

*д.т.н. Корнеев С.В.,
Доброногова В.Ю.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

РЕГУЛИРОВАНИЕ НАТЯЖЕНИЯ ЦЕПЕЙ ЗАБОЙНЫХ СКРЕБКОВЫХ КОНВЕЙЕРОВ

Наведені залежності для розрахунку поточних і середньозважених натягувань тягового органу вибійних скребкових конвеєрів з автоматичним натягувальним пристроєм. Проведений розрахунок і аналіз ефективності регулювання натягування тягового органу за фактором зношування ланцюгів.

Ключові слова: вибійний скребковий конвеєр, зношування ланцюгів, регулювання натягування, довговічність.

Приведены зависимости для расчета текущих и средневзвешенных натяжений тягового органа забойных скребковых конвейеров с автоматическим натяжным устройством. Произведен расчет и анализ эффективности регулирования натяжения тягового органа по фактору износа цепей.

Ключевые слова: забойный скребковый конвейер, износ цепей, регулирование натяжения, долговечность.

Долговечность тягового органа (ТО) забойных скребковых конвейеров (ЗСК) остается крайне низкой. При заданном ресурсе конвейеров от 0,7 до 3 млн. т угля средний ресурс ТО на шахтах Донбасса составляет 280 тыс. т. Потребность в высоконадежных ТО особенно актуальна в связи с резким возрастанием установленной мощности привода конвейеров, что вызвано усложнением горно-геологических условий добычи угля, увеличением длины выемочных столбов до 2...2,5 км и переходом на отработку пластов лавами длиной 250...400 м. Тяговый орган подвержен комплексному влиянию силовых и кинематических факторов, абразивной и агрессивной окружающей среды. Причинно-следственные связи между воздействиями и видами повреждений, которые приводят к отказу ТО или к его предельному состоянию, отражены на рисунке 1. Основным показателем, определяющим предельное состояние ТО, является износ цепей. Согласно нормативным требованиям [1] цепь должна быть заменена, если износ или коррозия боковых поверхностей вертикальных звеньев составляют более 20%, из-

нос внутренних поверхностей дуг звеньев – свыше 5%, в остальных местах – более 10%. Увеличение шага при износе внутренних поверхностей дуг может привести к нарушению нормального функционирования конвейера из-за схода цепи со звездочек.

Одним из направлений повышения долговечности ТО является повышение его сопротивляемости нагрузкам путем совершенствования конструкции и технологии изготовления цепей, улучшения их физико-механических свойств. Все известные в мире производители цепей проводят оптимизацию химического состава металла, из которого изготавливаются цепи, и режимов термообработки. В результате специальной термической обработки обеспечивается повышение твердости работающих на истирание дуг звеньев цепи и пластичности прямых участков, что снижает чувствительность цепей к переменным нагрузкам, обеспечивается сбалансированное соотношение их разрывной прочности, усталостной долговечности и износостойкости. В настоящее время это направление себя практически исчерпало.

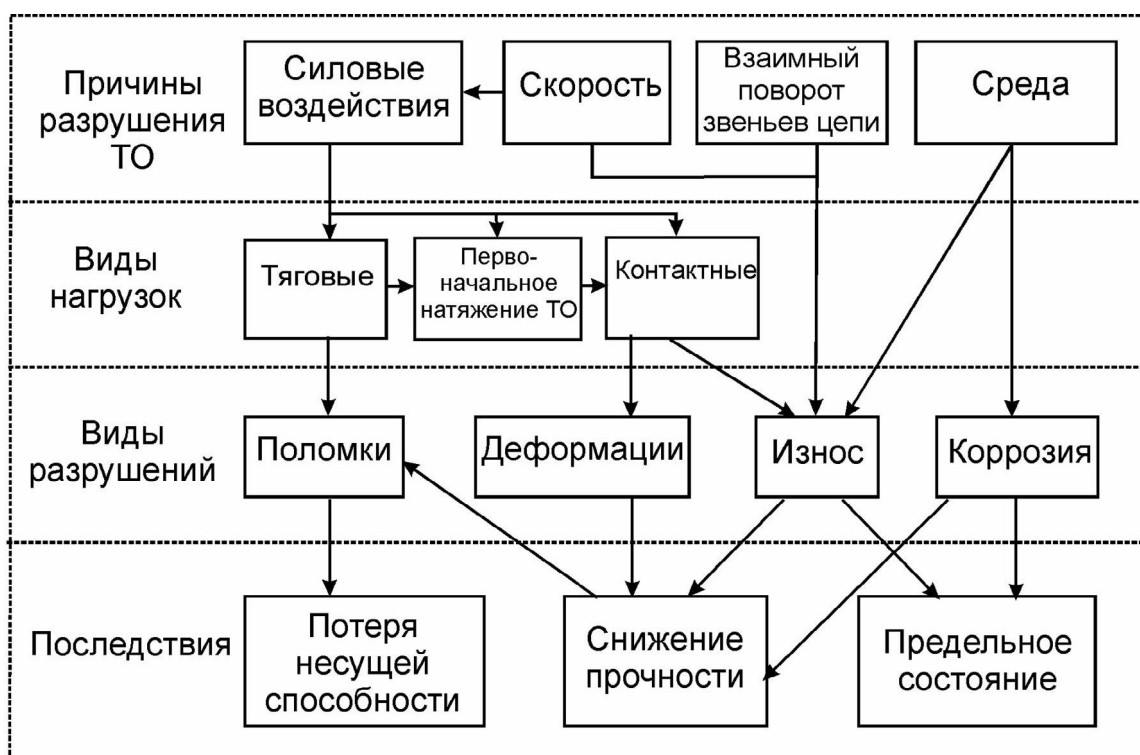


Рисунок 1 – Схема причинно-следственных связей при повреждении тягового органа забойных скребковых конвейеров

Известно также, что ресурс ТО по фактору износа шарниров цепей пропорционален натяжениям на звездочках, где происходит взаимный поворот звеньев цепей [2]. Отсюда следует второе, не менее

важное направление улучшения показателей надежности ТО – снижение уровня его натяжений, включающих статическую и динамическую компоненты.

Необходимый уровень статических натяжений обеспечивается в результате нерегулируемого предварительного натяжения цепей или его регулирования в процессе эксплуатации.

В случае применения нерегулируемого натяжного устройства первоначальное натяжение ТО назначается в расчете на ожидаемую максимальную загрузку конвейера. Тогда при меньшей нагрузке, которая вследствие перемещения выемочной машины вдоль конвейера ТО может снижаться до нуля, может значительно превысить уровень, достаточный для нормальной работы конвейера. Завышенные в среднем натяжения ТО приводят к повышенному износу поверхностей дуг звеньев цепей, в сочетании с динамическими нагрузками к снижению усталостной долговечности цепей, поломке приводных звездочек, увеличению потребляемой мощности электропривода и ее колебаниям, возможно, к пластическим деформациям звеньев цепи. При неконтролируемом процессе монтажного натяжения ТО возможны также и заниженные значения первоначальных натяжений в ТО, что может привести к образованию недопустимой слабину в ТО, стопорению, образованию петель в цепях, их «подпрыгиванию» над звездочками и, как следствие, к отказам конвейера.

Повышение эффективности конвейера может быть достигнуто путем регулирования натяжения, например, посредством автоматических натяжных устройств (АНУ), обычно с объемным гидроприводом, на что указывается в работах [3, 4, 5]. Вместе с тем недостаточная обоснованность критериев эффективности регулирования натяжения при различных компоновках привода, законах регулирования натяжения и условиях эксплуатации является фактором, сдерживающим применение АНУ.

Определение критериев эффективности и законов управления АНУ может быть произведено на основе расчетов статических натяжений ТО.

В настоящее время расчет натяжений производится по методике [6], согласно которой предполагается нерегулируемое натяжение, нагрузка рештачного става расчетным грузопотоком по всей длине и исключение образования «слабины» в точке контура с минимальным натяжением.

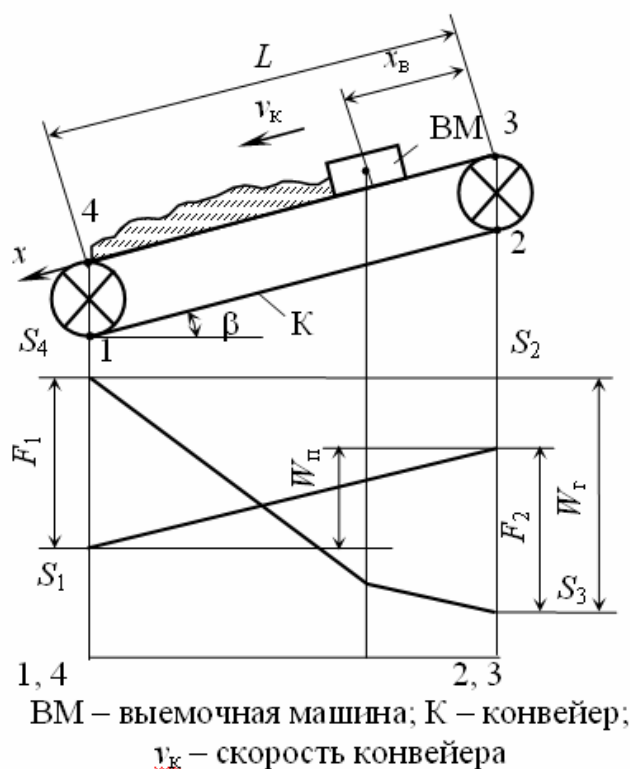


Рисунок 2 - Схема загрузки конвейера и диаграмма натяжений ТО

Однако в реальных условиях работы конвейера статическая составляющая усилий натяжения ТО, частью которых является первоначальное натяжение, изменяется в широких пределах. Это связано с перемещением пункта загрузки конвейера (перемещением выемочной машины), со случайным характером грузопотока и сопротивлений движению, а также с возможным регулированием скорости и натяжения. Таким образом, методика нуждается в корректировке применительно к расчету конвейеров с АНУ.

Целью работы является установление зависимостей статических натяжений тягового органа забойного скребкового конвейера и коэффициента повышения ресурса цепей по фактору их износа при различных способах регулирования натяжения и распределения нагрузок между приводными станциями. Расчетная схема конвейера и диаграмма натяжения ТО, при построении которой учитывается положение выемочной машины, приведены на рисунке 2.

При расчетах усилий натяжения в ТО принимаются допущения: 1) груз равномерно распределен по длине участка конвейера, расположенного между выемочной машиной и пунктом разгрузки; 2) случайная координата x_B местонахождения выемочной машины на ставе конвейера подчиняется равномерному закону распределения $f_{x_B}(x_B)=1/L$, где L – длина конвейерного става; 3) суммарное тяговое усилие, развиваемое

приводами конвейера, распределяется равномерно между отдельными приводными блоками; 4) минимальное усилие натяжения в ТО конвейера с двумя приводными станциями независимо от способа его регулирования образуется в точке 1 тягового контура, если $W_{\text{п}}/n_x > W_{\text{г.в}}/n_{\text{г}}$, где $W_{\text{п}}$ и $W_{\text{г.в}}$ – соответственно сопротивление движению порожняковой и грузовой ветвей ТО, $n_{\text{г}}$ и n_x – число одинаковых приводных блоков головной и хвостовой приводных станций, или в точке 3 в противном случае; 5) минимальное усилие натяжения в ТО конвейера с одной приводной станцией образуется в точке 1 тягового контура; 6) минимальное усилие натяжения ТО согласно условию повсеместного растяжения не должно быть меньше некоторого заданного натяжения $S_{\text{min } 3}$; 7) АНУ, в случае его применения, находится в хвостовой станции, при этом натяжение регулируется в точке 3 тягового контура; 8) став конвейера прямолинеен; 9) износ цепей «по шагу», а также их ресурс по фактору износа пропорциональны усилиям натяжения; 10) тяговый орган рассматривается как упругий стержень.

Упругое удлинение ТО

$$\Delta(x_g) = \Delta_g(x_g) + \Delta_n, \quad (1)$$

где $\Delta_g(x_g)$ и Δ_n – упругие удлинения верхней и нижней ветвей ТО. Удлинения нижней и верхней ветви

$$\Delta_n = 0,5E^{-1}L[S_1 + S_2], \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \Delta_g(x_g) &= E^{-1} \int_0^{x_g} (S_3 + f_{0g}q_0x) dx + E^{-1} \int_{x_g}^L [S_3 + f_{0g}q_0x + fq(x - x_g)] dx = \\ &= 0,5LE^{-1} (2S_3 + Lf_{0g}q_0 + Lqf - 2fqx_g + fq \frac{x_g^2}{L}), \end{aligned} \quad (3)$$

где E – продольная жесткость ТО; S_i – текущее значение усилия натяжения ТО в i -ой точке тягового контура, в которой осуществляется взаимный поворот звеньев цепей, $i=1, 2, 3, 4$; x – текущее значение координаты на верхней ветви конвейера (рис. 2); q_0 и q – погонный вес, соответственно, ТО и груза; $f_{0в}$ и f – суммарные удельные сопротивления движению верхней ветви ТО и груза, соответственно $f_{0в} = w_{0в} \cos \beta + \sin \beta$, и $f = w \cos \beta + \sin \beta$; $w_{0в}$ и w – удельные сопротивления движению, соответственно, ТО и груза; β – угол установки конвейера, при транспортировании вниз $\beta < 0$.

Критерий повышения ресурса цепей по фактору износа согласно [2] может быть представлен в виде

$$k_p = S_{\Sigma_{np}} / S_{\Sigma_p},$$

где $S_{\Sigma_{np}}$ и S_{Σ_p} – суммарные значения средних усилий натяжения в точках 1, 2, 3, и 4 при нерегулируемом и регулируемом натяжении.

Рассмотрим варианты расчета текущих и средних значений усилий натяжения, отвечающие различному сочетанию схем компоновки привода и способов натяжения ТО.

1. Одна головная приводная станция, натяжение не регулируется.

При нерегулируемом натяжении ТО его первоначальное натяжение осуществляется таким образом, чтобы при максимальной загрузке конвейера ($q=q_{\text{доп}}$, $x_{\text{в}}=0$) выполнялось условие $S_1=S_{\text{min } 3}$. Здесь $q_{\text{доп}}$ – максимальное значение погонного веса, соответствующее приемной способности конвейера.

Тогда, учитывая, что $S_2 = S_1 + W_{\text{п}}$, $S_3 \approx S_2$, $S_4=S_3+W-W_{\text{п}}$, где W – ТО, из выражений (1), (2) и (3) получим

$$\Delta = 0,5E^{-1}L(4S_1 + 2W_n + W - fqx_{\text{в}} + fqx_{\text{в}}^2 / L). \quad (4)$$

При максимальной загрузке выражение (3) будет иметь вид

$$\Delta = 0,5E^{-1}L(4S_{\text{min } 3} + 2W_n + W_{\text{max}}). \quad (5)$$

При неизменной длине тягового контура (нерегулируемое натяжение) суммарное удлинение ТО остается одинаковым при любой загрузке става, т.е. при любых значениях W .

Тогда из равенства правых частей выражений (4) и (5) получим

$$S_1 = S_{\text{min } 3} + 0,25(W_{\text{max}} - W(x_{\text{в}}) + W_{\text{г}}x_{\text{в}} / L),$$

где $W_{\text{г}}$ – сопротивление движению груза.

Учитывая, что $W_{\text{max}}=W_{\text{xx}}+W_{\text{г max}}$, где $W_{\text{г max}}$ сопротивление движению груза при максимальном заполнении става, $W=W_{\text{xx}}+W_{\text{г}}$, $W_{\text{г}}=fq(L-x_{\text{в}})$ $W_{\text{г max}}=fq_{\text{доп}}L$, получим

$$S_1(x_{\text{в}}) = S_{\text{min } 3} + 0,25f \left[q_{\text{доп}}L - q(L - x_{\text{в}})^2 / L \right]. \quad (6)$$

Усреднение S_1 производится по формуле

$$S_{1cp} = \int_0^L f_{x_6} S_1(x_6) dx_6 . \quad (7)$$

После подстановки выражения (6) в формулу (7) получим

$$S_{1cp} = S_{\min 3} + 0,25 fL(q_{\partial on} - q/3).$$

Средние значения усилий в точках 2, 3 и 4:

$$S_{2cp} = S_{1cp} + W_n = S_{\min 3} + 0,25 fL(q_{\partial on} - \frac{q}{3}) + W_n;$$

$$S_{3cp} \approx S_{2cp};$$

$$S_{4cp} = S_{3cp} + W - W_n = S_{\min 3} + 0,25 fL(q_{\partial on} + 5q/3) + W_{xx}.$$

Сумма средних усилий

$$S_{\sum_{np}} = \sum_{i=1}^n S_{icp} = 4S_{\min 3} + W_{xx} + 2W_n + fLq_{\partial on} + qfL/6.$$

2. Одна приводная станция, натяжение регулируется посредством АНУ.

В данном случае минимальное натяжение также образуется в точке 1 тягового контура и при регулировании поддерживается на уровне $S_{\min 3}$.

При этом

$$S_1 = S_{\min 3};$$

$$S_2 = S_3 = S_{\min 3} + W_n;$$

$$S_4 = S_{\min 3} + W_{xx} + fq(L - x_6).$$

Далее, рассуждая так же, как и в предыдущем случае, после усреднения получим

$$S_{1cp} = S_{\min 3};$$

$$S_{2cp} = S_{\min 3} + W_n;$$

$$S_{3cp} = S_{2cp};$$

$$S_{4cp} = S_{\min 3} + W_{xx} + fqL/2.$$

Сумма средних усилий

$$S_{\sum p} = \sum_{i=1}^n S_{i\text{cp}} = 4S_{\min 3} + W_{xx} + 2W_n + qfL/2.$$

3. Две приводные станции с распределением тяговых усилий в соотношении 1:1, натяжение не регулируется.

При максимальной загрузке конвейера минимальное натяжение обычно образуется в точке 3.

$$\text{В данном случае } S_1 = S_3 + 0,5W - W_n; \quad S_2 = S_3 + 0,5W; \\ S_4 = S_3 + W - W_n.$$

Удлинения ТО при текущей и максимальной нагрузке соответственно равны

$$\Delta = 0,5E^{-1}L[4S_3 + 2(W - W_n) - (W - W_{xx})x_6/L]; \\ \Delta = 0,5E^{-1}L[4S_3 + 2(W_{\max} - W_n)].$$

Далее так же, как и в п. 1, с учетом зависимостей $W = W_{xx} + fqL$ и $W_{\max} = W_{xx} + fq_{\text{дон}}L$ получим

$$S_3(x_6) = S_{\min 3} + 0,5fL[q_{\text{дон}} - q(1 - 1,5x_6/L + 0,5x_6^2/L^2)].$$

После усреднения по x_6

$$S_{1\text{cp}} = S_{\min 3} + 0,5W_{xx} - W_n + 0,5fL(q_{\text{дон}} + q/12); \\ S_{2\text{cp}} = S_{\min 3} + 0,5W_{xx} + 0,5fL(q_{\text{дон}} + q/12); \\ S_{3\text{cp}} = S_{\min 3} + 0,5fL(q_{\text{дон}} - 5q/12); \\ S_{4\text{cp}} = S_{\min 3} + W_{xx} - W_n + 0,5fL(q_{\text{дон}} + 7q/12).$$

Сумма средних усилий

$$S_{\sum np} = \sum_{i=1}^n S_{i\text{cp}} = 4S_{\min 3} + 2W_{xx} - 2W_n + 2fLq_{\text{дон}} + qfL/6.$$

4. Две приводные станции с распределением тяговых усилий в соотношении 1:1, натяжение регулируется.

При транспортировании груза вверх ($\beta \geq 0$) минимальное натяжение всегда образуется в точке 3 контура. При этом отрабатывается одноуровневый закон регулирования натяжения S_3 на уровне $S_{\min 3}$.

При транспортировании вниз ($\beta < 0$) возможно образование минимального натяжения в точке 3 (при $W_{\Pi} < W_{\Gamma.В}$) или в точке 1 (при $W_{\Pi} > W_{\Gamma.В}$). Наименьшие средние значения натяжений обеспечиваются при двухуровневом законе регулирования натяжения, в соответствии с которым при $W_{\Pi} < W_{\Gamma.В}$ выполняется условие $S_3 = S_{\min 3}$ а при $W_{\Pi} > W_{\Gamma.В}$ – условие $S_3 = S_{\min 3} - W_{xx} / 2 + W_n$.

Граничное значение $x_{в,г}$, при котором осуществляется переход с одного уровня регулирования на другой, определим из системы уравнений

$$\begin{cases} S_1 = S_{\min 3}; \\ S_3 = S_{\min 3} + \frac{W_{xx}}{2} - W_n + \frac{qf(L - x_{6,2})}{2}. \end{cases}$$

Отсюда

$$x_{6,2} = L - 2W_n - W_{xx} / qf.$$

Если при некотором значении q оказывается, что $x_{в,г} \leq 0$, то при меньших значениях q следует полагать $x_{в,г} = 0$.

После усреднения по $x_{в}$

$$\begin{aligned} S_{1cp} &= S_{\min 3} + \frac{x_{6,2}}{L} \left(\frac{W_{xx}}{2} - W_n \right) + \frac{qfL}{4}; \\ S_{2cp} &= S_{\min 3} + \frac{L - x_{6,2}}{L} W_n + \frac{x_{6,2} W_{xx}}{2L} + \frac{qfL}{4}; \\ S_{3cp} &= S_{\min 3} + \frac{L - x_{6,2}}{L} \left(W_n - \frac{W_{xx}}{2} \right); \\ S_{4cp} &= S_{\min 3} + \frac{W_{xx}(L + x_{6,2})}{2L} - \frac{x_{6,2}}{L} W_n + \frac{qfL}{2}. \end{aligned}$$

Сумма средних усилий

$$S_{\sum p} = \sum_{i=1}^n S_{i cp} = 4S_{\min 3} + 2x_{6,2} W_{xx} / L - (2L - 4x_{6,2}) W_n / L + qfL.$$

5. Две приводные станции с распределением тяговых усилий в соотношении 2:1, натяжение не регулируется.

В данном случае $S_2 = S_3 + \frac{1}{3}W_0$; $S_1 = S_3 + \frac{1}{3}W_0 - W_n$; $S_4 = S_3 + W_0 - W_n$.

Средние значения усилий, определяемые так же, как в п. 3,

$$S_{3cp} = S_{\min 3} + \frac{5}{12} fL(q_{дон} - q) + \frac{1}{3} qfL - \frac{qfL}{12};$$

$$S_{2cp} = S_{3cp} + \frac{1}{3} W_{xx} + \frac{1}{6} qfL;$$

$$S_{1cp} = S_{3cp} + \frac{1}{3} W_{xx} + \frac{1}{6} qfL - W_n;$$

$$S_{4cp} = S_{3cp} + W_{xx} - W_n + \frac{qfL}{2}.$$

Сумма средних усилий

$$S_{\sum np} = \sum_{i=1}^n S_{i cp} = 4S_{\min 3} + 5q_{дон}fL/3 + 5W_{xx}/3 - 2W_n + qfL/6.$$

6. Две приводные станции с распределением тяговых усилий в соотношении 2:1, натяжение регулируется.

Расчет натяжений производится так же, как в п. 4.

В случае двухуровневого закона регулирования натяжения

$$x_{6,2} = L - \frac{3W_n - W_{xx}}{qf}.$$

Средние значения натяжений

$$S_{3cp} = S_{\min 3} + \frac{L - x_{6,2}}{L} (W_n - \frac{W_{xx}}{3});$$

$$S_{2cp} = S_{\min 3} + \frac{L - x_{6,2}}{L} W_n + \frac{x_{6,2} W_{xx}}{3L} + \frac{qfL}{6};$$

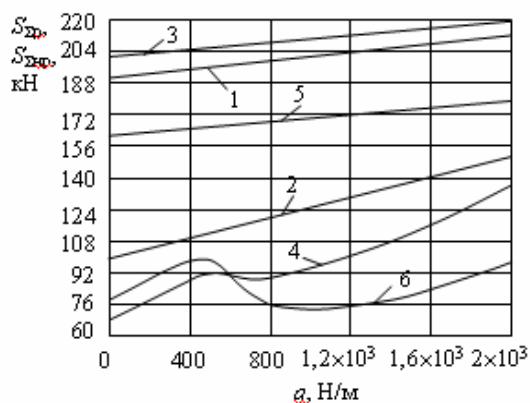
$$S_{1cp} = S_{\min 3} + \frac{x_{6,2}}{L} (\frac{W_{xx}}{3} - W_n) + \frac{qfL}{6};$$

$$S_{4cp} = S_{\min 3} + \frac{(2L + x_{6,2})W_{xx}}{3L} - \frac{x_{6,2}}{L} W_n + \frac{qfL}{2}.$$

В качестве примера рассмотрим зависимости суммы средних значений усилий натяжения и k_p от q , полученные для типичных условий

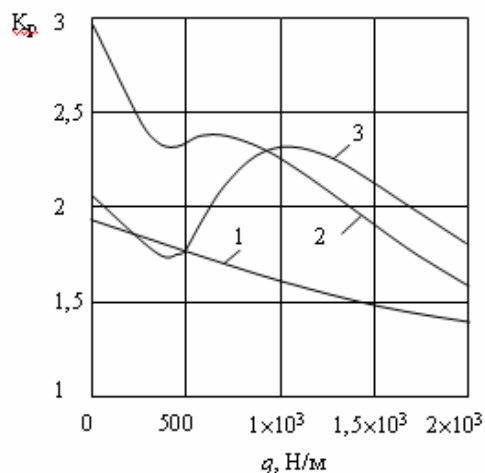
эксплуатации конвейера СП250.11 при различных схемах компоновки привода и способах натяжения ТО. Принимались следующие исходные данные: $L=200$ м; $\beta=-18^\circ$; $q=0\dots1760$ Н/м; $q_{\text{доп}}=1760$ Н/м; $q_0=206$ Н/м; $w_{0в}=0,4$; $w=0,6$; $S_{\text{min } 3}=3000$ Н.

Графики полученных зависимостей представлены на рисунках 3 и 4.



1-2 – одна приводная станция;
3-6 – две приводные станции;
3, 4 – $F_1 : F_2 = 1 : 1$; 5, 6 – $F_1 : F_2 = 2 : 1$;
1, 3, 5 – нерегулируемое натяжение;
2, 4, 6 – регулируемое натяжение

Рисунок 3 – Зависимость суммарных средних усилий натяжения ТО от погонного веса груза



1 – одна приводная станция; 2, 3 – две приводные станции; 2 – $F_1 : F_2 = 1 : 1$;
3 – $F_1 : F_2 = 2 : 1$

Рисунок 4 – Зависимость критерия повышения ресурса ТО при регулировании натяжения от погонного веса груза

Суммы средних усилий, которые дают представление об абсолютных значениях ресурса ТО, имеют общую тенденцию к возрастанию, причем большую в случаях регулирования натяжения. При регулируемом в случае поддержания усилия в точке 1 тягового контура на уровне $S_{\text{min } 3}$ или при нерегулируемом натяжении суммы средних усилий изменяются линейно. Наибольшие значения k_p , которые показывают во сколько раз увеличивается ресурс ТО по фактору износа при регулировании натяжения, в случае оборудования конвейера одним приводом или оборудования двумя приводами при распределении тягового усилия в соотношении 1:1 наблюдаются в области значений q , близких к нулю. При этом k_p достигает значений, равных соответственно, 1,87 и 2,96. В случае распределения тягового усилия в соотношении 2:1 в области малых значений q k_p убывает от 2,04 до 1,75, а затем снова возрастает до 2,3. При максимальных значениях q и k_p снижается до 1,5. Из анализа приведенных зависимостей вытекает следующее. По мере увеличения q на величину k_p влияют два фактора, оказывающие противоположное воздействие. С одной стороны, увеличивается граничное значение $x_{в.г}$, что расширяет область регулирования на более низком уровне натяжения и приводит к некоторому увеличению k_p . С другой стороны, проис-

ходит сближение уровней натяжения при максимальном по длине конвейера заполнении става, что приводит к существенному снижению k_p . Таким образом, регулирование натяжения является эффективным способом повышения долговечности тягового органа, особенно при средних значениях грузопотоков существенно меньших теоретической производительности конвейера.

Библиографический список

1. *Нормативы по безопасности забойных машин и комплексов (первая редакция)*. – М.: Минуглепром СССР, 1988. – 97 с.
2. РТМ 12.44.012-76. *Конвейеры шахтные скребковые. Пути обеспечения надежности на стадиях проектирования. Методика*. – М.: Ин-т горн. дела им. А.А. Скочинского, 1976. – 174 с. Июль, № 13. – С. 39-42.
3. *Вихерс К.П. Автоматическое регулирование предварительного натяжения цепей скребковых конвейеров и струговых установок // Глюкауф. – 1986.*
4. *Армонат Г., Брыхта П., Креггер Г. Опыт эксплуатации забойных конвейеров с регулятором предварительного натяжения цепей и ДТП-муфтами // Глюкауф. – 1992. – №3. – С. 23-27.*
5. *Ширин Л.Н., Корнеев С.В., Варченко Ю.Э. Автоматическое натяжение тягового органа забойного скребкового конвейера / Сб. научн. трудов НГУ Украины. Вып 19. Т. 4. – Днепропетровск: НГУ. – 2004. – С. 17-21.*
6. РТМ 12.44.045-81. *Конвейеры шахтные скребковые. Тяговый расчет*. – М.: Гипроуглемаш, 1982. – 31 с.

Рекомендовано к печати д.т.н., проф. Финкельштейном З.Л.