A'} - x_A} = s \frac{\sqrt{2r_{\text{II}} y_{O_1 B_1}} - x}{\sqrt{2r_{\text{II}} y_{O_1 B_1}} - \sqrt{2r_{\text{II}} y_{O_1 B}}}. \quad (12)$$

В соответствии с равенством (1) давление  $q$  в зоне  $A'A$  деформации сжатия резины ремня будет  $q = c \cdot y_d$ . С учетом (12) имеем:

$$q = cs \frac{\sqrt{2r_{\text{II}} y_{O_1 B_1}} - x}{\sqrt{2r_{\text{II}} y_{O_1 B_1}} - \sqrt{2r_{\text{II}} y_{O_1 B}}}. \quad (13)$$

В точке  $A_3$  элементарная сила сопротивления резины ремня деформации сжатия  $dQ_2$  по аналогии с (6) будет

$$dQ_2 = B_p cs \frac{\sqrt{2r_{\text{II}} y_{O_1 B_1}} - x}{\sqrt{2r_{\text{II}} y_{O_1 B_1}} - \sqrt{2r_{\text{II}} y_{O_1 B}}} dx. \quad (14)$$

Вся сила  $Q_2$  окажется равной:

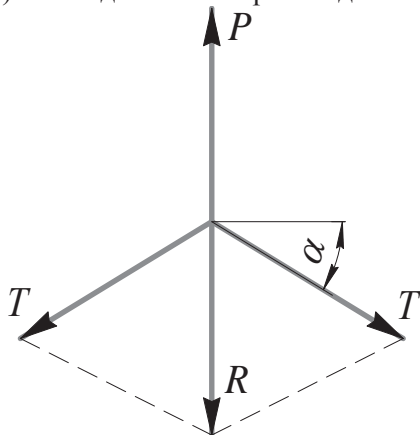
$$Q_2 = \int_{x_A}^{x_{A'}} B_p cs \frac{\sqrt{2r_{\text{II}} y_{O_1 B_1}} - x}{\sqrt{2r_{\text{II}} y_{O_1 B_1}} - \sqrt{2r_{\text{II}} y_{O_1 B}}} dx = B_p cs \frac{\sqrt{2r_{\text{II}} y_{O_1 B_1}} - \sqrt{2r_{\text{II}} y_{O_1 B}}}{2}. \quad (15)$$

Сумма сил  $Q_1 + Q_2 = P/2$ , откуда  $P = 2(Q_1 + Q_2)$ , т.е.



$$P = 2 \left( B_p c s \sqrt{2r_{ц} y_{O'_{\text{В}}}} + B_p c s \frac{\sqrt{2r_{ц} y_{O'_{\text{В}_1}} - \sqrt{2r_{ц} y_{O'_{\text{В}}}}} }{2} \right) = B_p c s \left( \sqrt{2r_{ц} y_{O'_{\text{В}}}} + \sqrt{2r_{ц} y_{O'_{\text{В}_1}} \right) \quad (16)$$

Силы  $T$  (рис. 3) своим действием противодействуют силе  $P$  (рис. 4).



**Рис. 4.** Векторное сложение сил  $T$ , их равнодействующая сила  $R$  и сила  $P$

Сила  $R = 2T \sin \alpha$ , где  $\alpha$  – угол между горизонталью и направлением правой силы  $T$ . Так как сила  $R$  равна силе  $P$  и противоположно направлена, то  $2T \sin \alpha = B_p c s \left( \sqrt{2r_{ц} y_{O'_{\text{В}}}} + \sqrt{2r_{ц} y_{O'_{\text{В}_1}} \right)$ , откуда находим зависимость пути  $s$  от силы  $T$ :

$$s = \frac{2T \sin \alpha}{B_p c \left( \sqrt{2r_{ц} y_{O'_{\text{В}}}} + \sqrt{2r_{ц} y_{O'_{\text{В}_1}} \right)}. \quad (17)$$

**Выводы.** 1. Увеличение сцепления рабочих поверхностей ведущих шкивов с ремнями в льноуборочных машинах достигается применением цилиндрических выступов, жестко закрепленных по образующим их цилиндрических поверхностей на определенном расстоянии друг от друга. При работе таких ременных передач во время натяжения ремней происходит углубление выступов в резиновый слой ремней и, вращаясь вместе со шкивами, они тянут за собой ремни.

2. Разработан метод расчета углубления цилиндрических выступов

в резиновый слой ремней при их прямолинейном и изогнутом положении и выведены зависимости глубины внедрения этих выступов от свойств резины, радиуса выступа, действующей силы и ширины ремня, по которым проводится расчет необходимых параметров шкива с выступами и ремня.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ковалев, М.М. Приоритетная техника для льноводства/М.М. Ковалев//Льняное дело. – 1998. - № 2. – С. 32-35.
2. Шлыков, М.И. Льноуборочный комбайн. – М.: Машгиз, 1949. – 300 с.
3. Андреев, А.В. Передача трением. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1978. – 176 с.
4. Красников, В.В. Подъемно-транспортные машины. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Колос, 1981. – 263 с.
5. Хайлис, Г.А. Теория и расчет льноуборочных машин /Г.А. Хайлис: тр./Великолукский СХИ. – Елгава. – 1973. – Вып. XXVI. – 333 с.: ил.
6. Хайлис, Г.А. Теория льноуборочных машин. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2011. – 322 с.: ил.
7. Виноградов, А.В. Исследование процесса взаимодействия ремней со шкивами в льноуборочной машине//Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2012. - №6. – С. 6-8.

### МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ РЕМНЕЙ ФИГУРНЫМИ ШКИВАМИ В ЛЬНОУБОРОЧНЫХ МАШИНАХ

*Приведены результаты исследований деформации сжатия ремней шкивами с цилиндрическими выступами на рабочих поверхностях в льноуборочных машинах. Разработан метод определения углубления цилиндрических выступов в резиновый слой ремней при их прямолинейном и изогнутом положении.*

**Ключові слова:** шкив, ремень, цилиндр, сила, давление, деформация.

### METHOD FOR DETERMINING OF THE BELTS DEFORMATION BY FIGURED PULLEYS IN FLAX HARVESTING MACHINES

*The results of studies of compression deformation of belts by the pulleys with cylindrical protrusions on the working surfaces at flax harvesting machines. A method for determining of the deepening of cylindrical protrusions in the belts rubber layer under their straight and curved positions.*

**Key words:** pulley, belt, cylinder, force, pressure, deformation