

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЦЕПНОГО ТРАНСПОРТИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ВАЛКОВОЙ МАШИНЫ

## DETERMINATION OF THE PARAMETERS OF THE CHAIN CONVEYING DEVICE OF THE ROLLER MACHINE

Г.А. БАХАДИРОВ<sup>1</sup>, А.М. НАБИЕВ<sup>1</sup>, Ф.Р. РАХИМОВ<sup>1</sup>, М.У. МУСИРОВ<sup>2</sup>

G.A. BAHADIROV<sup>1</sup>, A.M. NABIEV<sup>1</sup>, F.R. RAKHIMOV<sup>1</sup>, M.U. MUSIROV<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>Институт механики и сейсмостойкости сооружений Академии наук Республики Узбекистан,  
<sup>2</sup>Ташкентский государственный транспортный университет)

(<sup>1</sup>Institute of Mechanics and Seismic Stability of Structures of the Academy of Sciences  
of the Republic of Uzbekistan,  
<sup>2</sup>Tashkent State Transport University)

E-mail: instmech@rambler.ru, a.nabiev@mail.ru, rahimov-furqat1992@inbox.ru,  
musirov.mech.1992@mail.ru

*В статье исследовано продольное колебание транспортерных цепей, перемещающих плоский материал с неравномерной поверхностью, уложенный вперегиб на опорной плите, в зону обработки между рабочими валами. Для исследования колебательного движения использован метод Галеркина и составлено уравнение Матье. Получено уравнение движения плоского материала с переменной массой. Значения коэффициентов уравнения зависят от кинематических параметров транспортерной цепи, опорной плиты и плоского материала, а также геометрических параметров рассмотренной технической системы.*

*Результаты исследования показали, что для снижения амплитуды колебаний транспортерных цепей требуется уменьшать линейную скорость подачи плоского материала в зону обработки валковой машины. Предложено техническое решение, которое обеспечит устойчивое положение опорной плиты во время обработки.*

*The article examines the longitudinal vibration of conveyor chains moving flat material with an uneven surface, laid in an inflection on a base plate, into the processing zone between the working shafts. To study the oscillatory motion, the Galerkin method was used and the Mathieu equations were compiled. The values of the equation coefficients depend on the kinematic parameters of the conveyor chain, base plate and flat material, as well as the geometric parameters of the considered technical system. The results of the study showed that in order to reduce the amplitude of vibrations of conveyor chains, it is necessary to reduce the linear speed of feeding flat material into the processing zone of the roller machine. A technical solution that will ensure a stable position of the base plate during processing has been proposed.*

**Ключевые слова:** цепной транспортер, колебание, плоский материал, цепь, переменная масса, равномерное движение, скорость подачи, привод.

**Keywords:** chain conveyor, vibration, flat material, chain, variable mass, uniform motion, feed rate, drive.

## Введение

В промышленности при транспортировке плоских материалов, в частности волокнистых материалов, в зону обработки технологических машин используются цепные и другие транспортирующие устройства. Правильный подбор геометрических и кинематических параметров транспортеров необходим для того, чтобы они работали эффективно и продуктивно в течение длительного времени.

Существуют различные типы транспортеров и методы их расчета. Рассмотрим некоторые работы, посвященные разработке, исследованию, совершенствованию конструкции и расчету транспортирующих устройств технологических машин.

В работе [1] описан инерционный способ транспортирования грузов в складские помещения. Разработана методика расчета, позволяющая синтезировать многофункциональный передвижной ленточный транспортер для конкретных производственных условий.

В работе [2] исследованы колебания в тяговых органах цепного транспортера. Определена частота собственных свободных колебаний тягового органа, возникающих от периодических ударов ходовых роликов пластинчатых транспортеров. Эти периодические удары на стыках увеличивают амплитуду низкочастотных собственных колебаний тягового органа транспортера.

В работе [3] исследована кинематика цепных транспортных конвейеров автоматических линий. Автором получены зависимости, позволяющие уменьшить коэффициент неравномерности движения и оптимизировать динамические процессы в линии при малых межосевых расстояниях.

В работе [4] исследованы динамические воздействия на тяговый орган цепного конвейера с применением компьютерного инженерного анализа Autodesk Inventor. Данный метод анализа позволяет определить возможности снижения динамических нагрузок на цепной конвейер.

В работе [5] решена задача повышения эффективности транспортера линии дробления отходов. Разработана математиче-

ская модель транспортера, позволяющая учитывать неравномерность дробленной продукции, от которой возникают нестабильные динамические воздействия на ленту транспортера.

В работе [6] предлагается механический привод, позволяющий подбирать требуемую скорость вращения вала и в широком диапазоне бесступенчато регулировать число оборотов вала. Данный привод рекомендован к применению в конструкциях технологических и вспомогательных машин.

Также известны различные устройства и машины для обезвоживания текстильных или других волокнистых материалов под механическим воздействием валковой пары. Обрабатываемый материал в зону обработки валковой парой может подаваться транспортером горизонтально, под наклоном и вертикально.

На основе технической системы, показанной на рис. 1, рассмотрим задачу о неравномерных колебаниях транспортерной цепи вертикального транспортера [7].

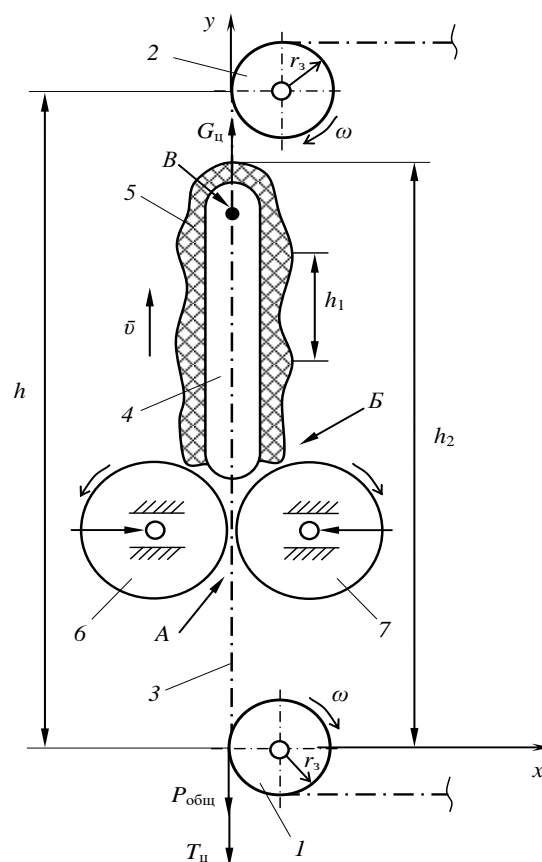


Рис. 1

### Основная часть

Рассматриваемая нами техническая система состоит из звездочек 1 и 2, транспортной цепи 3, опорной плиты 4, плоского материала 5, а также рабочих валов 6 и 7. Система работает следующим образом: транспортные цепи 3 посредством звездочек 1, 2 в вертикальном направлении перемещают опорную плиту 4, на которую предварительно впереди укладывается плоский материал 5. Затем транспортные цепи 3 перемещают плоский материал 5 вместе с опорной плитой 4 между рабочими валами 6, 7, где плоский материал 5 подвергается механической деформации на участке обжатия *A*. Рабочие валы служат, например, для отжима избыточной влаги из влагонасыщенного плоского (текстильного или другого) материала [8, 9]. При дальнейшем перемещении плоского материала 5 на участке *B* происходят колебания транспортирующих цепей 3 и плоского материала 5 с опорной плитой 4 относительно точек ее крепления на участке *B* в рассматриваемой нами технической системе.

В транспортирующем устройстве валковой машины (см. рис. 1) при начальном контакте плоского материала 5 и опорной плиты 4 с рабочими валами 6, 7 происходит удар и приводит к постепенному растягиванию, а в дальнейшем разрыву транспортных цепей 3 или поломке в узле крепления. Рабочие валы 6, 7 находятся под постоянным давлением. После принудительного захвата плоского материала 5 с опорной плитой 4 и дальнейшего их выхода из зоны захвата между вращающимися рабочими валами 6, 7 происходит их резкое колебательное движение по высоте.

Целью данной работы является определение значений колебания плоского материала с опорной плитой при их транспортировании и поиск путей предотвращения этого явления за счет внесения изменений в конструкцию транспортного устройства валковой машины.

Силы тяжести плоского материала, опорной плиты неравномерно распределяются вдоль транспортирующих цепей,

обхватывающих звездочки с радиусом *r*. Рассмотрим небольшие колебания технической системы, где транспортные цепи движутся с постоянной скоростью.

Запишем закон распределения массы плоского материала и опорной плиты в транспортирующем устройстве. При решении этой задачи используем систему координат Эйлера:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\partial x}{\partial t} + v \frac{\partial x}{\partial y},$$
$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} + 2v \frac{\partial^2 x}{\partial y \partial t} + v^2 \frac{\partial^2 x}{\partial y^2}.$$

Вводим силу втягивания транспортных цепей  $G_{ц}$ , затем по принципу Даламбера получаем:

$$m \left( \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} + 2\omega r_3 \frac{\partial^2 x}{\partial y \partial t} + \omega^2 r_3^2 \frac{\partial^2 x}{\partial y^2} \right) =$$
$$= (P_{об} + T_{ц} - G_{ц}) \frac{\partial^2 x}{\partial y^2}.$$

Здесь *m* – масса, соответствующая единице длины;  $T_{ц}$  – натяжное усилие транспортных цепей;  $G_{ц}$  – втягивающая сила транспортных цепей.

В данном частном случае

$$m = m_{пм} + m_{оп} + m_{ц} + m_{па} \sin \left( \frac{2\pi}{h_1} (y - vt) \right),$$

где  $m_{пм}$  – среднее значение массы транспортируемого плоского материала на единицу длины транспортирующих цепей, кг/см;  $m_{па}$  – переменная амплитуда функции массы плоского материала, кг/см;  $m_{ц}$  – масса на единицу длины транспортных цепей, кг/см;  $m_{оп}$  – масса опорной плиты;  $h_1$  – ступенчатое изменение переменной массы плоского материала.

Учитывая сложность общего аналитического решения задачи, воспользуемся рядом Тейлора.

Будем предполагать, что отклонение  $m_1$  неравномерно распределенной массы относительно  $m_0$  будет достаточно мало. Тогда, разложив в ряду Тейлора линейную часть  $1/m$  вокруг участка *B* (см. рис. 1), где  $m_1=0$ , запишем уравнение продольного движения в следующем виде:

$$\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} + 2\omega r \frac{\partial^2 x}{\partial y \partial t} + (\omega r)^2 \frac{\partial^2 x}{\partial y^2} = \frac{(P_{об} + T_{ц} - G_{ц})}{m_{им} + m_{оп} + m_{ц}} \left( 1 - \frac{m_{па}}{m_{им} + m_{оп} + m_{ц}} \sin \left( \frac{2\pi}{h_1} (y - \omega r t) \right) \right) \frac{\partial^2 x}{\partial y^2}. \quad (1)$$

Запишем следующие начальные и граничные условия для полученного уравнения (1) в частных производных:

$$\begin{cases} x(0, t) = 0 \\ x(h, t) = 0 \end{cases}. \quad (2)$$

Далее по методу Галеркина рассмотрим задачу преобладания малых колебаний:

$$\ddot{f} \sin \left( \frac{\pi y}{h} \right) + \frac{2\omega r}{h} \dot{f} \cos \left( \frac{\pi y}{h} \right) + \left( \frac{\pi}{h} \right)^2 \left( \frac{(P_{об} + T_{ц} - G_{ц})}{m_{им} + m_{оп} + m_{ц}} \left( 1 - \frac{m_{па}}{m_{им} + m_{оп} + m_{ц}} \sin \left( \frac{2\pi}{h_1} (y - \omega r_3 t) \right) \right) - \omega^2 r_3^2 \right) \times f \sin \left( \frac{\pi y}{h} \right) = 0 \quad (4)$$

Для решения дифференциального уравнения (4) построим следующую систему

$$x = f(t) \sin \frac{\pi y}{h}. \quad (3)$$

Функция аппроксимации (3) удовлетворяет граничным условиям (2). Затем, подставляя соотношение (3) в уравнение движения (1), запишем простое дифференциальное уравнение второго порядка для функции  $f(t)$ :

дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{2\omega r}{h} \dot{f} = 0 \\ \ddot{f} + \left( \frac{\pi}{h} \right)^2 \left( \frac{(P_{об} + T_{ц} - G_{ц})}{m_{им} + m_{оп} + m_{ц}} \left( 1 - \frac{m_{па}}{m_{им} + m_{оп} + m_{ц}} \sin \left( \frac{2\pi}{h_1} (y - \omega r_3 t) \right) \right) - \omega^2 r_3^2 \right) f = 0 \end{cases} \quad (5)$$

Первое уравнение системы уравнений (5) удовлетворяет уравнению (1).

Решим второе уравнение системы (5):

$$\ddot{f} + \left( \frac{\pi}{h} \right)^2 \left( \frac{(P_{об} + T_{ц} - G_{ц})}{m_{им} + m_{оп} + m_{ц}} \left( 1 - \frac{m_{па}}{m_{им} + m_{оп} + m_{ц}} \left( a_{11} \cos \frac{2\pi \omega r_3 t}{h_1} - a_{12} \sin \frac{2\pi \omega r_3 t}{h_1} \right) \right) - \omega^2 r_3^2 \right) f = 0. \quad (6)$$

Здесь  $a_{11} = \frac{h_1^2}{\pi^2 \omega^2 r_3^2} \int_0^h \sin \frac{2\pi y}{h_1} \sin^2 \frac{\pi y}{h} dy = -\frac{h_1^2}{\pi^2 \omega^2 r_3^2} \frac{h_1}{4\pi} \frac{h_1^2}{h^2 - h_1^2} \left( 1 - \cos \frac{2\pi h}{h_1} \right);$

$$a_{12} = \frac{h_1^2}{\pi^2 \omega^2 r_3^2} \int_0^h \cos \frac{2\pi y}{h_1} \sin^2 \frac{\pi y}{h} dy = -\frac{h_1^2}{\pi^2 \omega^2 r_3^2} \frac{h_1^2}{4\pi(h - h_1)} \sin \frac{2\pi h}{h_1}$$

Запишем полученное уравнение в следующем виде:

$$b = \frac{(P_{об} + T_{ц} - G_{ц})m_{па}}{(m_{им} + m_{оп} + m_{ц})^2} \left( \frac{\pi}{h} \right)^2 \sqrt{a_{11}^2 + a_{12}^2},$$

$$\ddot{f} + \left( a - b \sin \left( \frac{2\pi \omega r_3 t}{h_1} + \beta \right) \right) f = 0. \quad (7)$$

$$\beta = \arctg \left( \frac{a_{11}}{a_{12}} \right).$$

Здесь  $a = \left( \frac{\pi}{h} \right)^2 \left( \frac{(P_{об} + T_{ц} - G_{ц})}{m_{им} + m_{оп} + m_{ц}} - \omega^2 r_3^2 \right),$

Далее введем некоторую замену и запишем следующее уравнение:

$$\frac{2\pi\omega_3 t}{h_1} = 2\theta - \frac{\pi}{2} - \beta. \quad (8)$$

После замены составляем уравнение Матье [7]:

$$\ddot{f} + (a + 2q \cos 2\theta)f = 0. \quad (9)$$

Здесь  $2q = b$ .

Пользуясь уравнением (8), в графической программе Maple 18 задаем необходимые значения технической системы:  $h_1=0,3$  м,  $\omega=0,0029$  рад/с,  $\beta=0,025$  рад и строим график (рис. 2).

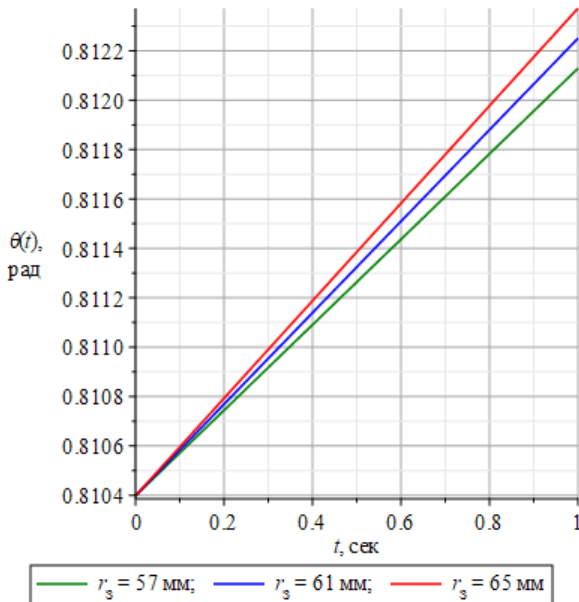


Рис. 2

Из графика видно, что для обеспечения малых значений функции угла  $\theta(t)$  необходимо задавать малые значения радиусов звездочек  $r_3$  транспортирующего устройства. Далее будем решать задачу при среднем значении  $r_3=57$  мм.

Тогда решение уравнения (9) запишем в следующем виде:

$$f(t) = C_1 \text{MathieuC}(a, -q, \theta(t)) + C_2 \text{MathieuS}(a, -q, \theta(t)),$$

где  $\text{MathieuC}$  – косинус Матье;  $\text{MathieuS}$  – синус Матье;  $C_1$  и  $C_2$  являются постоянными коэффициентами дифференцирова-

ния Матье и определяются следующим образом [7]:

$$C_1 = \frac{\text{MathieuC}(\text{MathieuA}(n, q), q, y)}{\text{MathieuCE}(n, q, y)},$$

$$C_2 = \frac{\text{MathieuS}(\text{MathieuB}(n, q), q, y)}{\text{MathieuSE}(n, q, y)}.$$

Используя уравнение (9), построим следующий график (рис. 3) при заданных значениях транспортирующего устройства:  $h_1=0,3$  м,  $h=1$  м,  $T_{ц}=300$  Н,  $P_{общ}=800$  Н,  $v=0,17$  м/с,  $m_{па}=0,2$  кг/см,  $m_{пм}=0,17$  кг/см,  $m_{оп}=0,67$  кг/см,  $m_{ц}=5,7$  кг/см.

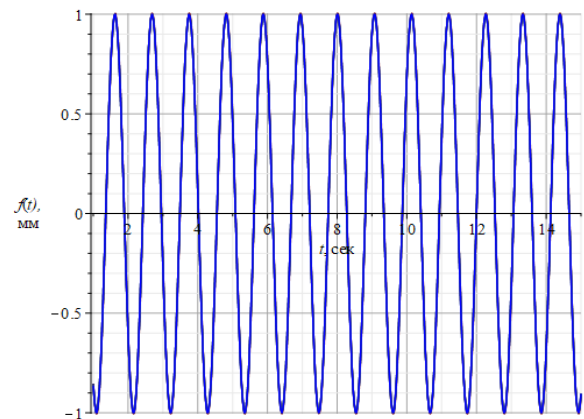


Рис. 3

График представляет собой продольные колебания, влияющие на рассмотренную нами техническую систему – цепное транспортирующее устройство валковой технологической машины. По графику видно, что при перемещении плоского материала с неравномерной поверхностью по транспортирующей цепи относительно оси  $x$  возникают малые колебания с амплитудой до 1 мм.

В соответствии с принципом Даламбера в правой части уравнения записана векторная сумма внешних сил, действующих на рабочие валы 6, 7. Помимо сил веса валов и сил натяжения цепей, на валы действуют силы давления, которые направлены вдоль оси  $OX$ . Поскольку мы сформулировали уравнение движения вдоль оси  $OY$ , то в уравнении были учтены и записаны только силы, направленные вдоль оси  $OY$ . Силы давления рабочих валов не участвуют в уравнении.

Для технического решения нами предлагается закрепление по бокам транспортной опорной плиты 4 опорных роликов 8, которые будут передвигаться по направляющим дорожкам 9, закрепленным на раме 13 валковой машины, и обеспечат устойчивое положение опорной плиты 4 во время обработки (рис. 4).

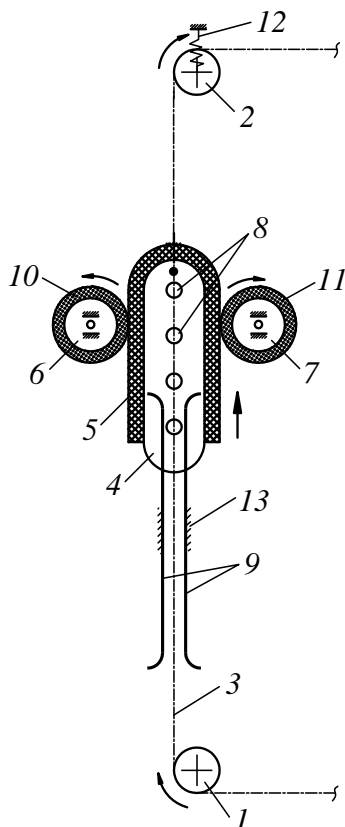


Рис. 4

В конструкции валковой машины для снижения удара рабочие валы 6, 7 могут быть покрыты упругим материалом 10, 11 (например, резиной, сукном), а ведущие звездочки 2 могут быть снабжены пружинами 12.

На основе изменений технических требований к цепному транспортирующему устройству можно будет задавать его кинематические и геометрические параметры.

## ВЫВОДЫ

1. Получено уравнение движения плоского материала с переменной массой. Значения коэффициентов  $a$ ,  $q$ ,  $\theta$  уравнения зависят от кинематических параметров транспортной цепи, опорной плиты и плоского материала, а также геометриче-

ских параметров рассмотренной технической системы.

2. Установлено, что для снижения амплитуды колебаний необходимо и достаточно снижать линейную скорость тяговой цепи транспортирующего устройства.

3. Предложено техническое решение, которое обеспечит устойчивое положение опорной плиты во время обработки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Койайдаров Б.А., Байешов Б.Т., Койайдаров А.А. Многофункциональное перегрузочное устройство для складских работ // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2020. № 3 (387). С. 127...131.
2. Лазуткина Н.А. Исследование продольной динамики цепного конвейера // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 5.
3. Крюков В.А. Оптимизация динамических процессов в цепных транспортных конвейерах автоматических роторно-конвейерных линий // Известия ТулГУ. Технические науки. 2011. №6-2.
4. Ногаев К.А., Кыдырбаева С.Ж. Моделирование кинематических параметров движения тягового органа цепных конвейеров // Интернаука. 2020. № 19-2(148). С. 72...75.
5. Цыпкина В.В. и др. Разработка математической модели движения транспортера в линии по переработке кабельных отходов // Universum: технические науки: электрон. науч. журн. 2022. 4(97).
6. Койайдаров Б.А., Койайдаров А.А., Джакиев Д.К. Регулируемый механический привод для технологических машин // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2020. № 3 (387). С. 132...135.
7. Левитский Н.И. Колебания в механизмах: учеб. пособие для вузов. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. 336 с.
8. Еришов С.В., Калинин Е.Н. Моделирование процесса отжима волокнистых материалов в валковой паре с динамическим режимом нагружения // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы: сб. материалов XXIII Междунар. науч.-практ. форума «SMARTEX-2020». Иваново: ИВГПУ, 2020. С. 277...281. – DOI 10.47367/2413-6514\_2020\_1\_277.
9. Еришов С.В., Кожевников С.О., Никифорова Е.Н., Кузнецов В.Б., Калинин Е.Н. Анализ влияния переходных процессов на обезвоживание волокнистой структуры распределенным давлением в динамическом режиме нагружения // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2020. № 5 (389). С. 85...91.

## REFERENCES

1. Koyaidarov B.A., Bayeshov B.T., Koyaidarov A.A. Multifunctional reloading device for storage

operations // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. 2020. No. 3 (387). P. 127...131.

2. *Lazutkina N.A.* Study of the longitudinal dynamics of a chain conveyor // *Modern problems of science and education*. 2013. No. 5.

3. *Kryukov V.A.* Optimization of dynamic processes in chain transport conveyors of automatic rotary conveyor lines // *Izvestiya TulGU. Technical science*. 2011. No. 6-2.

4. *Nogaev K.A., Kydyrbaeva S.Zh.* Modeling of the kinematic parameters of the movement of the traction body of chain conveyors // *Internauka*. 2020. No. 19-2(148). P. 72...75.

5. *Tsyapkina V.V. et al.* Development of a mathematical model for the movement of a conveyor in a line for the processing of cable waste // *Universum: technical sciences: electron. Scientific magazine*. 2022. 4(97).

6. *Koyaidarov B.A., Koyaidarov A.A., and Dzhakiyaev D.K.* Adjustable mechanical drive for technological machines // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. 2020. No. 3 (387). P. 132...135.

7. *Levitsky N.I.* Oscillations in mechanisms: Teaching aid for technical universities. M.: Nauka. Phys.-Math. Lit., 1988. 336 p.

8. *Yershov S.V., Kalinin Ye.N.* Modeling the dewatering process of fibrous materials in rolls pare with pulse loading // *Fizika voloknistykh materialov: struktura, svoystva, naukoemkiye tekhnologii i materialy (SMARTEX-2020)*. Ivanovo: IVGPU, 2020. S. 277...281. – DOI 10.47367/2413-6514\_2020\_1\_277.

9. *Yershov S.V., Kozhevnikov S.O., Nikiforova Ye.N., Kuznetsov V.B., Kalinin Ye.N.* Analysis of the influence of transition processes on the dewatering of a fibrous structure by distributed pressure in dynamic loading mode // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. 2020. № 5 (389). S. 85...91.

Рекомендована семинаром лаборатории «Теория механизмов и машин» Института механики и сейсмостойкости сооружений им. М.Т. Уразбаева Академии наук Республики Узбекистан. Поступила 18.08.23.