

ГЕОТЕХНІЧНА І ГІРНИЧА МЕХАНІКА, МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 531.3+621.313.32

**Б.В. Виноградов, д-р техн. наук, проф.,
А.В. Христенко**

Государственное высшее учебное заведение „Украинский
государственный химико-технологический университет“,
г. Днепропетровск, Украина, e-mail: bvvin@mail.ru

УПРУГИЕ МУФТЫ С РЕЗИНОКОРДНЫМИ ОБОЛОЧКАМИ В ДВУХДВИГАТЕЛЬНЫХ ПРИВОДАХ БАРАБАННЫХ МЕЛЬНИЦ

**B.V. Vinogradov, Dr. Sci. (Tech.), Professor.,
A.V. Khristenko**

State Higher Educational Institution “Ukrainian State University of Chemical Technology”, Dnipropetrovsk, Ukraine, e-mail: bvvin@mail.ru

FLEXIBLE COUPLINGS WITH RUBBER-CORD SHELLS IN DUAL PINION MILL DRIVES

Цель. Оценка эффективности применения муфт с резинордными оболочками для распределения нагрузки между линиями передач в двухдвигательных приводах барабанных мельниц с учетом их действительных характеристик.

Методика. Представлена динамическая и статическая упругая характеристика муфт и привода, содержащего муфту с резинордными оболочками. Анализ эффективности применения муфт, содержащих резинордные оболочки, выполнен на базе математических моделей, описывающих нагрузки в линиях передач каждого двигателя в зависимости от угла рассогласования роторов двигателей и параметров гидравлической системы муфт.

Результаты. Представлены схемы и характеристики муфт, содержащих резинордные оболочки. Показано, что данные муфты, при использовании выпускаемых в настоящее время резинордных оболочек, позволяют передавать крутящий момент до 8000 кН·м, что охватывает двухдвигательные приводы общей мощностью до 10000 кВт.

Рассмотрены приводы, в которых муфты с резинордными оболочками, заполненными жидкостью, и сообщенные с гидропневматическим аккумулятором для случаев, когда гидравлические системы резинордных оболочек независимы и сообщены общим трубопроводом. Разработана методика количественной оценки неравномерности распределения нагрузки между двигателями.

Научная новизна. Установлены закономерности распределения статических нагрузок в двухдвигательных синхронных приводах барабанных мельниц, содержащих упругие муфты с резинордными оболочками.

Практическая значимость. Показано, что применение упругих муфт с резинордными оболочками без гидравлической связи между муфтами способствует более равномерному распределению нагрузки за счет повышенной податливости механической системы.

Ключевые слова: барабанная мельница, двухдвигательный привод, резинордная оболочка, муфты

Постановка проблемы. В крупногабаритных барабанных мельницах большой единичной мощности, передачу мощности к барабану осуществляют двумя линиями передач. При этом в синхронных приводах возникает проблема равномерного распределения нагрузки между двигателями. В настоящее время разработан способ выравнивания нагрузки в двухдвигательных приводах, оборудованных частотными преобразователями, где за счет автоматического регулирования один из двигателей поддерживает одинаковые крутящие моменты в каждой линии передач [1]. На выбор типа привода существенно влияют капитальные затраты и эксплуатационные расходы [2]. Поэтому, представляют интерес приводы с альтернативными способами выравни-

вания нагрузки, в частности, приводы, оснащенные упругими муфтами с резинордными оболочками (РКО).

Анализ последних исследований и публикаций. В работах рассмотрены факторы, влияющие на неравномерность распределения нагрузки в двухдвигательных синхронных приводах, для выравнивания нагрузки предложены муфты, содержащие резинордные оболочки, заполненные жидкостью или газом и сообщенные между собой общим трубопроводом, позволяющие выравнивать нагрузку между двигателями.

Целью работы является оценка эффективности применения муфт с резинордными оболочками для распределения нагрузки между линиями передач в двухдвигательных приводах барабанных мельниц.

Изложение основного материала. На рис. 1 представлена схема двухдвигательного привода барабанной мельницы, с муфтами, содержащими резинокордные оболочки.

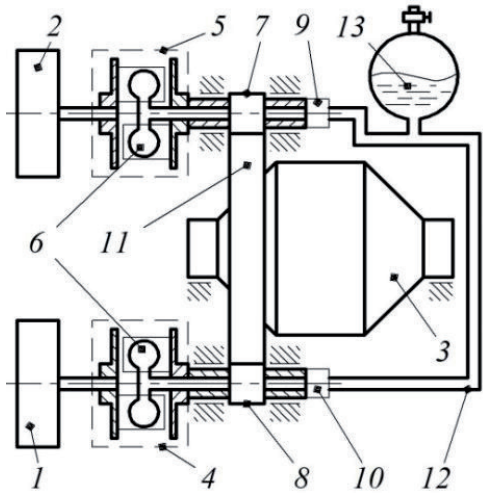


Рис. 1. Схема двухдвигательного привода барабанной мельницы с муфтами, содержащими резинокордные оболочки: 1, 2 – синхронные двигатели; 3 – барабан мельницы; 4, 5 – упругие муфты, содержащие резинокордные оболочки; 6 – резинокордные оболочки; 7, 8 – приводные шестерни; 9, 10 – гидропневматические устройства; 11 – венцовая шестерня барабана; 12 – магистральный трубопровод; 13 – гидропневматический аккумулятор

В настоящее время разработаны и производятся резинокордные оболочки грузоподъемностью от 3432 до 166713 Н, позволяющие разрабатывать муфты с широким диапазоном упругих характеристик.

В качестве примера рассмотрим муфту, содержащую резинокордные оболочки НЯ-300 со следующими параметрами: рабочая высота (без арматуры) – 172 мм; максимально возможный прогиб – ±40 мм; диаметр в рабочем положении – 670 мм; рабочее внутреннее давление – 0,6 МПа; грузоподъемность – 17000 кг.

На рис. 2 показаны схемы муфт, оснащенных резинокордными оболочками типа НЯ-300. Расчеты показывают, что такой муфтой можно передавать номинальный крутящий момент до $M_{кр}=814$ кН·м. При этом, жесткость муфты можно варьировать посредством последовательного соединения оболочек, а также подключением их к дополнительному объему газа.

Для повышения диссипативных свойств муфты, РКО можно заполнять жидкостью и соединять их посредством дросселя с гидропневматическим аккумулятором. При этом, упруговязкая характеристика муфты описывается следующим выражением

$$M(\alpha) = n_B R_M S(\alpha) \left[(p_a + p_{uo}) \times \left(\frac{V_{zo}}{R_M} - \int_0^\alpha S(\alpha) d\alpha \right) - p_a + \frac{\rho (S(\alpha))^2 R_M^2 \left(\frac{d\alpha}{dt} \right)^2}{2\mu_l^2 f^2} \right], \quad (1)$$

где α – угол закручивания муфты; $M(\alpha)$ – момент, воспринимаемый муфтой с резинокордными оболочками; $S(\alpha)$, S_0 – эффективная и начальная площадь резинокордной оболочки при номинальной нагрузке; V_{zo} – объем газа в пневматической полости гидропневматического аккумулятора; p_a , p_{uo} – соответственно, атмосферное и избыточное давление в жидкости и газе; R_M – радиус установки РКО в муфте; ρ – плотность жидкости; μ_l – коэффициент расхода жидкости через отверстие дроссельной шайбы; f – площадь проходного сечения дросселя; n – коэффициент политропы; n_B – количество резинокордных оболочек в одной муфте (или последовательно соединенных блоков РКО).

Статическая характеристика муфты описывается выражением

$$M(\alpha) = n_B R_M S(\alpha) \times \left[\frac{(p_a + p_{uo}) \cdot \left(\frac{V_{zo}}{R_M} \right)}{\left(\frac{V_{zo}}{R_M} - \int_0^\alpha S(\alpha) d\alpha \right)} - p_a \right] \quad (2)$$

и представлена в виде графика на рис. 3.

Рассмотрим эффективность выравнивания нагрузки в приводах, содержащих муфты с резинокордными оболочками.

Крутящий момент, воспринимаемый линией передач каждого двигателя, определяется выражением

$$M_1 = n_B R_M S(\alpha_{13}) p_1; \quad M_2 = n_B R_M S(\alpha_{23}) p_2, \quad (3)$$

где p_1, p_2 – избыточные давления в РКО, описываемые следующими выражениями

$$p_1 = \frac{(p_a + p_{uo}) \cdot \left(\frac{V_{zo}}{R_M} \right)}{\left(\frac{V_{zo}}{R_M} - \int_0^{\alpha_{13}} S(\alpha_{13}) d\alpha_{13} \right)} - p_a;$$

$$p_2 = \frac{(p_a + p_{uo}) \cdot \left(\frac{V_{zo}}{R_M} \right)}{\left(\frac{V_{zo}}{R_M} - \int_0^{\alpha_{23}} S(\alpha_{23}) d\alpha_{23} \right)} - p_a, \quad (4)$$

где $S(\alpha_{13})$, $S(\alpha_{23})$ – эффективные площади резинокордных оболочек. В общем случае, эффективная площадь резинокордной оболочки является функцией её деформации, определяется экспериментально и может быть представлена линейной аппроксимацией [3]

$$S(\alpha_{13}) = S_0(1 + k_a \cdot \alpha_{13}); \quad S(\alpha_{23}) = S_0(1 + k_a \cdot \alpha_{23}), \quad (5)$$

где k_a – коэффициент аппроксимации, учитывающий влияние объема газа в системе на изменении эффективной площади РКО.

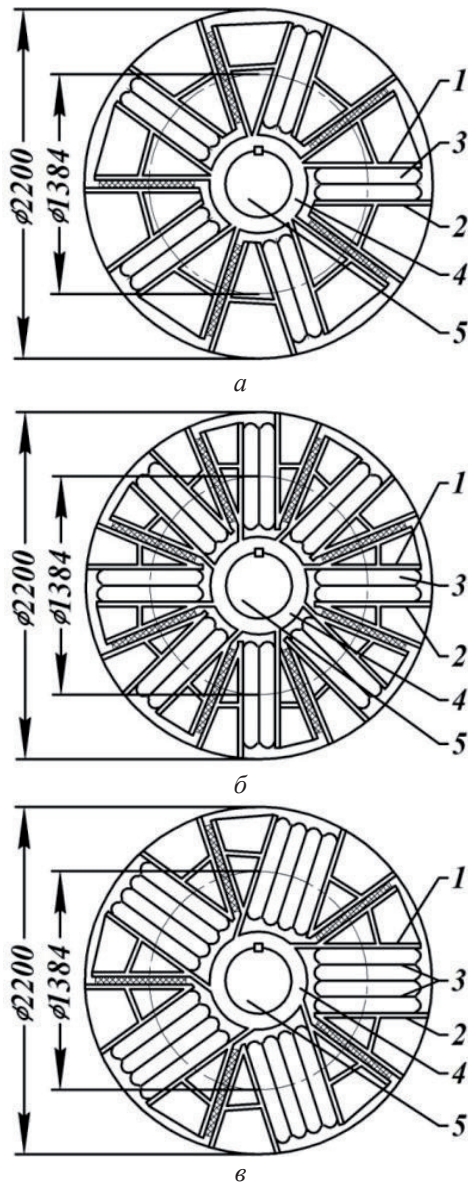


Рис. 2. Упругие муфты с резинокордными оболочками: а, в – крутящий момент $M_{кр}=509$ кН·м, крутильная жесткость $c=4,7 \cdot 10^6$ кН·м, $c=2,35 \cdot 10^6$ кН·м соответственно; б – крутящий момент $M_{кр}=814$ кН·м, крутильная жесткость $c=7,52 \cdot 10^6$ кН·м; 1, 2 – щеки полумуфты; 3 – резинокордная оболочка НЯ-300; 4 – ступица; 5 – вал

Из выражений (3–5) следует, что при независимых гидравлических системах муфт при рассогласовании роторов двигателей давления в РКО будут разные и, следовательно, нагрузка между двигателями распределится неравномерно.

Сообщение оболочек муфт общей гидравлической связью обеспечивает равенство давления в системе. При этом, из выражений (4, 5) вытекает, что, при разных величинах эффективной площади оболочек, абсолютно равномерного распределения нагрузки между двигателями обеспечить невозможно. С другой стороны, при постоянных значениях эффективных площадей $S(\alpha_{13})=S(\alpha_{23})=S_0$, достигается абсолютно равномерное распре-

деление нагрузки, равное $0,5M_c$. Последнее можно достигнуть применением соответствующих резинокордных оболочек и крепежной арматуры. Кроме того, существуют резинокордные оболочки, имеющие характеристику, близкую к линейной [4], что также решает проблему равномерного распределения нагрузки.

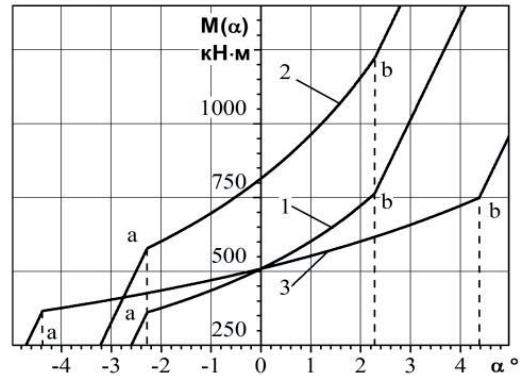


Рис. 3. Статическая упругая характеристика привода с муфтой, содержащей резинокордные оболочки: 1, 2, 3 – упругие характеристики муфт, представленных на рис. 2, а, б, в соответственно; ab – рабочий ход муфт; α – угол закручивания муфты; $M(\alpha)$ – момент, воспринимаемый муфтой

Для количественной оценки неравномерности распределения нагрузки в двухдвигательных приводах, содержащих муфты с резинокордными оболочками без и с гидравлической связью между ними, составим следующие уравнения равновесия

$$\begin{cases} M_1 + M_2 = M_c, \\ \alpha_{13} - \alpha_{23} = \Delta\varphi \end{cases} \quad (6)$$

где M_1, M_2 – упругие крутящие моменты, воспринимаемые муфтами первой и второй линии передач; M_c – момент сопротивления, приложенный к барабану; $\Delta\varphi$ – угол рассогласования роторов – угол, на который необходимо повернуть ротор одного двигателя относительно другого, чтобы нагрузка между ними распределилась равномерно.

Уравнение равновесия для двухдвигательных приводов при независимых гидравлических системах муфт, получим, подставляя выражение крутящих моментов M_1, M_2 из (3) в выражения (6), получим

$$\begin{cases} n_B R_i \left[S(\alpha_{13}) \left(p_a + p_{uo} \right) \left(\frac{\frac{V_{\bar{a}i}}{R_i}}{\frac{V_{\bar{a}i}}{R_i} - \int_0^{\alpha_{13}} S(\alpha) d\alpha} \right)^n - p_a \right] + \\ + S(\alpha_{23}) \left[\left(p_a + p_{uo} \right) \left(\frac{\frac{V_{\bar{a}i}}{R_i}}{\frac{V_{\bar{a}i}}{R_i} - \int_0^{\alpha_{23}} S(\alpha) d\alpha} \right)^n - p_a \right] = \\ = M_c; \\ \alpha_{13} - \alpha_{23} = \Delta\varphi. \end{cases} \quad (7)$$

Решая уравнения (7) при заданном угле рассогласования $\Delta\varphi$, определяем углы закручивания муфт α_{13} , α_{23} . Крутящие моменты на валах каждого двигателя, при заданном рассогласовании $\Delta\varphi$, определим из выражения (3) с учетом соответствующих углов закручивания. Неравномерность распределения нагрузок будем учитывать коэффициентом k_H , показывающим во сколько раз крутящий момент в более нагруженной линии передач больше номинального, равного $0,5M_C$.

$$k_H = \frac{M_{max}}{0,5M_N}$$

где M_{max} – больший из крутящих моментов M_1 , M_2 , воспринимаемых линиями передач двигателей.

В случае, когда РКО муфт сообщены между собою, в гидропневматической системе обеих муфт устанавливается одинаковое рабочее давление

$$p = \frac{(p_a + p_{uo}) \cdot \left(\frac{V_{zo}}{R_M}\right)^n}{\left(\frac{V_{zo}}{R_M} - \int_0^{\alpha_{13}} S(\alpha)d\alpha - \int_0^{\alpha_{23}} S(\alpha)d\alpha\right)^n} - p_a.$$

Тогда, уравнения (6) примут вид

$$\left\{ \begin{aligned} & n_B R_i (S(\alpha_{13}) + S(\alpha_{23})) \times \\ & \times \left[(p_a + p_{uo}) \frac{\frac{V_{ai}}{R_i}}{\left(\frac{V_{ai}}{R_i} - \int_0^{\alpha_{13}} S(\alpha)d\alpha - \int_0^{\alpha_{23}} S(\alpha)d\alpha\right)} - p_a \right]^n = \\ & M_C; \\ & \alpha_{13} - \alpha_{23} = \Delta\varphi. \end{aligned} \right.$$

На рис. 5 приведены коэффициенты неравномерности распределения нагрузки между линиями передач двухдвигательного привода, содержащего муфты с резинокордными оболочками, в зависимости от линейной величины рассогласования роторов Δx , приведенной к радиусу установки РКО в муфтах ($\Delta x = \Delta\varphi \cdot R_M$).

Выводы.

1. Разработана методика определения неравномерности распределения нагрузки между линиями передач двухдвигательного синхронного привода.

2. Показано, что применение упругих муфт с резинокордными оболочками без гидравлической связи способствует более равномерному распределению нагрузки между двигателями за счет снижения жёсткости механических передач. При этом, максимальная величина коэффициента неравномерности распределения нагрузки между двигателями k_H , показывающего во сколько раз крутящий момент в более нагруженной линии передач больше номинального, равного $0,5M_C$, где M_C – суммарный момент сопротивления, равен $k_H = 0.5$. Сообщение муфт общим трубопроводом позволяет ограничить величину коэффициента неравномерности распределения нагрузки до величины менее $k_H = 0.5$ даже в случае

возникновения рассогласования роторов в процессе эксплуатации мельницы.

3. Для абсолютного равномерного распределения нагрузки необходимо использовать резинокордные оболочки и крепежную арматуру, обеспечивающие постоянство их эффективной площади.

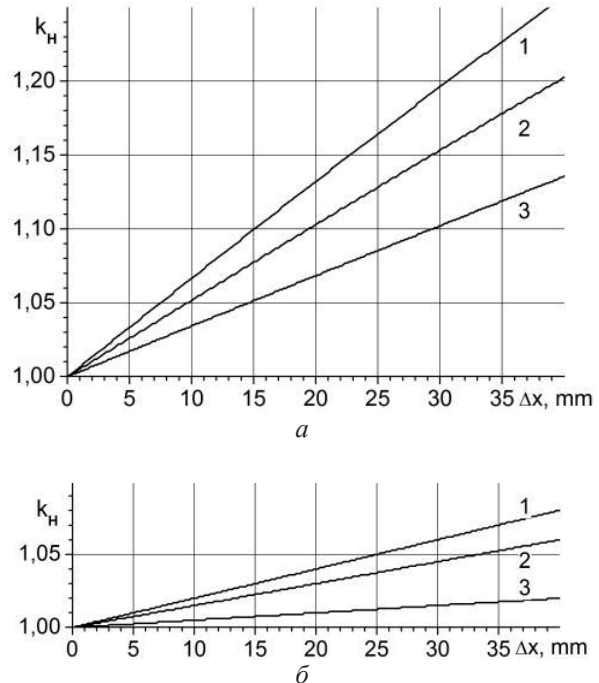


Рис. 5. Коэффициент неравномерности распределения нагрузки между линиями передач двухдвигательного привода: а, б – независимая и сообщенная общим трубопроводом гидравлическая система муфт; 1, 2, 3 – объем газа в пневматической полости гидропневматического аккумулятора 185, 235 и 295 л соответственно; Δx – линейная величина рассогласования роторов, приведенная к радиусу установки РКО в муфтах ($\Delta x = \Delta\varphi \cdot R_M$)

Список литературы / References

1. Vijfeijken, M. van de, Filidore, A., Walbert, M. and Marks, A. *Copper Mountain: Overview On The Grinding Mills And Their Dual Pinion Mill Drives*. [pdf]. Available at: [http://www.05.abb.com/global/scot/scot244.nsf/veritydisplay/d43c675f94ad66abc125793d0056168e/\\$file/COPPER%20MOUNTAIN%20-%20OVERVIEW%20ON%20THE%20GRINDING%20MILLS%20AND%20THEIR%20DUAL%20PINION%20MILL%20DRIVES.pdf](http://www.05.abb.com/global/scot/scot244.nsf/veritydisplay/d43c675f94ad66abc125793d0056168e/$file/COPPER%20MOUNTAIN%20-%20OVERVIEW%20ON%20THE%20GRINDING%20MILLS%20AND%20THEIR%20DUAL%20PINION%20MILL%20DRIVES.pdf) [Accessed Oct. 4, 2014].
2. Green, Jack H. and Stroker, John J., 2000. Ball Mill Drive Motor Choices, *Proc. of the IEEE/PCA Cement Industry Technical Conference*, Salt Lake City, UT, May 2000, pp. 39–55.
3. Виноградов Б.В. Гидропневмобаллонная упруговязкая система / Б.В. Виноградов // *Вібрації в техніці та технологіях*. – 2011. – №1(61) – С.15–19.
- Vinogradov, B.V., 2011. Hydropneumoballoon viscoelastic system. *Vibratsii v tekhnitsi i tekhnolohiiakh*, 1(61), pp. 15–19.

4. Годжаев З.А. Исследование характеристик пневматического упругого элемента рукавного типа в зависимости от давления воздуха, хода и формы поршня / З.А. Годжаев, А.А. Поповский, С.В. Гончаренко // Вісник СевНТУ: зб. наук. праць – Севастополь, 2011. – №120 – С. 306–311.

Godzhaev, Z.A., Popovskiy, A.A. and Goncharenko, S.V. 2011. Research of the dependence of the characteristics of the hose-type air bellows on the air pressure, stroke and shape of the piston. *Visnyk Sev-NTU*, 120, pp. 306–311.

Мета. Оцінка ефективності застосування муфт з гумокордними оболонками для розподілу навантаження між лініями передач у дводвигунових приводах барабанних млинів з урахуванням їх дійсних характеристик.

Методика. Представлена динамічна й статична пружна характеристика муфт і приводу, що містить муфту з гумокордними оболонками. Аналіз ефективності застосування муфт, що містять гумокордні оболонки, виконаний на базі математичних моделей, що описують навантаження в лініях передач кожного двигуна в залежності від кута неузгодженості роторів двигунів і параметрів гідравлічної системи муфт.

Результати. Представлені схеми та характеристики муфт, що містять гумокордні оболонки. Показано, що дані муфти, при використанні гумокордних оболонок, що випускаються в даний час, дозволяють передавати крутний момент до 8000 кН·м, що охоплює дводвигунові приводи загальною потужністю до 10000 кВт.

Розглянуті приводи, що містять муфти з гумокордними оболонками, заповненими рідиною, і сполучені з гідропневматичним акумулятором для випадків, коли гідравлічні системи гумокордних оболонок незалежні та сполучені загальним трубопроводом. Розроблена методика кількісної оцінки нерівномірності розподілу навантаження між двигунами.

Наукова новизна. Встановлені закономірності розподілу статичних навантажень у дводвигунових синхронних приводах барабанних млинів, що містять пружні муфти з гумокордними оболонками.

Практична значимість. Показано, що застосування пружних муфт з гумокордними оболонками без гідрав-

лічного зв'язку між муфтами сприяє більш рівномірному розподілу навантаження за рахунок підвищеної податливості механічної системи.

Ключові слова: барабанний млин, дводвигуновий привід, гумокордна оболонка, муфта

Purpose. To estimate the effectiveness of the coupling with rubber-cord shells for evenly distributed load between the transmission lines in the twin-motor drives of tumbling mills.

Methodology. We gave the dynamic and static elastic characteristics of clutches and drive containing the coupling with rubber-cord shells. The performance of couplings containing rubber-cord shell was analyzed based on the mathematical models describing the load transmission lines of each engine depending on the displacement angle of the motor and hydraulic couplings parameters.

Findings. The schemes and characteristics of clutches containing rubber-cord shell are presented. It was proved that these couplings, in case of use of the rubber-cord shells available at the market, allow transmitting the torque of up to 8,000 kN · m, which satisfies the twin-engine drives with a total capacity up to 10,000 kW.

We considered the drives containing the coupling with rubber-cord shells filled with a liquid and connected with hydropneumatic accumulator for the cases when the hydraulic system of rubber-cord shells is independent and connected by the common pipeline. The technique of quantitative evaluation of the uneven distribution of load between the engines was developed.

Originality. The regularities of distribution of static loads in synchronous twin-drum drive mills containing elastic couplings with rubber-cord shells

Practical value. It was proved that the use of flexible couplings with rubber-cord shells without hydraulic connection between the couplings results in a more even load distribution due to the increased compliance of the mechanical system.

Keywords: drum mill, twin-engine drive, rubber-shell coupling

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук В.І. Самусею. Дата надходження рукопису 27.11.14.