

УДК 622.647.2

Долгих В. П.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР, linercos@mail.ru)

МОДЕЛИРОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ ДВИЖЕНИЮ ТЯГОВОГО ОРГАНА УЧАСТКОВОГО ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА

На основании результатов компьютерного моделирования сопротивлений движению тягового органа в программном комплексе ANSYS Workbench была разработана уточненная методика тягового расчета участкового ленточного конвейера. Полученная модель позволила учесть физико-механические свойства элементов системы «груз–лента–роликоопоры», конструктивные и режимные параметры конвейера. Выполнено сравнение предлагаемой методики с типовой методикой тягового расчета. Показано, что в результате применения модели элементов системы «груз–лента–роликоопоры» в программном комплексе ANSYS Workbench, отражающей напряженно-деформированные состояния представленных элементов, удалось повысить качество расчетов потребляемой приводом мощности и суммарного тягового усилия.

Ключевые слова: ленточный конвейер, лента, роликоопора, тяговый расчет, компьютерная модель, ANSYS Workbench, сопротивление движению, натяжение.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

Важнейшим резервом повышения эффективности шахтных конвейеров является снижение сопротивлений движению тягового органа (ТО) с грузом на линейной части конвейерного става, например, путем рационализации конструктивных и эксплуатационных параметров конвейера, регулирования скорости и первоначального натяжения ленты. Обоснование диапазона регулирования режимных параметров позволит приблизиться к решению вопросов повышения надежности, снижения энергопотребления и материалоемкости конвейеров.

Главной составляющей мероприятий, касающихся совершенствования конвейера или режимов его эксплуатации, является тяговый расчет. В настоящее время повсеместно используется типовая методика тягового расчета шахтных ленточных конвейеров [1], основанная на экспериментально полученных интегральных коэффициентах сопротивления движению ленты. Проводимые по данной методике расчеты не позволяют оценить эффективность регулирования, так как не отражают непосредственное влияние на сопротивление движению ленты с грузом многих факторов, в

том числе уровня натяжений и скорости тягового органа.

Чтобы исследовать сложные нелинейные процессы в системе «груз–лента–роликоопоры» (ГЛР) ленточных конвейеров, рядом ученых были задействованы мощные пакеты программ, позволяющие оценить влияние конструктивных и режимных факторов на сопротивление движению тягового органа. Известна, например, методика тягового расчета трубчатых ленточных конвейеров, основанная на методах компьютерного моделирования в программном комплексе ANSYS [2].

Существует потребность в подобной методике тягового расчета для шахтных ленточных конвейеров, которая учитывала бы взаимодействия элементов системы «груз–лента–роликоопоры», конструктивные и режимные параметры конвейера, условия эксплуатации и пр. и служила инструментом для создания доказательной базы мероприятий по совершенствованию конвейеров и выбору режимов их работы.

Постановка задачи. Задачей компьютерных исследований является разработка уточненной методики тягового расчета участкового ленточного конвейера, полученная на основании моделирования сопротивлений

движению ленты в программном комплексе ANSYS Workbench.

Изложение материала и его результаты. Отличительным признаком предлагаемой методики тягового расчета ленточного конвейера является то, что вместо экспериментально полученных интегральных коэффициентов сопротивления движению ТО, выбор которых зачастую ничем не обоснован, сопротивления движению любого участка ТО представляются в виде суммы локальных сопротивлений, возникающих в зонах контакта ленты с роликоопорами.

В соответствии с уточненной методикой сила сопротивления движению ленты с грузом на каждой i -й трехроликовой опоре конвейера с жестким ставом определяется по формуле:

$$W_i = W_{срi} + 2W_{би} + W_{врi}, \quad (1)$$

где $W_{срi}$, $W_{би}$ — силы сопротивления на среднем и боковых роликах i -й роликоопоры от деформаций ленты и груза; $W_{врi}$ — сила сопротивления вращению роликов i -й оликоопоры, вызванная, в основном, сопротивлением вращению подшипников.

Составляющие $W_{срi}$ и $W_{би}$ сопротивления движению ленты W_i определяются в результате компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния элементов системы ГЛР.

Для расчета сопротивления движению ленты по роликоопоре применяется метод, основывающийся на компьютерном моделировании напряженно-деформированного состояния (НДС) взаимодействующих элементов системы «груз-лента-роликоопоры» (ГЛР) в программном комплексе ANSYS Workbench.

В соответствии с методом имитируется процесс измерения реакции роликоопоры на воздействие ленты, аналогичный процессу измерения при проведении физического эксперимента [3].

Моделируется фрагмент линейной части конвейерного става с тремя трехроликовыми опорами, на которых располагается натянутая с усилием S резиноканевая лента, например, EP-800/4-5+2, с насыпным грузом – углем (рис. 1).

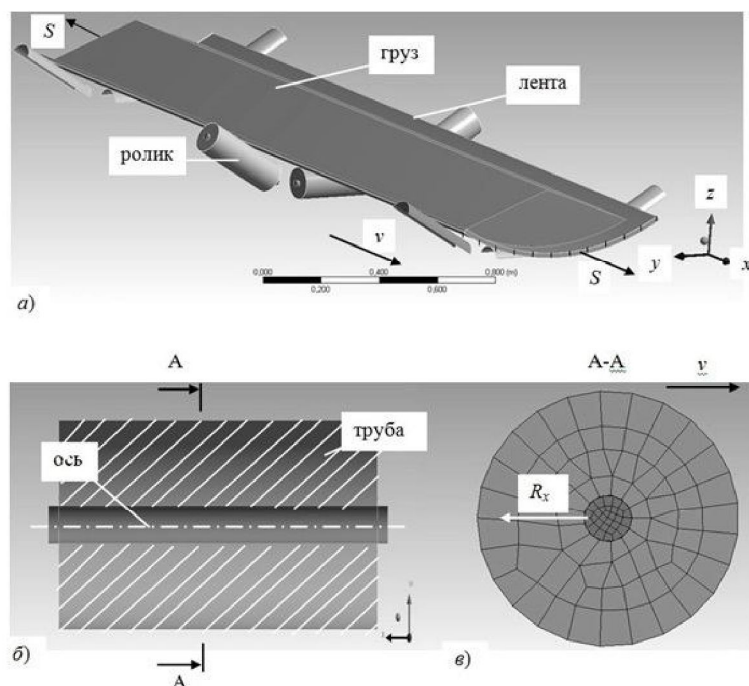


Рисунок 1 Компьютерная модель системы ГЛР (а), продольное (б) и поперечное (в) сечения ролика

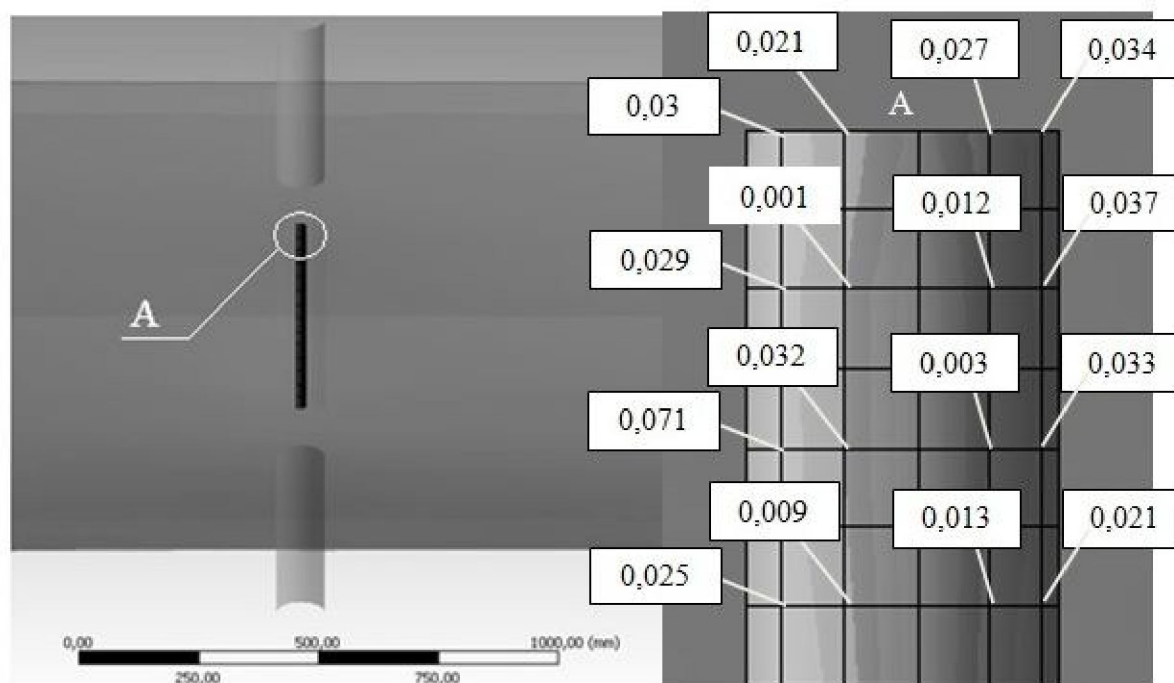


Рисунок 2 Картина распределения напряжений σ_x (МПа) на оси среднего ролика в зоне ее контакта с вращающейся частью

Лента представляется в виде композиции гиперупругих резиновых обкладок и сердечника, груз — в виде модели Drucker-Prager, ролики — в виде упругодеформируемой трубы, вращающейся на твердотельной неподвижной оси. Обоснование свойств резиновых обкладок приведено в работе [4]. Между контактирующими поверхностями ленты и трубы ролика, трубы и оси предполагается фрикционная связь; в первом случае коэффициент трения принимается равным 0,15 (резина по стали), а во втором случае — нулю.

Для определения общей силы сопротивления движению на роликоопоре были проведены специальные исследования на компьютерной модели системы ГЛР методом конечных элементов по определению реакций опоры — осей роликов.

При прохождении ленты с грузом или без него через роликоопору на внутренней поверхности обечайки роликов, которая в

модели непосредственно контактирует по всей своей длине с осью, возникают нормальные напряжения σ_x (рис. 2).

Сила сопротивления движению ленты от ее деформаций (вдавливания, изгибных нагрузок) равняется R_X — сумме проекций R_{Xi} (здесь i — номер ролика) на ось координат X , направленную в сторону движения ТО. «Измерение» реакции R_{Xi} оси каждого i -го ролика, осуществляемое в процессе моделирования, наглядно представлено на рисунке 3. Поскольку в основу комплекса ANSYS Workbench положен метод конечных элементов, то на определенном этапе моделирования поверхности труб и осей роликов приобретают граненую форму. Рассчитываются нормальные к каждой j -ой находящейся в контакте с осью грани внутренней поверхности трубы напряжения σ_{nij} , а затем — соответствующие им проекции σ_{Xij} на ось X -ов.

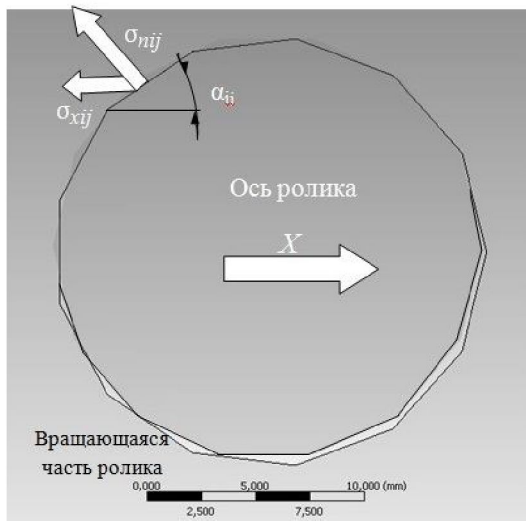


Рисунок 3 Распределение напряжений σ_x на оси X вращающейся части среднего ролика

Составляющая общей силы сопротивления движению на отдельной площадке, образуемой i -м элементом внутренней поверхности обечайки ролика, определяется по формуле:

$$R_{Xi} = \sum_{j=1}^{i_{\max}} \sigma_{Xij} \Omega_{ij}, \quad (2)$$

где σ_{Xij} — проекция на ось x напряжения σ_{xnj} , нормального к поверхности i -й площадки; Ω_{ij} — площадь j -ой грани i -ой оси.

Так как исследуется трехроlikовая модель роlikоопоры, окончательная формула для определения силы сопротивления примет вид:

$$R_X = \sum_{i=1}^3 R_{Xi}. \quad (3)$$

Проекция σ_{Xij} подставляется в формулу (2) со знаком «+», если направление σ_x совпадает с направлением оси x , т. е. с направлением движения ленты, в противном случае — со знаком «-».

Нормальная площадь контакта определяется по формуле:

$$\Omega_{ij} = l_{грij} b_{кэij} \sin \alpha_{ij}, \quad (4)$$

где $l_{грi}$ — длина внутренней грани вращающейся части ролика; $b_{кэi}$ — ширина i -й площадки (в данном случае $b_{кэi} = 0,01$ м); α_i — угол между осью x и i -й площадкой.

Сопротивление W_i , так же как $W_{срi}$ и $W_{бi}$, является функцией натяжения ленты перед i -й роlikоопорой S_i , скорости движения ленты v и погонной массы груза q (при расчете сопротивлений грузовой ветви). Поскольку натяжения, в свою очередь, зависят от сопротивлений движению, то W_i и S_i определяются в результате решения системы рекуррентных уравнений:

$$\begin{cases} W_i(S_i) = W_{срi}(S_i) + 2W_{бi}(S_i) + W_{врi}; \\ S_{i+1} = S_i + W_i(S_i) + W_{yi,i+1}, \end{cases}$$

где $W_{yi,i+1}$ — сила сопротивления движению ТО от уклона на участке става между i -й и $i+1$ -й роlikоопорами.

При расчетах по типовой методике, как известно, вначале определяются сопротивления движению отдельных участков ТО, которые предполагаются инвариантными к скорости конвейера и уровню натяжений ТО, затем тяговое усилие привода W_0 и на его основании, исходя из логических условий нормального функционирования конвейера, — усилие натяжения S_0 на сбегавшей с привода ветви ТО.

При расчете по предлагаемой методике, как видно из выражения (5), для определения W_i и S_{i+1} необходимо предварительно провести расчет сопротивлений движению на всех роlikоопорах с номерами $j = 1, 2, \dots, i - 1$ последовательно, начиная с $j = 1$. Также, в результате суммирования всех локальных сопротивлений W_i , определяется тяговое усилие W_0 на приводных барабанах. При всем этом необходимо знать исходное натяжение S_0 , которое должно удовлетворять ряду логических условий и рассчитываться на основании W_0 . Такая взаимообусловленность W_0 и S_0 предполагает для их определения решение системы алгебраических уравнений высокого порядка, что сопряжено с трудностями вычислительного харак-

тера. Проблема разрешается в результате применения метода последовательных приближений (метода итераций). При этом исходное значение S_0 рекомендуется определять по типовой методике, хотя оно может задаваться произвольным образом. После первого шага расчета, который заканчивается определением $W_{0,1}$ и $S_{i,1}$ (индекс 1 обозначает первую итерацию), на основании полученных расчетных значений определяется новое, более точное значение $S_{0,1}$, удовлетворяющее условиям допустимого провеса ленты и отсутствия пробуксовки. В случае значительной погрешности проводится второй шаг расчета и т. д. Расчет прекращается при достижении заданной точности ε , т. е. при выполнении условия

$$\frac{|S_{i,k} - S_{i,k-1}|}{S_{i,k-1}} \leq \varepsilon,$$

где k — номер итерации.

Для получения зависимости натяжения грузовой ветви $S(x)$, где x — координатная ось (рис. 4), начало которой (точка O) находится в точке 3 тягового контура, необходимо составить дифференциальное уравнение равновесия элементарного участка ТО с грузом dx , на который вдоль оси x действуют силы натяжения S и $S + dS$, сила dW_y от уклона и сила сопротивления движению dW , определяемые по формулам:

$$dW_y = (q_l + q_r + q'_p)g \sin \beta dx; \quad (5)$$

$$dW = (q_l + q_r + q'_p)gw(x) \cos \beta dx, \quad (6)$$

где q_l , q'_p — погонная масса ленты и приведенная погонная масса вращающихся частей роликов; g — ускорение свободного падения; β — угол установки конвейера; $w(x)$ — коэффициент сопротивления движению ленты с грузом:

$$w(x) = w(S(x), v, q) + w_{вр}, \quad (7)$$

где $w(S(x), v, q)$ — коэффициент сопротивления движению от деформаций ленты и груза, являющийся функцией натяжения ленты, скорости и погонной массы груза; $w_{вр}$ — коэффициент сопротивления движению, возникающего при вращении роликов.

Уравнение статического равновесия элементарного участка dx представляется в виде: $S + dS - S - dW - dW_y = 0$.

Отсюда после подстановки выражений (5) и (6) получим:

$$dS = [(q + q_l + q'_p)gw(x) \cos \beta + (q + q_l) \sin \beta] dx. \quad (8)$$

Выражение $W(S, v)$ удобно применять при обосновании регулирования v или натяжений и v , а выражение $W(S, q)$ — при обосновании регулирования натяжений.

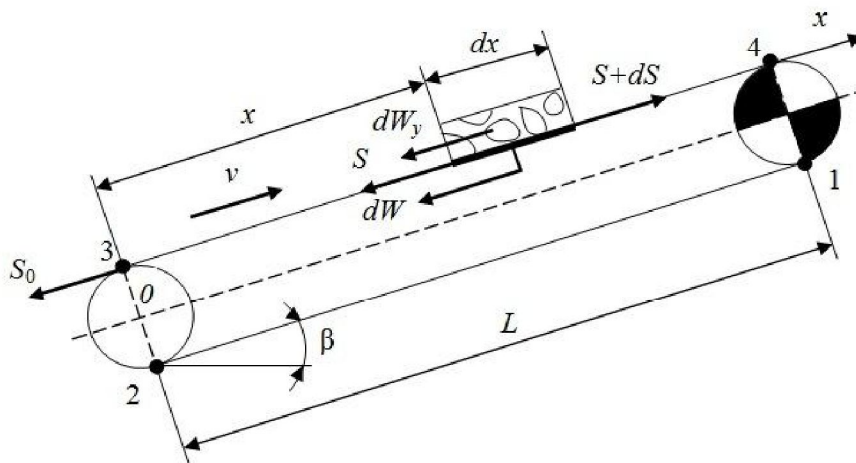


Рисунок 4 Схема конвейера для определения натяжений тягового органа

Значение коэффициента сопротивления движению $w_{вр}$, возникающего при вращении роликов, определяется по формулам, приведенным в работе [5].

Тяговый расчет участкового шахтного конвейера 1Л800Д проводится для следующих параметров: ширина ленты — 800 мм; диаметр роликов — 0,108 м; расстояние между роликоопорами верхней ветви — 1,2 м.

Граничные значения приложенного к торцам ленты растягивающего усилия S — это определяемые в результате тягового расчета наименьшее натяжение грузовой ветви тягового органа порожнего конвейера и, соответственно, максимальное значение натяжения полностью загруженного конвейера. В данном случае для конвейера 1Л800Д длиной 600 м $S_{\min} = 7,5$ кН; $S_{\max} = 37,5$ кН.

Хотя исходные факторы S , v и q , а также величина W при моделировании рассматриваются как детерминированные величины, для обработки исходных данных была применена известная программа STATISTICA, предназначенная для обработки статистических данных и планирования эксперимента с построением регрессионных зависимостей. Планирование двухфакторных компьютерных экспериментов осуществлялось в соответствии с ортогональным центральным композиционным планом второго порядка. При определении зависимостей $W(S, v)$ и $W(S, q)$ варьировались факторы S , v и S , q соответственно. Верхний и нижний уровни фактора S — 37,5 и 7,5 кН; фактора v — 2,5 и 0,5 м/с; фактора q — 70 и 14,58 кг/м.

В результате компьютерного эксперимента получены следующие аналитические зависимости:

при $S = \text{var}$, $v = \text{var}$ и $q = 70$ кг/м

$$W(S, v) = 21,078 - 0,89S + 12,05v - 0,0047Sv + 0,016S^2 + 0,8v^2 \quad (9)$$

при $S = \text{var}$, $q = \text{var}$ и $v = 2$ м/с

$$W(S, q) = 39,98 - 2,01S + 0,48q + 0,002Sq + 0,031S^2 - 0,004q^2. \quad (10)$$

Отсюда после деления на $(q + q_{л} + q'_{п})gl \cos \beta$ получаются коэффициенты сопротивления движению $w(S, v)$ и $w(S, q)$.

Выражение (8) с учетом формул (9) или (10), разделенных на $(q + q_{л} + q'_{п})gl \cos \beta$, представляется в виде:

$$dS = [A(S(x))^2 + BS(x) + C]dx, \quad (11)$$

где, например, при подстановке выражения (9)

$$A = 1,5 \cdot 10^{-6}(q + q_{л} + q'_{п})g \cos \beta;$$

$$B = (-0,93 \cdot 10^{-3}S - 6,6 \cdot 10^{-6}v) \times (q + q_{л} + q'_{п})g \cos \beta$$

$$C = (0,01 + 1,2 \cdot 10^{-2}v + 0,7 \cdot 10^{-3}v^2 + w_{п}) \times (q + q_{л} + q'_{п})g \cos \beta + (q + q_{л})g \sin \beta.$$

Решение дифференциального уравнения (12) методом разделения переменных имеет вид:

$$S(x) = \sqrt{\frac{4AC - B^2}{4A^2}} \operatorname{tg} \left[A \sqrt{\frac{4AC - B^2}{4A^2}} \times \left(x + \frac{1}{A \sqrt{\frac{4AC - B^2}{4A^2}}} \operatorname{arctg} \frac{S_0 + \frac{B}{2A}}{\sqrt{\frac{4AC - B^2}{4A^2}}} \right) \right] - \frac{B}{2A}. \quad (12)$$

В данном случае S_0 — натяжение ТО в точке O (на рисунке 4 — точка 3 тягового контура).

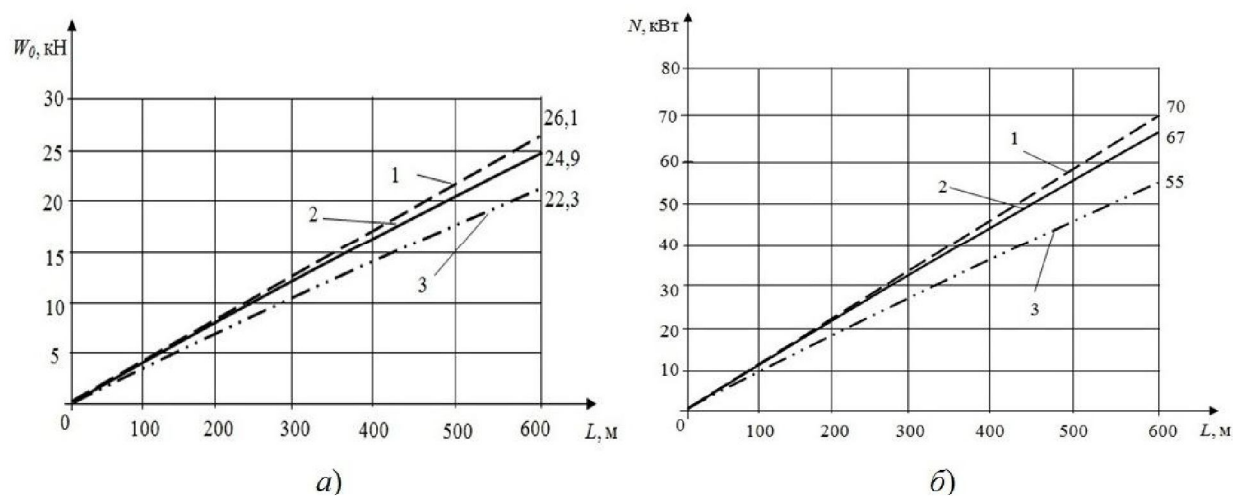


Рисунок 5 Графики зависимости W_0 (а) и мощности привода N (б) от длины конвейера (L):
 1 – по типовой методике; 2 – по уточненной методике (формула (9));
 3 – по уточненной методике (формула (10))

Как показывают расчеты, сопротивление движению порожней ветви ТО $W_{п}$, а затем и S_0 с достаточной точностью могут быть определены по типовой методике.

На рисунке 5 показаны графические зависимости суммарного тягового усилия (W_0), мощности привода (N), рассчитанные по типовой и уточненной методикам, от длины шахтного ленточного конвейера 1Л800Д. Принимались следующие исходные данные: $v = 0,5, 1$ и 2 м/с; $q = 70$ кг/м; $\beta = 0$.

Из анализа зависимостей, полученных по двум методикам, видно, что по мере увеличения L темп возрастания S уменьшается, а, следовательно, W_0 и N — возрастают, что соответствует представлениям о формировании сопротивлений движению на роликоопоре от изгибов ленты и груза.

Характер кривых подтверждает эффективность использования уточненной методики тягового расчета. Как известно, в типовой методике тягового расчета не предусмотрена корректировка расчетного алгоритма, который бы позволил уменьшить величину затрат, связанных с сопротивлением движению. В этом случае величина W_0 задается на стадии проектирования и

больше не меняется. При использовании уточненной методики и регулирования скорости движения ТО удастся снизить максимальную величину W_0 в пределах 4,6–14,5 %, а потребляемую приводом мощность — 4,2–21,4 %.

Если принять во внимание, что применяемый в типовой методике нормативный коэффициент сопротивления движению w , равный 0,04, при заданных расчетных данных обеспечивает достаточно высокую точность расчетов, то такое сравнительно небольшое расхождение расчетных величин, обусловленное нелинейным характером изменения S_i , указывает на адекватность принятой при разработке предлагаемой методики модели ГЛР и правильность расчетов по самой методике.

Выводы и направление дальнейших исследований.

Таким образом, к достоинствам предлагаемой методики следует отнести возможность учитывать влияние режимных параметров, что делает ее эффективным инструментом для обоснования режимов управления натяжением и скоростью конвейера ТО, например, по критерию потребления приводом электрической энергии.

Библиографический список

1. Основные положения по проектированию подземного транспорта для новых и действующих шахт [Текст]. — М. : Минуглепром СССР, 1986. — 356 с.
2. Дмитриев, В. Г. Методика тягового расчета ленточного трубчатого конвейера [Текст] / В. Г. Дмитриев, Н. В. Сергеева // Горный информационно-аналитический бюллетень. — М., 2011. — Вып. 7. — С. 218–228.
3. Долгих, В. П. Моделирование системы «груз–конвейерная лента–роlikоопоры» в программном комплексе ANSYS Workbench [Текст] / В. П. Долгих // Форум горняков 2014: материалы междунар. конф. — Днепропетровск: НГУ, 2014. — С. 121–128.
4. Корнеев, С. В. Коэффициенты модели Муни-Ривлина в пакете программ ANSYS, полученные для обкладочной резины шахтных конвейерных лент [Текст] / С. В. Корнеев, В. П. Долгих // Сборник научных трудов ДонГТУ. — Алчевск, 2014. — Вып. 42. — С. 45–49.
5. Корнеев, С. В. Анализ факторов, определяющих силу сопротивления вращению роликов ленточных конвейеров [Текст] / С. В. Корнеев, В. П. Долгих // Сборник научных трудов ДонГТУ. — Алчевск, 2013. — Вып. 41. — С. 33–36.

© Долгих В. П.

Рекомендована к печати к.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Ульяницким В. Н., к.т.н., зав. каф. ГЭМиТС СУНИГОТ ЛГУ им. Даля Петровым А. Г.

Статья поступила в редакцию 09.01.17.

Долгих В. П. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

МОДЕЛЮВАННЯ ОПОРІВ РУХУ ТЯГОВОГО ОРГАНУ ДІЛЬНИЧНОГО СТРІЧКОВОГО КОНВЕЄРА

На підставі результатів комп'ютерного моделювання опорів руху тягового органу в програмному комплексі ANSYS Workbench була розроблена уточнена методика тягового розрахунку дільничного стрічкового конвеєра. Отримана модель дозволила врахувати фізико-механічні властивості елементів системи «вантаж–стрічка–роlikоопори», конструктивні та режимні параметри конвеєра. Показано, що в результаті застосування моделі елементів системи «вантаж–стрічка–роlikоопори» в програмному комплексі ANSYS Workbench, що відображає напружено-деформовані стани представлених елементів, вдалося підвищити якість розрахунків споживаної приводом потужності та сумарного тягового зусилля.

Ключові слова: стрічковий конвеєр, стрічка, роlikоопора, тяговий розрахунок, комп'ютерна модель, ANSYS Workbench, опір руху, натяг.

Dolgikh V. P. (DonSTU, Alchevsk, LPR)

MODELLING OF RUNNING RESISTANCE OF A TRACTIVE CHAIN OF A LOCAL BELT CONVEYOR

The amended method for tractive calculation of a local belt conveyor has been developed basing on the results of computer modelling the running resistance of a tractive chain using the software package ANSYS Workbench. The obtained model allowed taking into account the physical and mechanical properties of system elements «load-belt-roller carriage», design and regime factors of conveyor. It is proved that usage of partial model of system elements «load-belt-roller carriage» in the software package ANSYS Workbench illustrating the stress-strain state of given elements resulted in improving the quality of calculations for power drive supply and gross tractive effort.

Key words: belt conveyor, belt, roller carriage, draft calculations, computer model, ANSYS Workbench, running resistance, tension.