

# РАЗДЕЛ I. ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.867

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ ПРИВОДНОЙ ПОДВЕСКИ КОНВЕЙЕРА С ПОДВЕСНОЙ ЛЕНТОЙ И РАСПРЕДЕЛЕННЫМ ПРИВОДОМ

*П.В. Бословяк<sup>1</sup>, Е.Н. Толкачев<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «МГТУ имени Н.Э. Баумана», г. Москва, Россия;*

*<sup>2</sup>ЗАО «Брянский Арсенал», г. Брянск, Россия*

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Статья посвящена актуальному вопросу, связанному с оптимизацией металлоконструкции приводных подвесок конвейера с подвесной лентой и распределенным приводом. В работе кратко отражаются текущие направления научно-исследовательской и проектно-конструкторской работы, проводимой в области разработки конвейеров с подвесной лентой и распределенным приводом.

**Методы и материалы.** Главное внимание сосредоточено на конструкции приводных подвесок конвейера, условиях работоспособности, заключающихся в обеспечении достаточной тяги и сцепления, а также недостатках существующих конструкций роликовых подвесок. Представлено оригинальное техническое решение роликовой подвески, оборудованной индивидуальным приводом в виде мотор-редуктора и устройством прижатия ведущего ролика, описаны ее главные преимущества.

**Результаты.** Авторами разработана и представлена математическая модель, позволяющая выполнить оптимизацию металлоконструкции одного из наиболее металлоемких элементов – несущей секции приводной подвески с учетом конструктивных, прочностных и жесткостных ограничений.

**Обсуждение.** Рассмотрена реализация предложенной математической модели: на примере базовой конструкции конвейера выполнены расчеты напряженно-деформированного состояния металлоконструкции приводной подвески. Установлено, что базовая приводная подвеска обладает избыточной прочностью, массой и превышенными геометрическими параметрами стержней.

**Заключение.** Сделан вывод о необходимости проведения многокритериальной оптимизации металлоконструкции приводной подвески, а также исследования влияния параметров конфигурации приводной подвески на ее массогабаритные характеристики.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ленточный конвейер, математическая модель, подвесная лента, подвеска, оптимальное проектирование, распределенный привод, рациональные параметры, система ограничений.

### ВВЕДЕНИЕ

Нынешние тенденции развития конвейерного транспорта предполагают разработку экономически-эффективных, высокопроизводительных, надежных машин, обеспечивающих бесперегрузочное транспортирование

грузов по трассам различной сложности и протяженности [1]. Достаточно современным, разработанным и испытанным в производственных условиях в начале текущего века является конвейер с подвесной лентой (КПЛ) [2]. Отличающийся оригинальной конструк-

цией, сочетающей конструктивные признаки классических ленточных конвейеров и рельсового транспорта, он обладает рядом неотъемлемых преимуществ [3], выявленных за продолжительное время эксплуатации. Тем не менее жесткие замкнутые направляющие качения, длину которых сложно изменять в процессе работы конвейера, создают определенные трудности регулирования натяжения конвейерной ленты и установки промежуточного привода на трассе, что в совокупности накладывает ограничение на протяженность конвейерной установки.

Решение обозначенной проблемы появилось с разработкой новой конструкции конвейера с принципиально переработанной кинематической схемой. КПЛ с распределенным приводом не имеет стационарно сосредоточенных приводной и натяжной станций и отличается тем, что определенная часть подвесок оборудована встроенными индивидуальными приводными механизмами, которые получают питание от электрического шинпровода и обеспечивают перемещение грузонесущей ленты [4]. Конструкция КПЛ с распределенным приводом к настоящему времени частично реализована в виде экспериментального стенда [5]. Отдельными научными работниками осуществляется проектно-конструкторская проработка возможных технических решений, а также проводятся научно-исследовательские работы. Так, к настоящему времени известны некоторые варианты исполнения конвейеров, привод которых работает по распределенной схеме [4; 6, 7, 8]. Методика приближенного расчета [4], составленные математические модели структурной группы – подвесок дискретного участка [6, 9] и всего КПЛ с распределенным приводом [8, 10, 11], а также результаты исследования некоторых рациональных конструктивных параметров [12, 13, 14] представлены в ранних научных публикациях.

Особую роль в конструкции КПЛ с распределенным приводом играют роликовые подвески: приводные и неприводные. С одной стороны, они являются основными несущими элементами, удерживающими ленту с грузом в подвешенном между симметричных замкнутых направляющих качения положении, и служат для перемещения по соответствующим направляющим вдоль трассы. С другой – осуществляют тяговую функцию посредством приведения механической системы в движение ведущими подвесками, оборудованными индивидуальными приводными механизмами. Следовательно, особенностями конструкции и совокупностью технических характеристик

подвесок определяется работоспособность всей конвейерной установки.

Пространственная конфигурация, конструктивные особенности, геометрические параметры подвесок определяются формой и размерами поперечного сечения направляющих качения. К настоящему времени известно широкое разнообразие конструкций подвесок КПЛ [2, 13, 15], отличающихся конфигурацией несущей металлоконструкции (МК), количеством и типом роликов, видом привода, исполнением узла крепления ленты. Тем не менее значительная часть представленных подвесок обладает следующими недостатками: не предназначены для использования в конвейере с вертикально-замкнутой конфигурацией трассы; отличаются сложностью используемого профиля направляющих качения; не обладают достаточной устойчивостью к перекосам; не обеспечивают качественного сцепления приводного ролика с направляющей качения; не предусматривают оснащения конструкции встроенным индивидуальным приводом.

Учитывая, что тяговое усилие приводных подвесок КПЛ с распределенным приводом реализуется посредством фрикционной передачи от ведущего ролика направляющей качения, то для передвижения без проскальзывания ведущего ролика важно обеспечить его качественное и надежное сцепление с поверхностью ходового пути. Поэтому существующий ряд конструктивных исполнений подвесок дополняется новыми техническими решениями.

Так, коллективом авторов была разработана конструкция приводной подвески КПЛ с распределенным приводом, используемая в сочетании с направляющими качения прямоугольной формы поперечного сечения (см. рисунок 1) [13]. В совокупности такая геометрическая конфигурация способствует сохранению устойчивости подвески к угловым перекосам на всем протяжении трассы. Вертикальная пространственная ориентация ведущего ролика исключает возможное повышение сопротивления от сил трения скольжения, действующих на концевых поворотных участках, в случае его горизонтального расположения. Двухсекционное устройство ведущих подвесок позволяет распределить основную нагрузку от ленты и транспортируемого груза между элементами несущей секции (НС). При этом нагрузка от массы прижимной секции и усилия пружин устройства прижатия ведущего ролика подвески воспринимается подшипниковыми опорами, а радиальная нагрузка на элементы мотор-редуктора исключается. Кро-

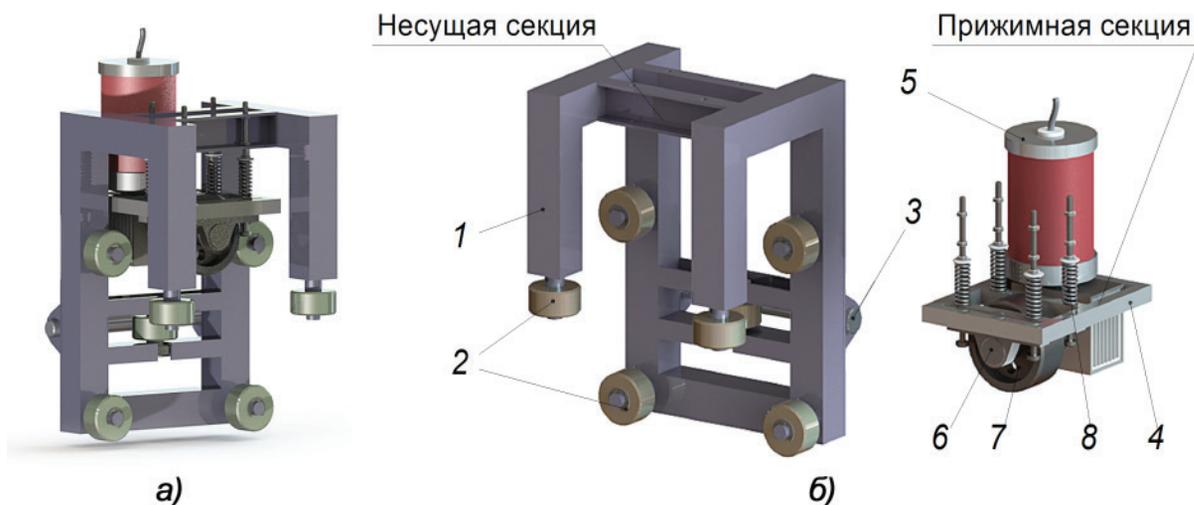


Рисунок 1 – Приводная подвеска конвейера с подвесной лентой и распределенным приводом:

а – общий вид; б – компоновочная схема;

1 – металлоконструкция несущей секции;

2 – холостые ролики; 3 – ось узла крепления ленты; 4 – металлоконструкция прижимной секции;

5 – мотор-редуктор; 6 – подшипниковые роликоопоры; 7 – приводной ролик; 8 – прижимное устройство

Figure 1 – Drive suspension of conveyor with hanging belt and distributed drive:

a – is a general view; b – layout scheme;

1 – metal structure of the bearing section; 2 – idler rollers; 3 – the axis of the fastening point of the tape;

4 – metal clamping of the clamping section; 5 – motor-reducer; 6 – bearing rollers; 7 – a driving roller; 8 – clamping device

ме того, расположение привода в отдельной секции, оборудованной прижимным устройством, обеспечивает качественное сцепление ведущего ролика с направляющей качения на всем протяжении трассы, в особенности при движении по холостой ветви, когда подвески перевернуты.

Исследования влияния конструктивных параметров подвесок на динамические характеристики конвейера показали, что масса приводных подвесок имеет существенное значение, в особенности при увеличении их количества на трассе [12, 14]. Поэтому достаточно актуальной является задача минимизации массы при обеспечении оптимального сочетания ее геометрических параметров, сохранении прочности и жесткости конструкции. Проанализируем напряженно-деформируемое состояние МК НС приводной подвески КПЛ с распределенным приводом, а также сформируем математическую модель для проведения последующей оптимизации.

## МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

На начальном этапе разработки методики оптимального проектирования МК НС приводной подвески КПЛ с распределенным приводом была сформирована структурная схема (см. рисунок 2).

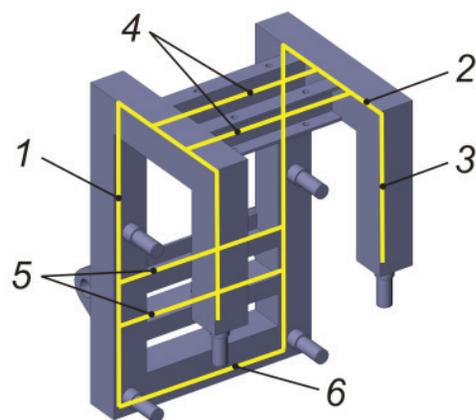


Рисунок 2 – Структурная схема металлоконструкции

неприводной секции приводной подвески конвейера

с подвесной лентой и распределенным приводом

Figure 2 – Structural diagram of the steel structure of the

non-drive section of the drive suspension of the conveyor

with hanging belt and distributed drive

Металлоконструкция НС приводной подвески состоит из стержней трех групп: продольных (4, 5, 6); поперечных (2); вертикальных (1, 3). Масса НС приводной подвески КПЛ с распределенным приводом определяется зависимостью

$$m_{II} = 2 \left( m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5 + \frac{m_6}{2} \right) \quad (1)$$

Масса отдельного стержня МК НС приводной подвески зависит от геометрических размеров профиля поперечного сечения. Возможные профили стержней и расчетные зависимости для нахождения их масс представлены в таблице 1.

Конвейер с подвесной лентой с распределенным приводом может иметь трассу произвольной протяженности, сложности и конфигурации, содержащей прямолинейные, наклонные и поворотные участки. Проанализировав ключевые положения приводной подвески на трассе, были выявлены возможные расчетные случаи и действующие нагрузки на МК НС приводной подвески (см. рисунок 3).

Конфигурация МК НС приводной подвески КПЛ с распределенным приводом характеризуется совокупностью значений – геометрическими характеристиками ее отдельных конструктивных элементов (размерами поперечного сечения и длинами стержней МК). Часть из них остается не измененной в ходе поиска оптимального результата, т.к. в процессе оптимизации этими параметрами либо невозможно, либо нецелесообразно управлять. К числу таких характеристик относятся

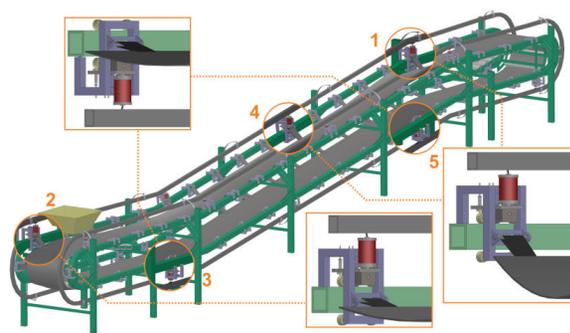


Рисунок 3 – Ключевые положения приводной подвески на трассе:

- 1 – на горизонтальном участке грузовой ветви с желобчатой поперечной формой ленты;
  - 2 – на горизонтальном участке грузовой ветви с выположенной поперечной формой ленты;
  - 3 – на горизонтальном участке холостой ветви с выположенной поперечной формой ленты;
  - 4 – на наклонном участке грузовой ветви с желобчатой поперечной поперечного сечения ленты;
  - 5 – на наклонном участке холостой ветви с выположенной поперечной формой ленты
- Figure 3 – Key positions of the drive suspension on the track:
- 1 – on the horizontal section of the freight branch with a grooved transverse belt shape;
  - 2 – on the horizontal section of the freight branch with the transverse belt shape installed;
  - 3 – on the horizontal section of the idle branch with the transverse form of the belt installed;
  - 4 – on an inclined section of a freight branch with a grooved cross-section of the belt;
  - 5 – on the inclined section of the idle branch with the transverse form of the belt

Таблица 1  
ФОРМУЛЫ ДЛЯ РАСЧЕТА МАССЫ МК НС ПРИВОДНОЙ ПОДВЕСКИ [17]

Table 1  
FORMULAS FOR CALCULATING MASSES OF MK NA DRIVE SUSPENSION [17]

Деталь МК подвески	Масса детали МК при форме поперечного сечения в виде					
	прямоугольной трубы	швеллера	уголка	круглой трубы	круглого сечения	прямоугольного сечения
Вертикальный стержень 1	$2\rho_1 l_1 t_1 (a_1 + b_1 - 2t_1)$	$\rho_1 l_1 [e_1 (d_1 - 2f_1) + 2c_1 f_1]$	$\rho_1 l_1 s_1 (h_1 + g_1 - s_1)$	$\pi \rho_1 l_1 k_1 (D_1 - k_1)$	$\pi \rho_1 l_1 E_1^2 / 2$	$\pi \rho_1 l_1 u_6 w_6$
Поперечный стержень 2	$2\rho_2 l_2 t_2 (a_2 + b_2 - 2t_2)$	$\rho_2 l_2 [e_2 (d_2 - 2f_2) + 2c_2 f_2]$	$\rho_2 l_2 s_2 (h_2 + g_2 - s_2)$	$\pi \rho_2 l_2 k_2 (D_2 - k_2)$	$\pi \rho_2 l_2 E_2^2 / 2$	$\pi \rho_2 l_2 u_6 w_6$
Вертикальный стержень 3	$2\rho_3 l_3 t_3 (a_3 + b_3 - 2t_3)$	$\rho_3 l_3 [e_3 (d_3 - 2f_3) + 2c_3 f_3]$	$\rho_3 l_3 s_3 (h_3 + g_3 - s_3)$	$\pi \rho_3 l_3 k_3 (D_3 - k_3)$	$\pi \rho_3 l_3 E_3^2 / 2$	$\pi \rho_3 l_3 u_6 w_6$
Продольный стержень 4	–	$\rho_4 l_4 [e_4 (d_4 - 2f_4) + 2c_4 f_4]$	$\rho_4 l_4 s_4 (h_4 + g_4 - s_4)$	–	–	–
Продольный стержень 5	–	$\rho_5 l_5 [e_5 (d_5 - 2f_5) + 2c_5 f_5]$	$\rho_5 l_5 s_5 (h_5 + g_5 - s_5)$	–	–	–
Продольный стержень 6	$2\rho_6 l_6 t_6 (a_6 + b_6 - 2t_6)$	$\rho_6 l_6 [e_6 (d_6 - 2f_6) + 2c_6 f_6]$	$\rho_6 l_6 s_6 (h_6 + g_6 - s_6)$	$\pi \rho_6 l_6 k_6 (D_6 - k_6)$	$\pi \rho_6 l_6 E_6^2 / 2$	$\pi \rho_6 l_6 u_6 w_6$

Здесь  $\rho_i$  – плотность материала детали;  $l_i$  – длина  $i$ -го конструктивного элемента металлоконструкции (рисунок 2);  $a, b$  – стороны прямоугольной трубы;  $t$  – толщина стенки прямоугольной трубы;  $d$  – высота швеллера;  $c, f$  – ширина полки швеллера;  $e, f$  – толщина стенки и полки швеллера;  $s$  – толщина полки уголка;  $h, g$  – ширина большей и меньшей полки уголка;  $k$  – толщина стенки круглой трубы;  $D$  – наружный диаметр круглой трубы;  $E$  – диаметр круглого сечения;  $u, w$  – стороны прямоугольного сечения

те, которые либо определяются другими параметрами металлоконструкции, либо уже определены на предыдущих этапах расчета или указаны в техническом задании на проектирование. К параметрам, которые необходимо учитывать при расчете и проектировании МК и которыми невозможно управлять, относятся также эксплуатационные нагрузки, режимы и условия работы, определяемые техническим заданием на проектирование конвейера [17].

Помимо неуправляемых существуют управляемые параметры, которыми возможно варьировать для поиска оптимального результата. Из них формируется вектор неизвестных размеров  $\{x\}$ , подлежащих определению в процессе оптимизации. Вектор управляемых  $\{x\}$  и вектор неуправляемых  $\{z\}$  параметров полностью определяют геометрические характеристики оптимальной МК НС приводной подвески.

Постановка задачи условной параметрической оптимизации МК НС приводной подвески КПЛ с распределенным приводом заключается в подборе таких варьируемых параметров, при которых масса МК НС приводной подвески получается минимальной при соблюдении конструктивных, прочностных и жесткостных ограничений. Составляется математическая модель, включающая целевую функцию (2), с накладываемой на нее системой ограничений (3), (4), (5).

$$Ц(\{x\}, \{z\}) \rightarrow \min; \quad (2)$$

$$e_m(\{x\}, \{z\}) \geq 0, (m=1, \dots, M); \quad (3)$$

$$f_n(\{x\}, \{z\}) \geq 0, (n=1, \dots, N); \quad (4)$$

$$g_p(\{x\}, \{z\}) \geq 0, (p=1, \dots, P), \quad (5)$$

где  $Ц$  – целевая функция (масса МК НС приводной подвески);  $e_m, f_n, g_p$  – системы конструктивных, прочностных и жесткостных ограничений соответственно.

В ходе процедуры оптимального проектирования МК НС приводной подвески конвейера проверяется по первой и второй группам предельного состояния.

В целевой функции МК НС приводной подвески реализована возможность учета форм поперечных сечений стержней из широкого ряда стандартных профилей (см. таблицу 1). Посредством коэффициента  $j_i$  учитывается наличие ( $j_i = 1$ ) или отсутствие ( $j_i = 0$ ) профиля

поперечного сечения  $i$ -й детали в МК НС приводной подвески.

Вектор варьируемых (управляемых) параметров имеет вид

$$\{x\}^T = \{x_1, x_2, \dots, x_{vi}\} = \{t, t, t, t, a, a, a, a, b, b, b, b, e, e, \dots, e_6, d_1, d_2, \dots, d_6, f, f, \dots, f, c, c, \dots, c, s, s, \dots, s, h, h, \dots, h, g, g, \dots, g, k, k, \dots, k, D, D, D, D, E, E, E, E, u, u, u, u, w, w, w, w\}, \quad (6)$$

где  $vi$  – количество управляемых параметров МК НС приводной подвески.

Длины стержней 1, 2, 3 зависят от геометрических размеров профиля поперечного сечения направляющей качения (прямоугольной трубы), по которой перемещается подвеска. Продольные стержни 4, 5, 6 зависят от геометрических параметров прижимной секции, в частности от диаметра приводного ролика и габаритных размеров мотор-редуктора.

В связи с этим вектор неуправляемых параметров имеет вид

$$\{z\}^T = \{z_1, z_2, z_3, z_4, z_5, z_6\} = \{l_1^r, l_2^r, l_3^r, l_4^r, l_5^r, l_6^r\}. \quad (7)$$

Задача оптимизации металлоконструкции подвески конвейера с подвесной лентой и распределенным приводом с учетом варьируемых (6) и неуправляемых (7) параметров заключается в минимизации целевой функции вида

$$\begin{aligned} Ц(\{x^r\}, \{z^r\}) = & j_1^n 2\rho_1 z_1^n x_1^n (x_2^n + x_3^n - 2x_1^n) + \\ & + j_1^w \rho_1 z_1^w [x_1^w (x_2^w - 2x_3^w) + 2x_4^w x_3^w] + \\ & + j_1^y \rho_1 z_1^y x_1^y (x_2^y + x_3^y - x_1^y) + \\ & + j_1^{kc} \rho_1 z_1^{kc} x_1^{kc} (x_2^{kc} - x_1^{kc}) + j_1^{kc} \rho_1 z_1^{kc} (x_1^{kc})^2 / 2 + \\ & + j_1^{nc} \rho_1 z_1^{nc} x_1^{nc} x_2^{nc} + \{j_2^n 2\rho_2 z_2^n x_4^n (x_5^n + x_6^n - 2x_4^n) + \\ & + j_2^w \rho_2 z_2^w [x_5^w (x_6^w - 2x_7^w) + 2x_8^w x_7^w] + \\ & + j_2^y \rho_2 z_2^y x_4^y (x_5^y + x_6^y - x_4^y) + j_2^{kc} \rho_2 z_2^{kc} x_3^{kc} (x_4^{kc} - x_3^{kc}) + \\ & + j_2^{nc} \rho_2 z_2^{nc} (x_2^{nc})^2 / 2 + j_2^{nc} \rho_2 z_2^{nc} x_3^{nc} x_4^{nc}\} + \\ & + \{j_3^n 2\rho_3 z_3^n x_7^n (x_8^n + x_9^n - 2x_7^n) + \\ & + j_3^w \rho_3 z_3^w [x_9^w (x_{10}^w - 2x_{11}^w) + 2x_{12}^w x_{11}^w] + \\ & + j_3^y \rho_3 z_3^y x_7^y (x_8^y + x_9^y - x_7^y) + j_3^{kc} \rho_3 z_3^{kc} x_5^{kc} (x_6^{kc} - x_5^{kc}) + \\ & + j_3^{nc} \rho_3 z_3^{nc} (x_3^{nc})^2 / 2 + j_3^{nc} \rho_3 z_3^{nc} x_5^{nc} x_6^{nc}\} + \\ & + \{j_4^w \rho_4 z_4^w [x_{13}^w (x_{14}^w - 2x_{15}^w) + 2x_{16}^w x_{15}^w] + \\ & + j_4^y \rho_4 z_4^y x_{10}^y (x_{11}^y + x_{12}^y - x_{10}^y)\} + \\ & + \{j_5^w \rho_5 z_5^w [x_{17}^w (x_{18}^w - 2x_{19}^w) + 2x_{20}^w x_{19}^w] + \\ & + j_5^y \rho_5 z_5^y x_{13}^y (x_{14}^y + x_{15}^y - x_{13}^y)\} + \\ & + \{j_6^n 2\rho_6 z_6^n x_{10}^n (x_{11}^n + x_{12}^n - 2x_{10}^n) + \\ & + j_6^w \rho_6 z_6^w [x_{13}^w (x_{15}^w - 2x_{15}^w) + 2x_{16}^w x_{15}^w] + \\ & + j_6^y \rho_6 z_6^y x_{10}^y (x_{11}^y + x_{12}^y - x_{10}^y) + j_6^{kc} \rho_6 z_6^{kc} x_7^{kc} (x_8^{kc} - x_7^{kc}) + \\ & + j_6^{nc} \rho_6 z_6^{nc} (x_4^{nc})^2 / 2 + j_6^{nc} \rho_6 z_6^{nc} x_7^{nc} x_8^{nc}\}, \quad (8) \end{aligned}$$

где  $r$  – показатель формы поперечного сечения ( $r = п$  – прямоугольная труба;  $r = ш$  – швеллер;  $r = y$  – уголок;  $r = k$  – круглая труба;  $r = kc$  – круглое сечение;  $r = nc$  – прямоугольное сечение);  $i$  – элемент узла МК [17].

Конструктивными ограничениями  $e_m$ , на-

кладываемыми на целевую функцию  $C(\{x\}, \{z\})$ , являются геометрические соотношения, связанные с размерами элементов МК НС приводной подвески. Для оптимизируемой конструкции подвески необходимо выполнить ограничения на длины:

– вертикальных стержней  $l_1$ , которые должны быть больше либо равными сумме высоты  $H_{пу}$  устройства прижатия приводного ролика, половины диаметра  $D_{пр}$  приводного ролика, высоты  $H_{нк}$  прямоугольной трубы направляющей качения, конструктивного зазора  $l_3$  между холостым роликом и направляющей качения, половины диаметра холостого ролика  $d_x$ :

$$l_1 - H_{пу} - 0,5D_{пр} - H_{нк} - l_3 - 0,5d_x \geq 0; \quad (9)$$

– поперечных стержней  $l_2$ , которые должны быть больше либо равными сумме ширины профиля поперечного сечения  $B_{нк}$  прямоугольной трубы направляющей качения, диаметра холостого ролика  $d_x$ , конструктивного зазора  $l_3$  между холостым роликом и направляющей качения:

$$l_2 - B_{нк} - d_x - l_3 \geq 0; \quad (10)$$

– вертикальных стержней  $l_3$ , которые должны быть больше либо равными сумме высоты  $H_{пу}$  устройства прижатия приводного ролика, половины диаметра  $D_{пр}$  приводного ролика и половине ширины холостого ролика  $b_x$ :

$$l_3 - H_{пу} - 0,5D_{пр} - 0,5b_x \geq 0; \quad (11)$$

– продольных стержней  $l_4, l_5$  и  $l_6$ , которые должны быть больше диаметра  $D_{пр}$  приводного ролика подвески:

$$l_4 - D_{пр} > 0, l_5 - D_{пр} > 0, l_6 - D_{пр} > 0, \quad (12)$$

где  $l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6$  – длины стержней 1, 2, 3, 4, 5 и 6 соответственно;  $H_{пу}$  – устройства прижатия приводного ролика;  $D_{пр}$  – диаметр приводного ролика;  $d_x$  – диаметр холостого ролика;  $b_x$  – ширина холостого ролика;  $H_{нк}$  – высота прямоугольной трубы направляющей качения;  $B_{нк}$  – ширина прямоугольной трубы направляющей качения;  $l_3$  – конструктивный зазор между холостым роликом и направляющей качения.

Помимо разработанных конструктивных ограничений, связанных с длинами стержневых элементов, необходимо выполнение условия соответствия размеров поперечных сечений стержней, приведенным в ГОСТе для используемого профиля.

Прочностные ограничения  $f_n$  учитывают условия [17, 18].

Жесткостные ограничения заключаются в сохранении величин прогибов  $f$  стержневых элементов 1-6 МК НС приводной подвески ниже предельных значений  $f_u$  [17, 19].

Процедура оптимального проектирования МК НС приводной подвески КПЛ с распределенным приводом реализуется посредством разработанной целевой функции (8) совместно с системами ограничений (9), (10), (11), (12), (13), (14), (15), (16), (17) при использовании программного комплекса Siemens NX.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Проанализируем напряженно-деформированное состояние (НДС) МК НС приводной подвески, расположенной на трассе в расчетном положении 1 (см. рисунок 3) и имеющей технические характеристики, приведенные в таблице 2. Кроме того на основе разработанной математической модели при использовании программного комплекса Siemens NX выполним оптимизацию МК НС приводной подвески с сохранением компоновки и длин стержней.

Таблица 2  
ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА НДС И ОПТИМИЗАЦИИ МК НС ПРИВОДНОЙ ПОДВЕСКИ  
Table 2  
CALCULATION DATA OF VAT AND OPTIMIZATION OF MK NA DRIVE SUSPENSION

Обозначение	Техническая характеристика	Величина	Единица измерения
$Q_p$	Производительность	200	т/ч
$\rho$	Объемная плотность транспортируемого груза	1,4	т/м <sup>3</sup>
$\varphi$	Угол естественного откоса груза	45	град
$v_{zp}$	Скорость транспортирования расчетная	0,2	м/с
$h_n$	Шаг установки подвесок на трассе	1,4	м
$L_{\%}$	Расстояние между точками подвеса ленты, рассчитанное по зависимости [13, 20]	0,827	м

Обозначение	Техническая характеристика	Величина	Единица измерения
$F_{\%}$	Площадь поперечного сечения в относительных единицах, рассчитанная по зависимости [13, 20]	0,236	–
$B$	Ширина ленты [13, 21]	1,4	м
$q_l$	Распределенная нагрузка от ленты [13, 21]	150	Н/м
$q_{гр}$	Распределенная нагрузка от груза [13, 21]	2725	Н/м
$\beta$	Угол наклона к горизонту бортов ленты, рассчитанный по зависимости [13, 20]	40,79	град
$T$	Усилие, приложенное к приводной подвеске со стороны ленты и транспортируемого груза [13]	3000	Н
$F_{np}$	Сила прижатия прижимного устройства приводной подвески	200	Н

На начальном этапе сформирована каркасная модель МК НС приводной подвески (см. рисунок 4), которая преобразовывается в конечно-элементную модель (см. рисунок 5). Каждому стержневому элементу МК НС приводной подвески присвоено определенное поперечное сечение в зависимости от выбранного типа профиля.

Затем выполнена проработка конечно-элементной модели. Выбран материал (конструкционная низколегированная сталь для сварных конструкций 09Г2С) и определена собственная масса стержневых элементов

МК НС приводной подвески. Допускаемые напряжения с учетом коэффициента запаса при расчете приняты равными 230 МПа. Указаны места приложения и направления действия нагрузок со стороны ленты с грузом  $T$ , а также силы от устройства прижатия приводного ролика  $F_{np}$  к направляющей. Заданы точки закрепления (см. рисунок 4) МК НС приводной подвески в местах условного контакта опорных роликов с направляющей качения, ограничивающие ее перемещения: в точках  $A$  и  $B$  линейное вдоль оси  $OZ$ ; в точке  $C$  и  $D$  линейное вдоль оси  $OX$ .

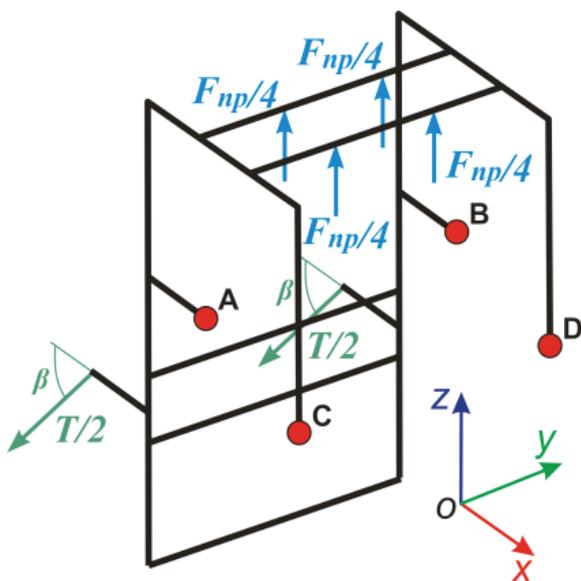


Рисунок 4 – Расчетная схема металлоконструкции неприводной секции приводной подвески конвейера с подвесной лентой и распределенным приводом  
 Figure 4 – Calculation diagram of the steel structure of the non-drive section of the drive suspension of the conveyor with hanging belt and distributed drive

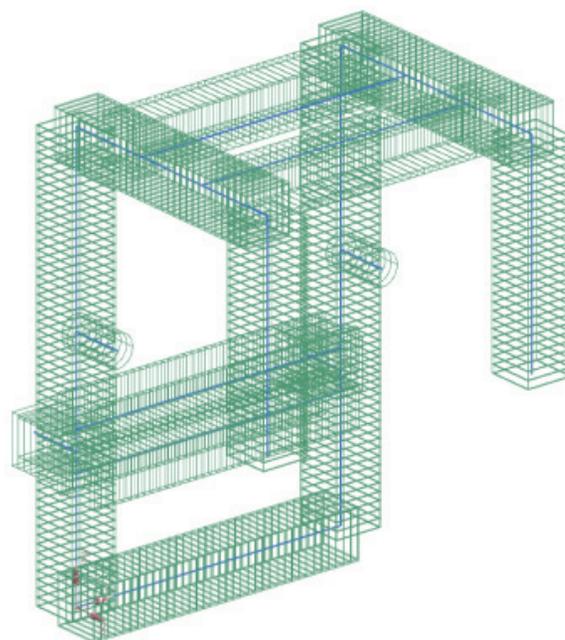


Рисунок 5 – Конечно-элементная модель металлоконструкции неприводной секции приводной подвески конвейера с подвесной лентой и распределенным приводом  
 Figure 5 – Finite element model of the metal structure of the non-drive section of the drive suspension of a conveyor with hanging belt and distributed drive

Таблица 3  
РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ  
И ОПТИМИЗАЦИИ МАССЫ МК НС ПРИВОДНОЙ ПОДВЕСКИ КПЛ  
С РАСПРЕДЕЛЕННЫМ ПРИВОДОМ

Table 3  
CALCULATION RESULTS OF THE STRESS-DEFORMED CONDITION  
AND OPTIMIZATION OF THE MASS MK NA DRIVING SUSPENSION KPL  
WITH DISTRIBUTED DRIVE

Вариант МК НС приводной подвески	Профиль поперечного сечения, мм	Максимальные напряжения, МПа	Масса МК, кг
Исходный	Квадратная труба 30×30×0,8; Швеллер стальной гнутый равнополочный 30×25×3	142,96	2,6
Оптимальный	Квадратная труба 25×25×0,8; Швеллер стальной гнутый равнополочный 25×26×2	207,11	2,0

После чего произведен расчет напряженно-деформированных состояний исходного варианта МК НС приводной подвески и варианта, полученного в результате осуществления процедуры оптимизации. Полученные результаты, а также типоразмеры профилей, используемых в исходном и оптимальном вариантах МК НС приводной подвески, сведены в таблицу 3.

### ОБСУЖДЕНИЕ

В исходном варианте МК НС приводной подвески (см. рисунок 6, а) наибольшие напряжения возникают в стержнях 2 и имеют максимум, равный 142,96 МПа, в месте сочленения с вертикальными стержнями 1. Напряжения в стержнях 1 и 3 одинаковы и убывают от 131,05 МПа до 11,92 МПа. В целом МК НС приводной подвески при исходных геометри-

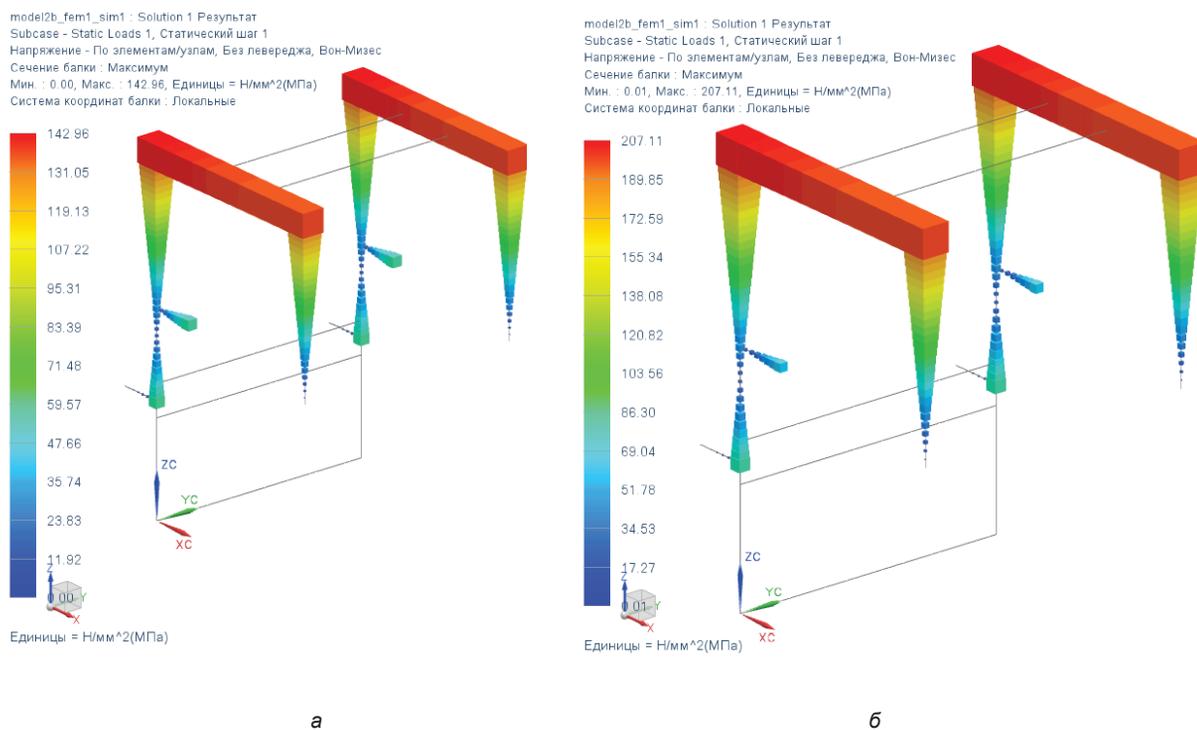


Рисунок 6 – Распределение напряжений в металлоконструкции неприводной секции приводной подвески:  
а – исходного варианта; б – после оптимизации  
Figure 6 – Stress distribution in the steel structure of the non-drive section of the drive suspension:  
a – the original version; b – after optimization

ческих размерах обладает большим запасом прочности, который ввиду особенностей конструкции КПЛ с распределенным приводом можно считать излишним, поскольку избыточная масса подвесок обуславливает более высокие сопротивления движению и рост динамических нагрузок на конвейерную ленту в процессе работы.

Вариант МК НС приводной подвески, полученный в результате процедуры оптимизации, имеет аналогичный характер распределения напряжений в стержнях (см. рисунок 6, б). Максимальные напряжения составляют 207,11 МПа. Таким образом, из сравнительного анализа вариантов МК НС приводной подвески следует, что ее масса в результате оптимизации поперечных сечений стержней каркаса снизилась на 23% относительно массы неоптимизированной МК приводной подвески.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная математическая модель, включающая целевую функцию и накладываемые на нее системы конструктивных, прочностных и жесткостных ограничений, позволяет осуществлять процедуру оптимального проектирования МК НС приводной подвески КПЛ с распределенным приводом.

В результате расчета типового варианта МК НС приводной подвески КПЛ с распределенным приводом установлено, что подвеска обладает избыточной прочностью, массой и превышенными геометрическими параметрами стержней. Оптимизация только лишь по размерам поперечных сечений используемых профилей позволила сократить массу подвески на 23% относительно массы неоптимизированной МК подвески с обеспечением необходимого запаса прочности. Расчетным путем подтверждена необходимость проведения многокритериальной оптимизации МК приводной подвески с учетом конструктивных, прочностных и жесткостных ограничений. Поэтому дальнейшая научно-исследовательская работа будет направлена на исследование влияния геометрических параметров (длин и поперечных сечений) стержней МК, взаимного расположения опорных элементов конструкции (мест крепления роликов) и точек приложения внешних сил (усилий от грузонесущей ленты и пружин устройства прижатия приводного ролика к направляющей качения) на массогабаритные параметры МК приводной подвески с учетом сохранения прочности и жесткости в установленных пределах значений.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пертен Ю.А. Конвейерный транспорт XXI века // Транспорт российской федерации. 2005. № 1. С. 42 – 43.
2. Аверченков В.И., Ивченко В.Н., Дунаев В.П. [и др.] Конвейеры с подвесной лентой / под общ. ред. проф. В.И. Аверченкова. М.: Машиностроение-1, 2004. 256 с.
3. Ивченко В.Н., Куров С.В. Юбилей российского беспросыпного ленточного конвейера с подвесной лентой // Горная промышленность. 2007. № 4 (74). С. 76 – 77.
4. Лагереv А.В., Дунаев В.П. Конвейеры с подвесной грузонесущей лентой – инновационный вид машин непрерывного транспорта // Справочник. Инженерный журнал, 2009. № 10. С. 9 – 14.
5. Гончаров К.А., Бословяк П.В., Кулешов Д.Ю. Экспериментальный стенд для исследования движения дискретного участка ленточного конвейера с подвесной лентой и распределенным приводом // Достижения молодых ученых в развитии инновационных процессов в экономике, науке, образовании: материалы IV международной научно-практической конференции / под ред. И.А. Лагерева. Брянск: БГТУ, 2012. 14 с.
6. Лагереv А.В., Толкачев Е.Н. Исследование движения подвесок дискретного участка конвейера с подвесной лентой, распределенным приводом и вертикально замкнутой трассой с помощью одномассовой динамической модели // Вестн. Брян. гос. техн. ун-та. 2013. № 4. С. 33 – 40.
7. Кулешов Д.Ю. Подвесной пространственный горизонтально замкнутый ленточный конвейер // Достижения молодых ученых Брянской области: Материалы Региональной научной конференции студентов и аспирантов / под ред. И.А. Лагерева. Брянск: БГТУ, 2010. С. 29 – 31.
8. Lagerev A.V., Tolkachev E.N., Lagerev I.A. Modelling of a Vertical Loop Conveyor with Suspended Belt and Distributed Drive // International Review on Modelling and Simulations. 2016, Vol. 9, no. 4, pp. 271 – 279.
9. Толкачев Е.Н. Анализ динамики подвесок дискретного участка конвейера с подвесной лентой и распределенным приводом [Электронный ресурс] // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2015. № 1. С. 55-64. URL: <http://ntv-brgu.ru/wp-content/arhiv/2015-N1/2015-01-10.pdf>.
10. Толкачев Е.Н. Особенности определения усилий, приложенных к подвескам конвейера с подвесной лентой и распределенным приводом, в зависимости от их пространственной конфигурации на трассе [Электронный ресурс] // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2015. № 2. С. 44 – 51. URL: <http://ntv-brgu.ru/wp-content/arhiv/2015-N1/2015-02-06.pdf>.
11. Лагереv А.В., Толкачев Е.Н., Гончаров К.А. Моделирование рабочих процессов и проектирование многоприводных ленточных конвейеров: монография. Брянск: РИО БГУ, 2017. 384 с.
12. Лагереv А.В., Толкачев Е.Н. Рациональные параметры подвесок конвейера с подвесной лентой и распределенным приводом // Подъемно-транспортное дело. 2016. № 1 – 2 (84). С. 17 – 20.
13. Лагереv А.В., Толкачев Е.Н., Бословяк П.В. Проектирование и исследования конвейеров с подвесной грузонесущей лентой. Брянск: РИО БГУ, 2016. 303 с.
14. Lagerev A.V., Tolkachev E.N., Lagerev I.A. Analyzing the Discreet Section Suspension Parameters in a Conveyor with Suspended Belt and Distributed Drive // Journal of Mechanical Science and Technology. 2017, Vol. 31, no. 10, pp. 4669 – 4678.
15. Лагереv А.В., Дунаев В.П., Кулешов Д.Ю. Ленточно-канатный конвейер с подвесной лентой. Патент 99463 РФ, МПК В65G 15/08. заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Брянский государственный технический университет». № 2010123111/11. заявл. 07.06.2010; опублик. 20.11.2010; Бюл. № 32.

16. Лагерев А.В., Толкачев Е.Н. Анализ влияния конструктивных параметров подвесок на технические характеристики конвейера с подвесной лентой и распределенным приводом [Электронный ресурс] // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2016. № 3. С. 50 – 59. URL: <http://ntv-brgu.ru/wp-content/arhiv/2016-N3/2016-03-03.pdf>.

17. Бословяк П.В. Оптимальное проектирование металлоконструкций стационарных конвейеров с подвесной лентой : дис. ... канд. техн. наук. М., 2015. 160 с.

18. СП 16.13330.2011. Стальные конструкции. М., 2011. 173 с.

19. СП 20.13330.2011. Нагрузки и воздействия. М., 2011. 85 с.

20. Лунев Д.Е. Обоснование рациональных конструктивных и эксплуатационных параметров конвейеров с подвесной лентой для предприятий горной промышленности : дис. ... канд. тех. наук. СПб., 2007. 119 с.

21. Конвейеры: справочник / Р.А. Волков, А.Н. Гнутов, В.К. Дьячков [и др.] / под общ. ред. Ю.А. Пертена. Л. : Машиностроение, 1984. 367 с.

## MATHEMATICAL MODEL OF METAL CONSTRUCTION OPTIMIZATION OF DRIVE CONVEYOR WITH THE SUSPENDED BELT AND DISTRIBUTED DRIVE

*P.V. Boslovyak, E.N. Tolkachev*

### ABSTRACT

**Introduction.** The article is devoted to the metal construction optimization of the drive suspension conveyor with the suspended belt and distributed drive. The article also briefly reflects current directions of the research and development work of the conveyors with the suspended belt and distributed drive.

**Materials and methods.** The main attention is concentrated on the drive suspensions of the conveyor construction, on the working capacity conditions providing sufficient traction and coupling, as well as on the disadvantages of the existing roller suspensions' construction. The research presents the original technical solution of the roller suspension, which is equipped with the individual drive of the motor reducer and also with the pressing device of the leading roller, and the main advantages of a roller suspension are also described in the article.

**Results.** The authors develop and present a mathematical model that allows optimizing the steel construction of the most metal-elements – load-bearing section of the drive suspension according to constructional, strength and stiffness constraints.

**Discussion.** The realization of the proposed mathematical model is considered on the basic conveyor construction's calculations of the steel construction's stress-strain state. It is established that the basic drive suspension has the excessive strength, weight and the exceeded geometric parameters of the rods.

**Conclusion.** The conclusion about the need for multicriterion optimization of the steel drives suspension's construction is made, as well as investigations of the configuration parameters' influence on the mass-dimensional characteristics are presented.

**KEYWORDS:** conveyor belt, mathematical model, suspended belt, suspension, optimal design, distributed drive, rational parameters, constraint system.

### REFERENCES

1. Perten Yu. A. Konveyernyy transport XXI veka [The conveyor transport of the XXI century]. Transport rossijskoj federacii, 2005. № 1, pp. 42 – 43.

2. Averchenkov V.I., Davydov S.V., Dunaev V.P., Ivchenko V.N., Kurov S.V., Rytov M.Yu., Sakalo V.I. Konveyery s podvesnoy lentoy [Conveyors with hanging ribbon]. Moscow, Mashinostroenie-1, 2004. 256 p.

3. Ivchenko V.N., Kurov S.V. YUbiiley rossiyskogo besprosypnogo lentochnogo konveyera s podvesnoy lentoy [Anniversary of the Russian belt conveyors with suspended belt without material scattering]. Gornaya promyshlennost', 2007, no. 4 (74), pp. 76 – 77.

4. Lagerev A.V., Dunaev V.P. Konveyery s podvesnoy gruzonesushchey lentoy – Innovatsionnyy vid mashin nepreryvnogo transporta [Conveyors with suspensions carrying belt – new type of continuous transport machines]. Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal, 2009, no.10, pp. 9 – 14.

5. Goncharov K.A., Boslovyak P.V., Kuleshov D.Yu. Eksperimental'nyy stand dlya issledovaniya dvizheniya diskretnogo uchastka lentochnogo konveyera s podvesnoy lentoy i raspredelennym privodom [Experimental stand for the study of the motion of a discrete section of conveyor with suspended belt and distributed drive]. Dostizheniya molodykh uchenykh v razvitii innovatsionnykh protsessov v ekonomike, nauke, obrazovanii: materialy IV mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Bryansk, BGTU, 2012. p. 14.

6. Lagerev A.V., Tolkachev E.N. Issledovanie dvizheniya podvesok diskretnogo uchastka konveyera s podvesnoy lentoy, raspredelennym privodom i vertikal'no zamknutoy trassoy s pomoshch'yu odnomassovoy dinamicheskoy modeli [Research of suspension motion discrete section of a special conveyor with suspended belt and distributed drive using single-mass dynamic model], Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2013, no.4, pp. 33 – 40.

7. Kuleshov D.Yu. Podvesnoy prostranstvennyy

gorizontal'no zamknuty lentochnyy konveyer [Suspended spatial horizontally closed belt conveyor]. Dostizheniya molodykh uchenykh Bryanskoy oblasti: Materialy Regional'noy nauchnoy konferentsii studentov i aspirantov. Bryansk, BGU, 2010, pp. 29 – 31.

8. Lagerev A.V., Tolkachev E.N., Lagerev I.A. Modelling of a Vertical Loop Conveyor with Suspended Belt and Distributed Drive. International Review on Modelling and Simulations. 2016, Vol. 9, no. 4, P. 271 – 279.

9. Tolkachev, E.N. Analiz dinamiki podvesok diskretnogo uchastka konveyera s podvesnoy lentoy i raspredelennym privodom [Analysis of the dynamics of suspensions of discrete section of the conveyor with suspended belt and distributed drive]. Nauchno-tehnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta, 2015, no. 1, pp. 55 – 64, available at: <http://ntv-brgu.ru/wp-content/arhiv/2015-N1/2015-01-10.pdf>.

10. Tolkachev E.N. Osobennosti opredeleniya usilyi, prilozhennykh k podveskam konveyera s podvesnoy lentoy i raspredelennym privodom, v zavisimosti ot ih prostranstvennoy konfiguratsii na trasse [Specifics of determining the forces are applied to the suspensions of conveyor with suspended belt and distributed drive, depending on their spatial configuration on the route]. Nauchno-tehnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta, 2015, no. 2, pp. 44 – 51, available at: <http://ntv-brgu.ru/wp-content/arhiv/2015-N2/2015-02-06.pdf>.

11. Lagerev A.V., Tolkachev E.N., Goncharov K.A. Modelirovanie rabochnykh protsessov i proektirovanie mnogoprivodnykh lentochnykh konveyerov [Modeling of work processes and the design of multi-drive belt conveyor]. Bryansk: RIO BGU, 2017. 384 p.

12. Lagerev A.V., Tolkachev E.N. Ratsional'nye parametry podvesok konveyera s podvesnoy lentoy i raspredelennym privodom [Substantiation of rational suspension parameters conveyor with suspended belt and distributed drive]. Podemno-transportnoe delo. 2016, no. 1 – 2 (84). pp. 17 – 20.

13. Lagerev A.V., Tolkachev E.N., Boslovyak P.V. Proektirovanie i issledovaniya konveyerov s podvesnoy gruzonesushchey lentoy [Design and research of the conveyor with the suspended belt]. Bryansk, RIO BGU. 2016. 303 p.

14. Lagerev A.V., Tolkachev E.N., Lagerev I.A. Analyzing the Discreet Section Suspension Parameters in a Conveyor with Suspended Belt and Distributed Drive. Journal of Mechanical Science and Technology. 2017, Vol. 31, no. 10, p. 4669 – 4678.

15. Lagerev A.V., Dunaev V.P., Kuleshov D.YU. Lentochno-kanatnyy konveyer s podvesnoy lentoy [Belt-rope conveyor with suspended belt]. Patent RF, no. 2010123111, 2010.

16. Lagerev A.V., Tolkachev E.N. Analiz vliyaniya konstruktivnykh parametrov podvesok na tekhnicheskie karakteristiki konveyera s podvesnoy lentoy i raspredelennym privodom [Influence analysis of design parameters of suspensions on the technical specifications of conveyor with suspended belt and distributed drive]. Nauchno-tehnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta, 2016, no. 3, pp. 50 – 59, available at: <http://ntv-brgu.ru/wp-content/arhiv/2016-N3/2016-03-03.pdf>.

17. Boslovyak P.V. Optimalnoe proektirovanie metallkonstruktsiy statsionarnykh konveyerov s podvesnoy lentoy: dic. ... cand. of tech. science [Optimal design of steel structures fixed conveyors with hanging belt]. Moscow, 2015. 160 p.

18. SP 16.13330.2011. Stal'nye konstruksii [Steel structures]. Moscow, 2011. 173 p.

19. SP 20.13330.2011. Nagruzki i vozdeystviya [Loads and impacts]. Moscow, 2011. 85 p.

20. Lunev D.E. Obosnovanie ratsional'nykh konstruktivnykh i ekspluatatsionnykh parametrov konveyerov s podvesnoy

lentoy dlya predpriyatiy gornoy promyshlennosti Cand, Diss. [Justification of rational design and operational parameters of conveyor with suspended belt for the mining industry. Cand. Diss.]. St. Petersburg. 2007. 119 p.

21. Perten YU.A., Zenkov R.L., Gnutov A.N., D'yachkov V.K., Volkov R.A. Konveyery: spravochnik [Conveyors: Handbook]. Leningrad, Mashinostroenie, 1984: 367 p.

**Поступила 27.12.2017, принята к публикации 15.02.2018.**

**Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.**

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Бословяк Павел Валерьевич (г. Москва, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры РК-4 «Подъемно-транспортные системы», ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» (105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: boslovyak89@mail.ru).*

*Boslovyak Pavel V. (Moscow, Russia) – Ph.D., Associate Professor at the Department RS-4 “Hoisting and transport systems” at Moscow State Technical University named after N.E. Bauman (105005, Russian Federation, Moscow, 2nd Bauman Str., 5, building 1, e-mail: boslovyak89@mail.ru).*

*Толкачев Евгений Николаевич (г. Брянск, Россия) – инженер-конструктор ЗАО «Брянский арсенал» (241050, г. Брянск, ул. Калинина, д. 98, e-mail: tolkachev\_en@mail.ru).*

*Tolkachev Evgeniy N. (Bryansk, Russia) – engineer-designer of CJSC “Bryanskiy Arsenal” (241050, Russian Federation, Bryansk, Kalinina St., 98, e-mail: tolkachev\_en@mail.ru).*

## ВКЛАД СОАВТОРОВ

*Бословяк П.В. Составление методики и разработка математической модели оптимизации металлоконструкции приводной подвески конвейера с подвесной лентой и распределенным приводом с учетом конструктивных, прочностных и жесткостных ограничений. Построение расчетных схем, структурной и конечно-элементной моделей металлоконструкции приводной подвески. Проведение расчетов НДС в программном комплексе Siemens NX и интерпретация полученных результатов. Написание разделов «Методы и материалы», «Результаты», «Обсуждение».*

*Толкачев Е.Н. Исследование состояния вопроса, связанного с проектированием конвейеров с подвесной лентой и распределенным приводом. Разработка конструкции приводной подвески и построение эталонной*