

УДК 531.391+539.4:622.673

Д.Л. Колосов (канд. техн. наук, доц.)

Національний гірничий університет, м. Дніпропетровськ

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ГУМОТРОСОВОГО КАНАТА ПРИ СКЛАДНІЙ КОНТАКТНІЙ ПОВЕРХНІ З РОБОЧИМ ОРГАНОМ ПІДЙОМНОЇ МАШИНИ

Досліджено напружений стан гумотросового каната з виступами при його взаємодії з робочим органом підйомної машини. Доведено, що передача сил від шківів до каната виступами призводить до суттєвого зростання екстремальних сил розтягу тросів. Зменшення цього негативного чинника можливо шляхом застосування прямокутної форми перерізу канавки та виступу або забезпеченням зазору поміж ними.

Ключові слова: підйомна машина, плоский гумотросовий канат з виступами, шків тертя, бобіна, сили тертя, напружений стан, розподіл напружень

Проблема та її зв'язок з науковими або практичними задачами. Гумотросові канати мають ряд переваг перед звичайними круглими. Плоский канат в процесі роботи підйомної машини може зсуватися з осі її шківів або бобіни. Усунення такого недоліку становить *актуальну науково-технічну задачу*. Для унеможливлення зсуву доцільно на шківі 1 (рис. 1) виконати кільцеві канавки 2, а на канаті 3 – виступи 4 незмінного перерізу, розташувати їх вздовж каната.

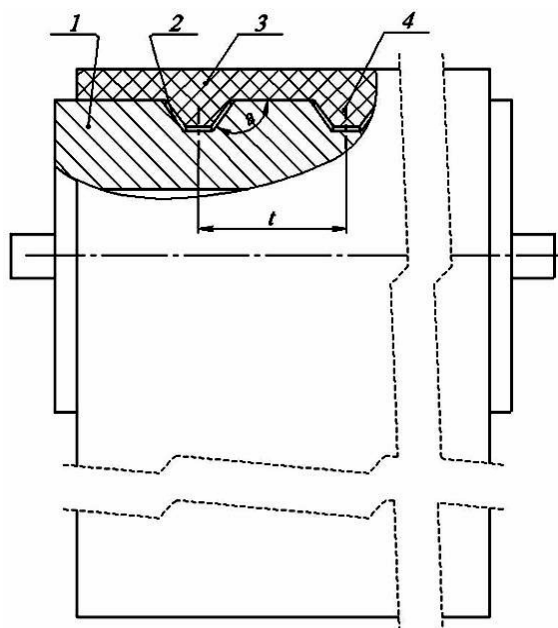


Рис. 1 – Схема взаємодії каната з виступами та шківів

Напружений стан плоского каната незмінного перерізу, намотаного в декілька шарів досліджено в роботі [2]. Роботи

[3-7] присвячені встановленню напруженого стану ступінчастого гумотросового каната, в якому зміна форми його перерізу локально впливає на його напружений стан.

На приводному шківі або бобіні поміж виступом каната та канадкою на робочому органі підйомної машини можуть виникати сили тертя, які змінюють напружений стан каната. В загальному випадку вони додаються до сил тертя поміж робочим органом підйомної машини та канатом. Співвідношення сил тертя поміж виступом та плоским канатом практично випадкове, бо залежить від ряду випадкових параметрів, таких як, наприклад, точність виготовлення канавок та виступів. З метою дослідження лише впливу сил тертя поміж виступом на канаті та канадкою на шківі (бобіні) будемо вважати, що сили тертя діють лише поміж вказаними елементами. Визначимо напружений стан каната з виступом, зумовлений дією вказаних сил тертя.

Основний зміст роботи та результати. Для цього в системі рівнянь рівноваги тросів в канаті [1] врахуємо розподілені дотичні сили інтенсивністю T_i

$$\begin{cases} \frac{d^2 u_1}{dx^2} EF + \frac{Gdk_G}{h} (-u_1 + u_2) = T_1; \\ \frac{d^2 u_i}{dx^2} EF + \frac{Gdk_G}{h} (u_{i-1} - 2u_i + u_{i+1}) = T_i; \\ \frac{d^2 u_N}{dx^2} EF + \frac{Gdk_G}{h} (u_{N-1} - u_N) = T_N, \end{cases} \quad (1)$$

де N – кількість тросів в канаті; EF – приведена жорсткість тросів на розтяг; G – модуль зсуву гуми; d – діаметр тросів; h – відстань поміж тросами; T_i – розподілена по довжині сила тертя, прикладена до i -того тросу, $1 < i < N$; k_G – коефіцієнт, що враховує вплив форми гумового міжтросового елемента на його опір зсуву.

Відповідно до прийнятої умови, що сили тертя прикладені лише до виступу на канаті, ці сили тертя – розривна функція, залежна від номера троса та від координати x . Наявність розривної функції ускладнює аналітичний розв'язок задачі. Водночас аналітичне рішення задачі дозволяє отримати результати, що відтворюють механізм взаємодії каната з барабаном. Враховуючі останнє та те, що система рівнянь лінійна, розділимо загальну задачу на два етапи. На першому етапі визначимо напружений стан каната, навантаженого силами, прикладеними до тросів на ділянці безмежно малої довжини. На дру-

тому виконаємо інтегрування переміщень, внутрішніх сил розтягу тросів на довжині ділянки навантаження L каната дотичною розподіленою силою. При цьому врахуємо характер прикладеної до каната розподіленої сили.

Прикладення сил тертя не змінює форму каната, тому його деформування одновісне. Виходячи з вказаного розглянемо канат як прямолінійний. Будемо вважати, що до множини тросів K прикладені однакові сили тертя, сума яких дорівнює одиниці. Остання умова введена для зручності аналізу отриманих результатів, оскільки знайдені сили, якими навантажений канат, будуть дорівнювати співвідношенню сил, що прикладені до тросів та середніх навантажень на троси. Нехай до довільних тросів множини K (k_1 та k_2) на відстані s від початку відліку координат прикладене зосереджене навантаження, що дорівнює одиниці (рис. 2). Визначимо напружений стан каната.

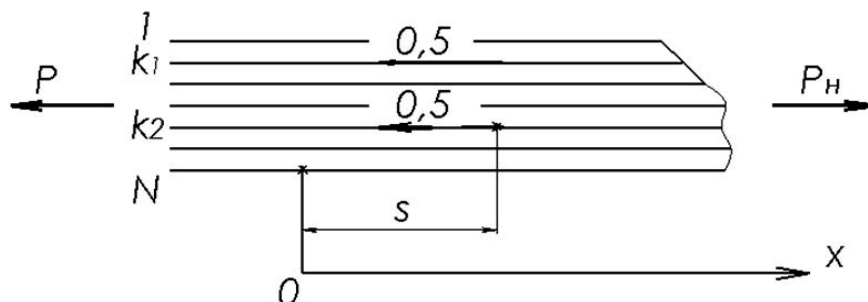


Рис. 2 – Розрахункова схема навантаження каната

Такому навантаженню відповідають наступні граничні умови

$$x \rightarrow -\infty \quad p_i \rightarrow 1, \quad x \rightarrow \infty \quad p_i - p_{i\pm 1} = 0; \quad (2)$$

$$u_i(x = s) - u_i(x = s + \varepsilon) = 0; \quad (3)$$

$$p_i(x = s) - p_i(x = s + \varepsilon) = \begin{cases} 0 (i \notin K), \\ -1 (i \in K), \end{cases} \quad \varepsilon \rightarrow 0, \quad (4)$$

де u_i , p_i – переміщення i -того троса та сила його розтягу.

Умову (4), до якої входить розривна функція, задамо сумою

$$\begin{aligned} & p_i(x = s) - p_i(x = s + \varepsilon) = \\ & = \sum_{m=1}^N \cos\left(\frac{\pi m}{N}\left(i - \frac{1}{2}\right)\right) \sum_{k \in K} \cos\left(\frac{\pi m}{N}\left(k - \frac{1}{2}\right)\right) \frac{2}{Nr} + \frac{1}{N}, \quad \varepsilon \rightarrow 0, \end{aligned} \quad (5)$$

де r – кількість членів множини K .

Перерізом із координатою $x = s$ розділимо канат на дві напівскінченних частини – ліву та праву. В межах кожного з відрізків від-

сутнє зовнішнє навантаження. Відповідно рівновага тросів каната (1) буде описуватися однорідною системою рівнянь на обох відрізках. Враховуючи умови (2) і (3) та прийнявши, що канат в перерізі його збігання з барабана навантажено зусиллям, що дорівнює одиниці, помноженої на кількість тросів в канаті, рішення однорідної системи (1) в переміщеннях отримає вигляд

$$u_i = \begin{cases} -\sum_{m=1}^N \frac{1}{EFN\beta_m r} \times \\ \times \sum_{k < K} \cos\left(\frac{\pi m}{N}\left(k - \frac{1}{2}\right)\right) e^{\beta_m(x-s)} \cos\left(\frac{\pi m}{N}\left(i - \frac{1}{2}\right)\right) + \frac{Px}{EF}, & x < s; \\ -\sum_{m=1}^N \frac{1}{EFN\beta_m r} \times \\ \times \sum_{k < K} \cos\left(\frac{\pi m}{N}\left(k - \frac{1}{2}\right)\right) e^{-\beta_m(x-s)} \cos\left(\frac{\pi m}{N}\left(i - \frac{1}{2}\right)\right) + \frac{x-s}{EFN} + \frac{P}{EF}, & x \geq s, \end{cases}$$

$$\text{де } \beta_m = \sqrt{2 \frac{Gd k_G}{h EF} \left(1 - \cos \frac{\pi m}{N}\right)}.$$

Вказаним значенням переміщень згідно закону Гука, відповідають наступні внутрішні сили

$$P_i = \begin{cases} -\sum_{m=1}^N \frac{1}{N r} \times \\ \times \sum_{k < K} \cos\left(\frac{\pi m}{N}\left(k - \frac{1}{2}\right)\right) e^{\beta_m(x-s)} \cos\left(\frac{\pi m}{N}\left(i - \frac{1}{2}\right)\right) + P, & x < s; \\ \sum_{m=1}^N \frac{1}{N r} \times \\ \times \sum_{k < K} \cos\left(\frac{\pi m}{N}\left(k - \frac{1}{2}\right)\right) e^{-\beta_m(x-s)} \cos\left(\frac{\pi m}{N}\left(i - \frac{1}{2}\right)\right) + \frac{1}{N} + P, & x \geq s \end{cases}$$

$$\text{та дотичні напруження } \tau_i = \frac{G}{h} (u_{i+1} - u_i).$$

Таким чином, перший етап розв'язання поставленої задачі здійснено. Переміщення й внутрішні зусилля в тросах у разі навантаження розподіленими силами тертя інтенсивністю T , знайдемо шля-

хом інтегрування відповідних виразів. При цьому врахуємо, що канат ділянкою взаємодії зі шківом розділено на три частини.

На першій ділянці ($x < 0$)

$$u_i = -\sum_{m=1}^N \frac{1}{EFN\beta_m r} \sum_{k \in K} \cos\left(\frac{\pi m}{N}\left(k - \frac{1}{2}\right)\right) \int_0^L T e^{\beta_m(x-s)} ds \cos\left(\frac{\pi m}{N}\left(i - \frac{1}{2}\right)\right) + \frac{Px}{EF},$$

$$p_i = -\sum_{m=1}^N \frac{1}{Nr} \sum_{k \in K} \cos\left(\frac{\pi m}{N}\left(k - \frac{1}{2}\right)\right) \int_0^L T e^{\beta_m(x-s)} ds + \cos\left(\frac{\pi m}{N}\left(i - \frac{1}{2}\right)\right) + \frac{P}{N}.$$

На другій ділянці ($0 \leq x \leq L$)

$$u_i = -\sum_{m=1}^N \frac{1}{EFN\beta_m r} \sum_{k \in K} \cos\left(\frac{\pi m}{N}\left(k - \frac{1}{2}\right)\right) \left[\int_x^L T e^{\beta_m(x-s)} ds + \int_0^x T e^{-\beta_m(x-s)} ds \right] \times$$

$$\times \cos\left(\frac{\pi m}{N}\left(i - \frac{1}{2}\right)\right) + \frac{\left(\frac{P}{N} + \int_0^x T(x-s) ds\right) x}{EF},$$

$$p_i = -\sum_{m=1}^N \frac{1}{Nr} \sum_{k \in K} \cos\left(\frac{\pi m}{N}\left(k - \frac{1}{2}\right)\right) \left[\int_x^L T e^{\beta_m(x-s)} ds + \int_0^x T e^{-\beta_m(x-s)} ds \right] \times$$

$$\times \cos\left(\frac{\pi m}{N}\left(i - \frac{1}{2}\right)\right) + \int_0^x T(x-s) ds + \frac{P}{N}.$$

На третій ділянці ($x > L$)

$$u_i = -\sum_{m=1}^N \frac{1}{EFN\beta_m r} \sum_{k \in K} \cos\left(\frac{\pi m}{N}\left(k - \frac{1}{2}\right)\right) \int_0^L T e^{-\beta_m(x-s)} ds \cos\left(\frac{\pi m}{N}\left(i - \frac{1}{2}\right)\right) +$$

$$+ \left(\int_0^L T ds + \frac{P}{N} \right) \frac{x}{EF},$$

$$p_i = \sum_{m=1}^N \frac{1}{Nr} \sum_{k \in K} \cos\left(\frac{\pi m}{N}\left(k - \frac{1}{2}\right)\right) \int_0^L T e^{-\beta_m(x-s)} ds \cos\left(\frac{\pi m}{N}\left(i - \frac{1}{2}\right)\right) + \int_0^L T ds + \frac{P}{N}.$$

Прийmemo, що до тросів множини K прикладені розподілені за законом Кулона дотичні сили тертя інтенсивністю $T_{(k)} = \frac{f}{R} P e^{\frac{fx}{R}}$. Величина

сили P забезпечує середнє одиничне навантаження тросів каната. З використанням отриманих залежностей визначено розподіл внутрішніх сил розтягу тросів каната типа ГТК-3150, що має вісім тросів. Кут охоплення шківа канатом становить 180° . Коефіцієнт тертя при-

йнятий рівним 0,5 – як для випадку тертя гуми по сталі. Результати розподілу сили розтягу поміж тросами в канаті наведено на рис. 3-5.

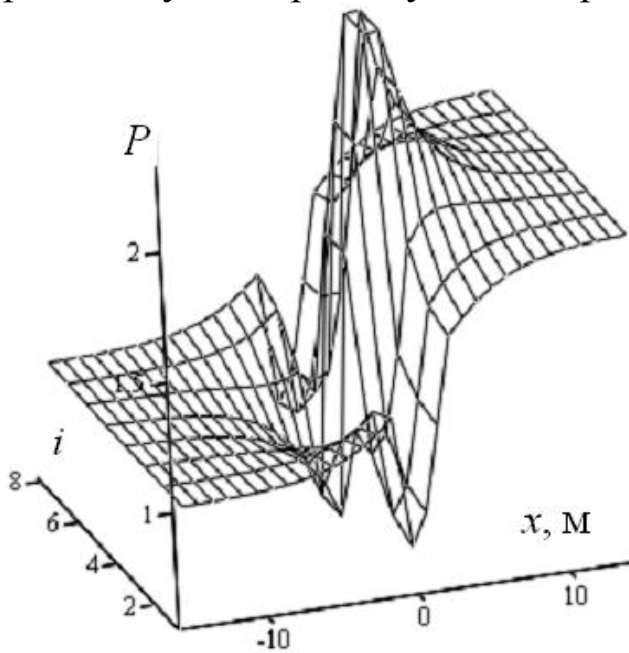


Рис. 3 – Поверхня, що відтворює розподіл сили розтягу поміж тросами в канаті з восьми тросів та виступом, розташованим поміж четвертим та п'ятим тросами

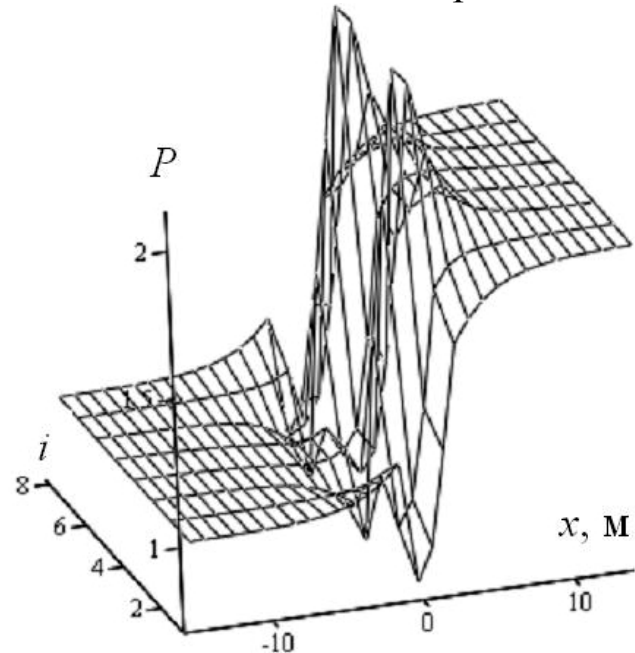


Рис. 4 – Поверхня, що відтворює розподіл сили розтягу поміж тросами в канаті з восьми тросів та виступом, розташованим поміж третім та шостим тросами

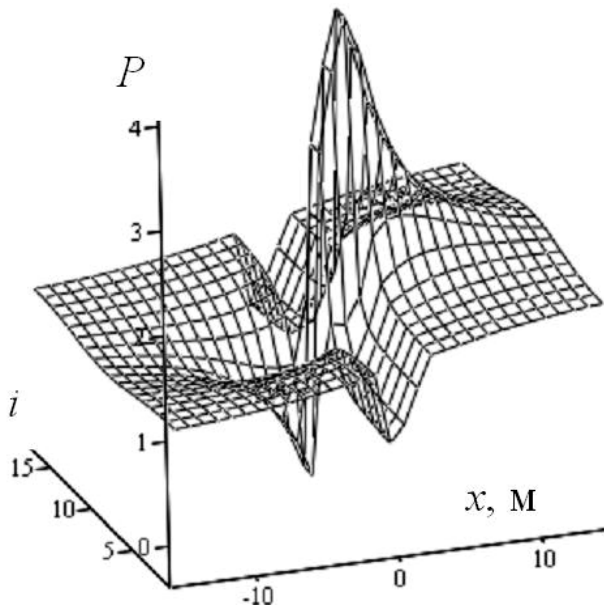


Рис. 5 – Поверхня, що відтворює розподіл сили розтягу поміж тросами в канаті з вісімнадцяти тросів та виступом, розташованим поміж дев'ятим та десятим тросами

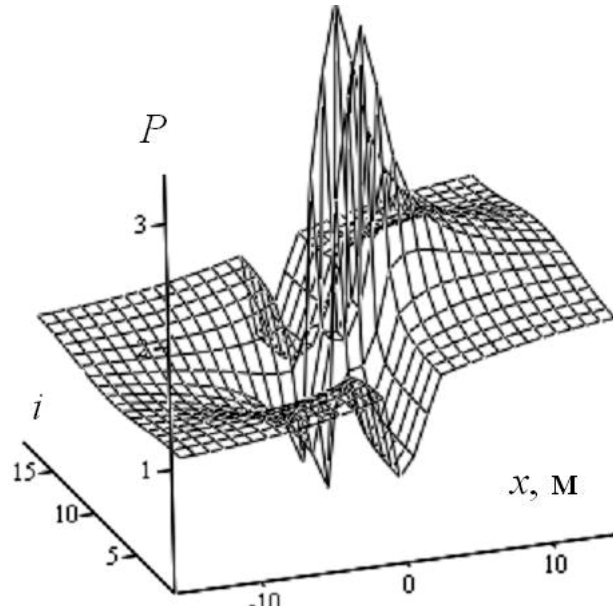


Рис. 6 – Поверхня, що відтворює розподіл сили розтягу поміж тросами в канаті з вісімнадцяти тросів та виступом, розташованим поміж восьмим та одинадцятим тросами

Канат має виступ, який призводить до передачі канату сил тертя від шківа діаметром 1,6 м через два троси (четвертий та п'ятий) (рис. 3), (третій та шостий) (рис. 4). На рис. 5 і 6 для каната того самого типу з вісімнадцятьма тросами показані поверхні, що відтворюють розподіл внутрішніх сил, що діють в тросах при навантаженні силами тертя тросів з номерами дев'ятий та десятий і восьмий та одинадцятий, відповідно. Наведені рисунки показують, що прикладення сил тертя до окремих тросів призводить до суттєвого перерозподілу сил поміж ними на ділянці взаємодії каната зі шківом. Найсуттєвіші зміни відбуваються в навантаженнях тросів, що взаємодіють зі шківом. Сили розтягу в цих тросах зростають на ділянці взаємодії зі шківом. На ділянці збігання зі шківа сили розтягу тросів зменшуються та можуть навіть змінити знак. В суміжних тросах на ділянці взаємодії зі шківом сили натягнення зменшуються на ділянці взаємодії зі шківом. Такий характер перерозподілу сил узгоджується з загальною уявою про дії сил, прикладених до дискретних тросів.

Співставлення результатів визначення розподілу зусиль при різних кількостях тросів в канаті показує, що зростання кількості тросів, розташованих з краю виступів, призведе до локального (нерівномірного) зростання максимальних зусиль. Зменшення коефіцієнта тертя каната по шківу, радіуса шківа, не суттєво зменшують максимальні зусилля. Зменшення нерівномірності розподілу зусиль можливо лише конструкцією поздовжніх виступів на плоскому канаті та канавок на шківі підйомної машини. Їх конструкція повинна забезпечити прикладення до тросів виступу сил, рівних силам прикладеним до інших тросів. Це можливо за умови, що кожен виступ має лише два троси. Кут нахилу бокових поверхонь становить 45° , розміри перерізів канавок та виступів збігаються. Технічне виконання таких умов складне, доцільніше не прикладати зовнішні зусилля до тросів виступів. Вказане можна досягти або прямокутною формою перерізу канавки та виступу або тим, що поміж виступом та канавкою має місце зазор.

Висновки та напрямки подальших досліджень. Передача сил від шківа до каната виступами призводить до суттєвого зростання екстремальних сил розтягу тросів. Зменшити цей негативний чинник можна застосуванням прямокутної форми перерізу канавки та виступу або тим, що поміж виступом та канавкою забезпечити зазор.

Отримані залежності мають бути використані при подальшому проектуванні машини для підняття вантажів зі значної глибини плоскими гумотросовими канатами.

Список літератури

1. Заболотный К.С. Исследование величины радиальной нагрузки в бобинной намотке / К.С. Заболотный, Е.В. Панченко // Сб. науч. тр. НГУ. – 2006. – № 26. – Т.1. – С. 106-111.
2. Колосов Л.В. Научные основы разработки и применения резиновых канатов подъемных установок глубоких рудников: дис... д-ра техн. наук: 05.05.06. – Днепропетровск, 1987. – 570 с.
3. Блохін С.Є. Визначення напружено-деформованого стану гумотросового каната змінного перерізу в тілі намотування багат шарової конструкції / С.Є. Блохін, Д.Л. Колосов, Г.І. Танцура // Підйомно-транспортна техніка. – 2010. – № 4. – С. 15-22.
4. Колосов Д.Л. Визначення впливу деформування бобіни на розподіл сил розтягу тросів в канаті ступінчастої конструкції / Д.Л. Колосов // Збірник наукових праць Національного гірничого університету. – 2011. – № 36. – Т.1. – С. 189-194.
5. Belmas I. The stress-strain state of the stepped rubber-rope cable in bobbin of winding / I. Belmas, D. Kolosov // School of Underground Mining 2011. New Techniques and technologies in Mining. – CRC Press/Balkema. – Netherlands. – 2011. – P. 211-214.
6. Колосов Д.Л. Вплив нормального тиску на напружений стан гуми ступінчастого каната на робочому органі підйомної машини / Д.Л. Колосов // Збірник наукових праць Національного гірничого університету. – 2011. – № 36. – Т.2. – С. 68-76.
7. Колосов Д.Л. Дослідження впливу дотичних зусиль між гумотросовим канатом змінного перерізу і бобіною на розподіл напружень в канаті / Д.Л. Колосов // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія гірничо-електромеханічна. – 2012. – № 23 (196). – С. 92-100.

Стаття надійшла до редакції 24.10.2012

Д.Л. Колосов. Национальный горный университет, Днепропетровск

Исследование напряженного состояния резиновтросового каната при сложной контактной поверхности с рабочим органом подъемной машины

Исследовано напряженное состояние резиновтросового каната с выступами при его взаимодействии с рабочим органом подъемной машины. Доказано, что передача сил от шкива к канату выступами приводит к существенному увеличению экстремальных усилий растяжения тросов. Уменьшение этого негативного фактора возможно путем использования прямоугольной формы сечения канавки и выступа или обеспечением зазора между ними.

Ключевые слова: подъемная машина, плоский резиновтросовый канат с выступами, шкив трения, бобина, силы трения, напряженное состояние, распределение напряжений.

D. Kolosov. National Mining University, Dnepropetrovsk

Stress State Analysis of the Rubber-Rope Cable at Complicated Contact Surface with a Hoist Actuator.

An analysis of stress distribution in a rubber-rope cable during its interaction with a hoist actuator is provided. We proved that power transfer from the pulley to the rope leads to the considerable decrease of extreme tensile forces of ropes. It is possible to reduce this negative factor by means of using the squared shape of a groove cross-section.

Keywords: hoist engine, flat rubber-rope cable with ledges, friction pulley, bobbin, friction forces, stress state, stress distribution.