

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МАССЫ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИИ ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТИ КОНВЕЙЕРА С ПОДВЕСНОЙ ГРУЗОНЕСУЩЕЙ ЛЕНТОЙ

П.В. Бословяк¹, М.М. Жилейкин², А.А. Понитаев³

¹ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана», г. Москва, Россия;

²ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана», г. Москва, Россия;

³ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана», г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Статья посвящена актуальному вопросу, связанному с оптимизацией металлоконструкции линейной части конвейера с подвесной грузонесущей лентой. В работе кратко приводятся существующие научные и конструкторские разработки данного типа конвейера. Особое внимание уделяется использованию методик, позволяющих добиться снижения массы металлоконструкции линейной части конвейера с подвесной лентой.

Методы и материалы. Авторами разработана и подробно представлена математическая модель металлоконструкции линейной части конвейера с подвесной грузонесущей лентой, состоящая из целевой функции и систем ограничений, которая позволяет реализовать современные подходы при проектировании металлоконструкции, тем самым снижая массу конвейера в целом.

Результаты. По результатам выполненных исследований представлены значения напряжений и прогибов, возникающих в металлоконструкции линейной секции различной конструкции, в зависимости от разной производительности конвейера с подвесной лентой. Проведена процедура оптимального проектирования металлоконструкции линейной секции с различным типоразмером конвейера с подвесной лентой, выполненная для минимального и максимального значения производительности. Авторами представлены результаты оптимальных поперечных сечений стержней и раскосов металлоконструкции конвейера.

Обсуждение и заключение. Установлено, что применение современных подходов, в частности оптимизации, к проектированию металлоконструкции конвейера позволяет улучшить массогабаритные показатели всего конвейера.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: металлоконструкция, конвейер с подвесной лентой, линейная секция, оптимальное проектирование, целевая функция.

ВВЕДЕНИЕ

На современном производстве и в строительстве машины непрерывного транспорта являются незаменимыми средствами, позволяющими выполнять поставленные задачи [1,2,3]. Поэтому происходит развитие и совершенствование конвейерного транспорта, в частности специального ленточного конвейера с подвесной грузонесущей лентой [4,6,7]. Использование методик, позволяющих добиться снижения массы металлоконструкции линейной части, является актуальной задачей на начальной стадии проектирования конвейера с подвесной лентой [8,9].

Конвейеры с подвесной грузонесущей лентой (КПЛ) нашли применение в химической, горнодобывающей, транспортной промышленности и в других областях производства [10,11,12,13]. Они имеют существенную отличительную конструктивную особенность от традиционных ленточных конвейеров. Вместо роликовых опор, стационарно установленных по всей длине трассы конвейера на грузонесущей и обратной ветви, в конструкции данного конвейера применяются роликовые каретки, к которым через гибкие элементы крепится конвейерная лента. Каретки движутся по трубчатым направляющим, перемещая ленту с грузом (рисунок 1) [14,15].

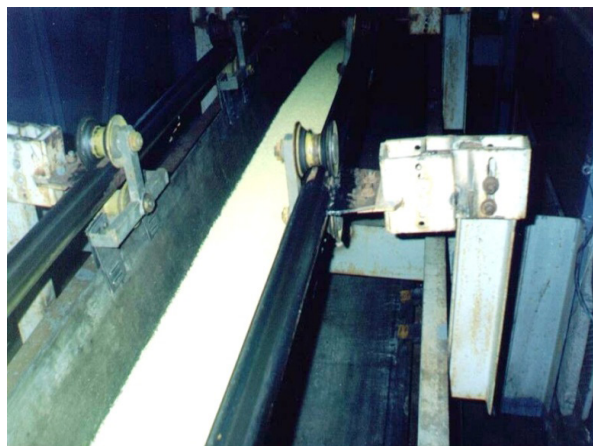


Рисунок 1 – Конвейер с подвесной грузонесущей лентой
Figure 1 – Conveyor with overhead carrying belt

Одним из основных узлов КПЛ является металлоконструкция (МК), которая условно разделяется на три узла – МК натяжной станции, МК линейной части, МК приводной станции, состоящих из набора стержней и раскосов.

Подробно рассмотрим металлоконструкцию линейной части КПЛ, состоящую из набора МК линейных секций, количество которых зависит от длины конвейера и составляет относительное большинство от его общей массы металлоконструкции. Следовательно, при проектировании КПЛ важной задачей является снижение массы МК линейной части, что

достигается использованием современных подходов при проектировании транспортирующих машин.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Возможно несколько вариантов исполнения линейной секции. На рисунке 2 представлен разработанный универсальный вариант МК линейной секции КПЛ, включающий наличие потенциальных избыточных стержней и раскосов с возможностью последующего их исключения из металлоконструкции.

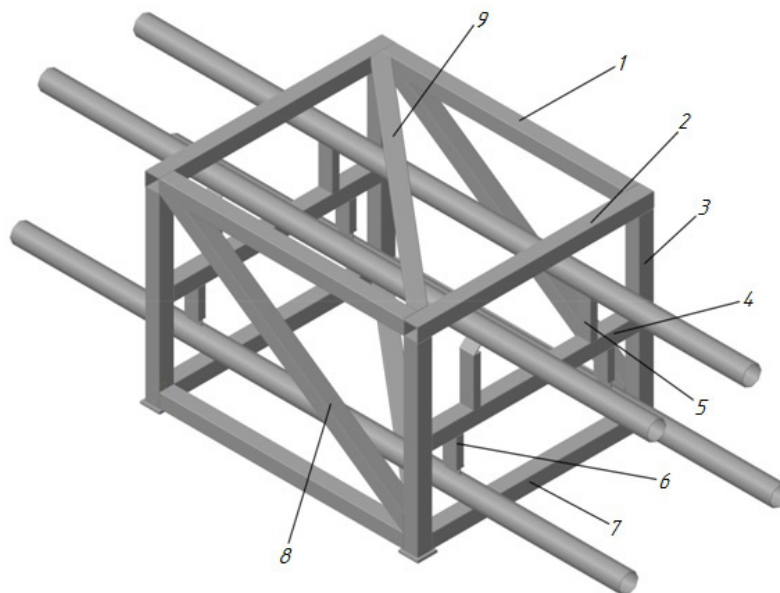


Рисунок 2 – Металлоконструкция линейной секции КПЛ: 1 – продольный стержень; 2 – поперечный стержень; 3 – вертикальный стержень; 4 – поперечный стержень; 5 – вертикальная стойка грузовой ветви; 6 – вертикальная стойка холостой ветви; 7 – поперечный стержень; 8 – раскос; 9 – раскос

Figure 2 – Metal structure of the linear section of the COB: 1 – longitudinal rod; 2 – transverse rod; 3 – vertical rod; 4 – transverse rod; 5 – vertical stand of cargo branch; 6 – vertical stand of the idle branch; 7 – transverse rod; 8 – brace; 9 – brace

Масса МК линейной части КПЛ формируется следующей формулой:

$$M = p(j_1 m_1 + j_2 m_2 + j_3 m_3 + j_4 m_4 + j_5 m_5 + j_6 m_6 + j_7 m_7 + j_8 m_8 + j_9 m_9), \quad (1)$$

где p – количество линейных секций МК конвейера; j_i – признак наличия i -го стержня (раскоса) в конструкции ($j_i = 1$ – стержень (раскос) присутствует; $j_i = 0$ – стержень (раскос) отсутствует); m_i – масса отдельного i -го стержня или раскоса (рисунок 2) [9, 15].

Постановка задачи условной параметрической оптимизации сводится к минимизации целевой функции МК линейной секции КПЛ, т.е. к снижению ее массы, при выполнении систем ограничений, накладываемых на нее.

На начальном этапе формируются векторы варьируемых (управляемых) и неварьируемых (неуправляемых) параметров [9]. Для этого осуществляется подробный анализ узла МК линейной секции, из которого следует, что

масса металлоконструкции зависит минимум от тридцати одного, максимум от сорока пяти размерных величин. Управляемыми могут являться минимум двадцать девять величин, максимум – сорок три, из которых формируется вектор варьируемых параметров.

Для расчетной схемы МК линейной секции (рисунок 3) в зависимости от выбранного оптимального поперечного сечения стержней 1 – 9 (рисунок 4) вектор варьируемых параметров имеет вид

$$\{x\}^T = \{x_1, x_2, \dots, x_w\} = \{l_1^r, l_2^r, \dots, l_4^r, \dots, l_9^r, t_1, t_2, \dots, t_9, a_1, a_2, \dots, a_9, b_1, b_2, \dots, b_9, e_1, e_2, \dots, e_9, d_1, d_2, \dots, d_9, f_1, f_2, \dots, f_9, c_1, c_2, \dots, c_9, s_1, s_2, \dots, s_9, h_1, h_2, \dots, h_9, g_1, g_2, \dots, g_9, k_5, k_6, \dots, k_8, D_5, D_6, \dots, D_8\}, \quad (2)$$

где w – количество управляемых параметров МК линейной секции; r – тип профиля поперечного сечения ($r = п$ – прямоугольная труба; $r = ш$ – швеллер; $r = у$ – уголок; $r = к$ – круглая труба).

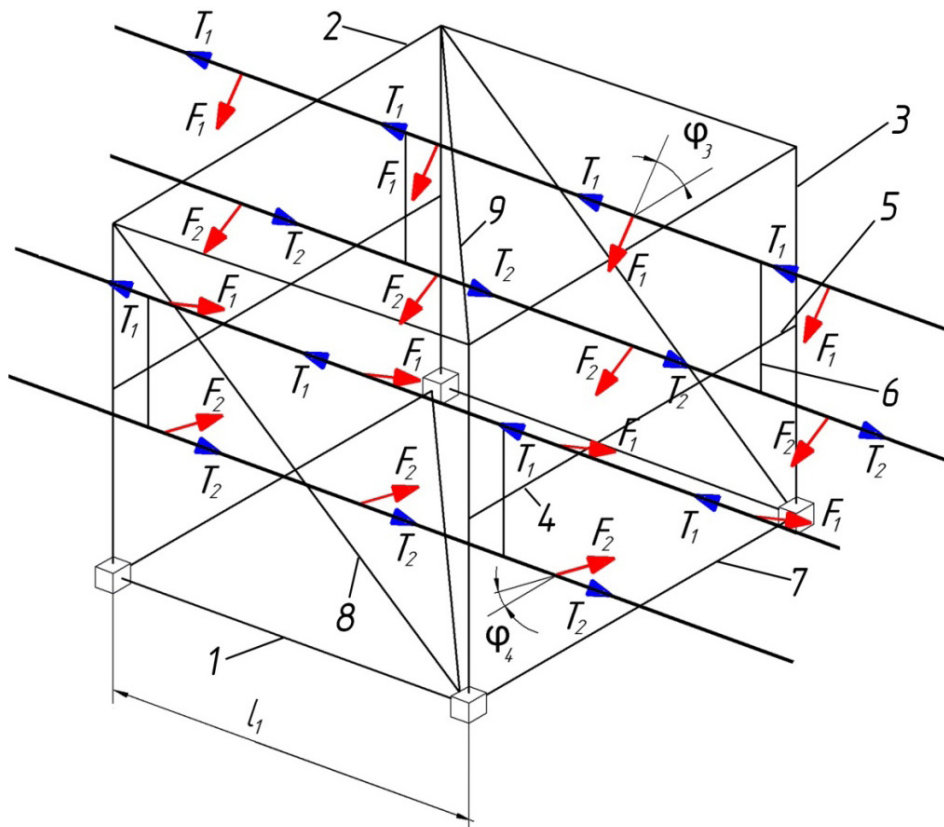


Рисунок 3 – Универсальная расчетная схема МК линейной секции стационарного КПЛ [9]
Figure 3 – Universal calculating scheme of the MS linear section of the stationary COB [9]

Неуправляемыми параметрами МК линейной секции являются длины стержней 5 и 6 (рисунок 2), которые определяются в зависимости от формы поперечного сечения конвейерной ленты. Поэтому вектор неварьируемых параметров примет вид

$$\{z\}^T = \{z_1, z_2\} = \{l_5^r, l_6^r\}. \quad (3)$$

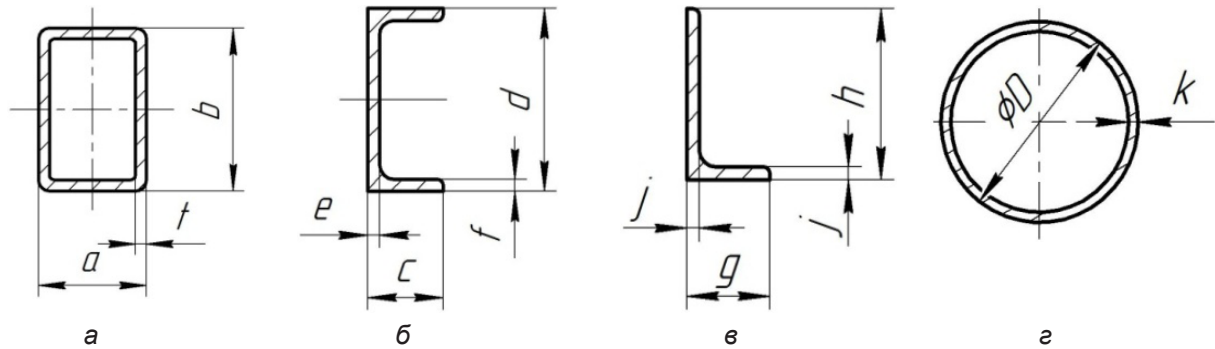


Рисунок 4 – Профили поперечного сечения детали металлоконструкции [16, 17]:
а – прямоугольная труба; б – швеллер; в – уголок; г – круглая труба
Figure 4 – Cross-sectional profiles of metal structure details [16, 17]:
a – rectangular tube; b – channel; c – angle; d – round tube

Задача оптимального проектирования МК линейной секции КПЛ с учетом (2) и (3) сводится к минимизации целевой функции вида

$$\begin{aligned} \Pi(\{x_i^c\}, \{z_i^c\}) = & \{j_1^n 8n_1 \rho_1 x_1^n x_2^n (x_3^n + x_4^n - 2x_2^n) + j_1^w 4n_1 \rho_1 x_1^w [x_2^w (x_3^w - 2x_4^w) + 2x_5^w x_4^w] + \\ & + j_1^y 4n_1 \rho_1 x_1^y x_2^y (x_3^y + x_4^y - x_2^y)\} + \{j_2^n 2n_2 \rho_2 x_5^n x_6^n (x_7^n + x_8^n - 2x_6^n) + j_2^w n_2 \rho_2 x_6^w [x_7^w (x_8^w - 2x_9^w) + 2x_{10}^w x_9^w] + \\ & + j_2^y n_2 \rho_2 x_5^y x_6^y (x_7^y + x_8^y - x_6^y)\} + \{j_3^n 8n_3 \rho_3 x_9^n x_{10}^n (x_{11}^n + x_{12}^n - 2x_{10}^n) + j_3^w 4n_3 \rho_3 x_{11}^w [x_{12}^w (x_{13}^w - 2x_{14}^w) + \\ & + 2x_{15}^w x_{14}^w] + j_3^y 4n_3 \rho_3 x_9^y x_{10}^y (x_{11}^y + x_{12}^y - x_{10}^y)\} + \{j_4^n 4n_4 \rho_4 x_{13}^n x_{14}^n (x_{15}^n + x_{16}^n - 2x_{14}^n) + \\ & + j_4^w n_4 \rho_4 x_{16}^w [x_{17}^w (x_{18}^w - 2x_{19}^w) + x_{20}^w x_{19}^w] + j_4^y 2n_4 \rho_4 x_{13}^y x_{14}^y (x_{15}^y + x_{16}^y - x_{14}^y)\} + \{j_5^n 8n_5 \rho_5 z_1^n (x_{18}^n + \\ & + x_{19}^n - 2x_{17}^n) + j_5^w 4n_5 \rho_5 z_1^w [x_{21}^w (x_{22}^w - 2x_{23}^w) + 2x_{24}^w x_{23}^w] + j_5^y 4n_5 \rho_5 z_1^y x_{17}^y (x_{18}^y + x_{19}^y - x_{17}^y) + \\ & + j_5^k 4n_5 \pi \rho_5 z_1^k x_1^k (x_2^k - x_1^k)\} + \{j_6^n 4n_6 \rho_6 z_2^n (x_{21}^n + x_{22}^n - 2x_{20}^n) + j_6^w 2n_6 \rho_6 z_2^w [x_{25}^w (x_{26}^w - 2x_{27}^w) + \\ & - 2x_{28}^w x_{27}^w] + j_6^y 2n_6 \rho_6 z_2^y x_{20}^y (x_{21}^y + x_{22}^y - x_{20}^y) + j_6^k 2n_6 \pi \rho_6 z_2^k x_3^k (x_4^k - x_3^k)\} + \{j_7^n 4n_7 \rho_7 x_{23}^n x_{24}^n (x_{25}^n + \\ & + x_{26}^n - 2x_{24}^n) + j_7^w 2n_7 \rho_7 x_{29}^w [x_{30}^w (x_{31}^w - 2x_{32}^w) + 2x_{33}^w x_{32}^w] + j_7^y 2n_7 \rho_7 x_{23}^y x_{24}^y (x_{25}^y + x_{26}^y - x_{24}^y) + \\ & + j_7^k 2n_7 \pi \rho_7 x_5^k x_6^k (x_7^k - x_6^k)\} + \{j_8^n 4n_8 \rho_8 x_{27}^n x_{28}^n (x_{29}^n + x_{30}^n - 2x_{28}^n) + j_8^w 2n_8 \rho_8 x_{34}^w [x_{35}^w (x_{36}^w - 2x_{37}^w) + \\ & + 2x_{38}^w x_{37}^w] + j_8^y 2n_8 \rho_8 x_{27}^y x_{28}^y (x_{29}^y + x_{30}^y - x_{28}^y) + j_8^k 2n_8 \pi \rho_8 x_8^k x_9^k (x_{10}^k - x_9^k)\} + \{j_9^n 2n_9 \rho_9 x_{31}^n x_{32}^n (x_{33}^n + \\ & + x_{34}^n - 2x_{32}^n) + j_9^w n_9 \rho_9 x_{39}^w [x_{40}^w (x_{41}^w - 2x_{42}^w) + 2x_{43}^w x_{42}^w] + j_9^y n_9 \rho_9 x_{31}^y x_{32}^y (x_{33}^y + x_{34}^y - x_{32}^y) + \\ & + j_9^k 2n_9 \pi \rho_9 x_{11}^k x_{12}^k (x_{13}^k - x_{12}^k)\}, \end{aligned}$$

где ρ_i – плотность материала стержня и раскоса МК линейной секции.

Конструктивные ограничения на длины стержней и раскосов предполагают выполнение условий:

- вертикальные стержни 3 (см. рисунок 3) не рекомендуется устанавливать с шагом вдоль трассы КПЛ более 4 метров. С увеличением данного расстояния происходит существенный рост динамических усилий на направляющие от движущихся по ним роликовых кареток [5]

$$4 - l_1 > 0; \quad (5)$$

- расстояние между секциями l_{nc} зависит от длины секции l_1 [5]:

$$l_{nc} \leq (0,8 \dots 1,5) l_1, \quad (6)$$

где l_1 – шаг стоек линейной секции вдоль трассы КПЛ (см. рисунок 3).

К числу прочностных ограничений относятся выполнения следующих условий [18]:

- не превышение внешними усилиями, возникающими при центральном растяжении или сжатии стержней, допускаемых величин в расчетах на статическую прочность и на устойчивость;
- не превышение внешними усилиями допускаемых величин изгибающих моментов при расчете на статическую прочность.

Жесткостные ограничения должны обеспечивать условия не превышения МК величин допускаемых прогибов [19].

С целью выявления картины распределения напряжений и прогибов, возникающих в МК линейной секции, в зависимости от различной производительности на начальном этапе исследований для всех стержней и раскосов предварительно было принято одинаковое поперечное сечение – квадратный профиль 20×20 мм. В качестве направляющих использовалась круглая труба Ø57×3,5 мм [5], хорошо зарекомендовавшая себя при эксплуатации КПЛ.

В ходе оптимального проектирования геометрические размеры профилей направляющих не подвергались оптимизации. Это допущение было принято, поскольку с уменьшением профиля направляющих снижаются размеры роликовых кареток, а соответственно и роликов,двигающихся по направляющим. В результате возникает вероятность заклинивания роликов при огибании криволинейных направляющих (переход роликов с грузовой ветви на обратную ветвь) вблизи приводного и натяжного барабанов.

Из опыта проектирования и эксплуатации КПЛ размер ширины ленты в проводимых исследованиях МК линейной секции принимался в диапазоне 0,65...1,2 м [5].

В процессе оптимального проектирования МК линейной секции было принято допущение равномерной загрузки ленты. При этом производительность конвейера будет меняться прямо пропорционально скорости транспортирования груза.

Нагрузки, действующие на МК линейной станции со стороны подвески, ленты и груза, определялись зависимостями (см. рисунок 3):

- поперечные нагрузки F_1 на участке грузовой ветви

$$F_1 = k_d \left(\frac{gQ}{3,6 u k_B k_r} \frac{k_H}{k_r} + \frac{4G_{пг}}{l_{п}} + \frac{gG_{лВ}}{2l_{п}} \right) v_1; \quad (7)$$

- поперечные нагрузки F_2 на участке обратной ветви

$$F_2 = k_d \left(\frac{4G_{пг}}{l_{п}} + \frac{gG_{лВ}}{2l_{п}} \right) v_2; \quad (8)$$

- продольные нагрузки T_1 на участке грузовой ветви

$$T_1 = k_d k_3 \left[k_{дп} L_r \frac{C}{D} (\mu + 2k) \left(\frac{gQ}{3,6 u k_B k_r} \frac{k_H}{k_r} + \frac{4G_{пг}}{l_{п}} + \frac{gG_{лВ}}{2l_{п}} \right) \pm \frac{gQ}{3,6 u k_B k_r} \frac{k_H}{k_r} H \right] / v_1; \quad (9)$$

- продольные нагрузки T_2 на участке обратной ветви

$$T_2 = k_d \left[k_{дп} L_r \frac{C}{D} (\mu + 2k) \left(\frac{4G_{пг}}{l_{п}} + \frac{gG_{лВ}}{2l_{п}} \right) \right] v_2; \quad (10)$$

где k_d – коэффициент динамичности; Q – производительность конвейера; k_H – коэффициент неравномерной загрузки КПЛ; k_B – коэффициент использования КПЛ по времени; k_r – коэффициент готовности КПЛ; $G_{л}$ – масса конвейерной ленты; H – вертикальная проекция длины КПЛ; B – ширина конвейерной ленты; $G_{п}$ – масса подвесок; $l_{п}$ – шаг подвесок; $k_{дп}$ – коэффициент учета дополнительных сопротивлений при изгибе направляющего пути в вертикальной и горизонтальной плоскостях; L_r – горизонтальная проекция длины КПЛ; v_1 , v_2 – количество подвесок на участках грузовой

и обратной ветвей КПЛ соответственно; μ – коэффициент трения оси ролика каретки; d – диаметр оси ролика; k – коэффициент трения качения ролика по направляющей; C – коэффициент дополнительных сопротивлений; D – диаметр ролика подвески.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Расчет напряжений и прогибов, возникающих в металлоконструкции линейной секции КПЛ, выполнен в программном комплексе Siemens NX. Результаты представлены на рисунке 5.

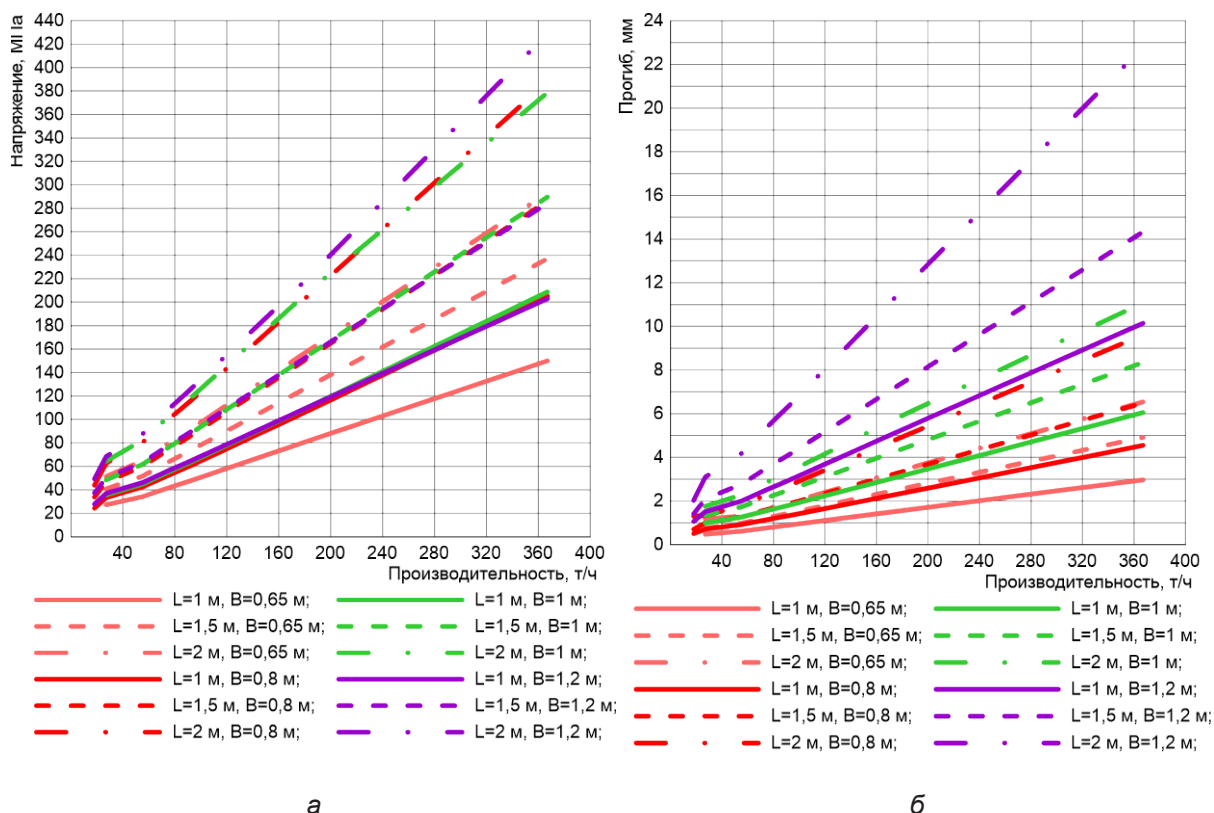


Рисунок 5 – Графики зависимости производительности конвейера с подвесной лентой, движущегося со скоростью 0,5 м/с, от напряжений (а) и от прогибов (б), возникающих в металлоконструкции линейной секции различной длины L при соответствующей ширине B ленты
Figure 5 – Dependence diagrams of the conveyor hanging belt's productivity moving at 0.5 m / s speed, from the stresses (a) and from the deflections (b), which appear in the linear steel section with different length L and at the corresponding width of the B tape

Проанализировав графики (см. рисунок 5) можно заключить следующее:

1. С увеличением длины линейной секции существенно возрастают нормальные напряжения и прогибы. Это объясняется увеличением расстояния между точками крепления направляющих и ростом динамических нагрузок со стороны ленты с грузом [5, 20, 21].

2. Напряжения, возникающие в металлоконструкциях линейных секциях для исследуемых длин (1 м, 1,5 м, 2 м) при ширине лент $B = 0,8$ м и $B = 1$ м, различаются незначительно.

3. Для максимальной расчетной производительности 367 т/ч принятый на начальном этапе квадратный профиль 20×20 мм МК не обеспечивает выполнения прочностных и жесткостных ограничений для следующих длин линейных секций с соответствующей шириной ленты: L=1 м, B=1,2 м; L=1,5 м, B=0,65 м; L=1,5 м, B=0,8 м; L=1,5 м, B=1 м; L=1,5 м, B=1,2 м; L=2 м, B=0,65 м; L=2 м, B=0,8 м; L=2 м, B=1 м; L=2 м, B=1,2 м.

4. Максимальные значения прогибов МК линейной секции возникают в трубчатых направляющих, которые в дальнейшем исследовании не будут подвергаться оптимальному проектированию.

ОБСУЖДЕНИЕ

Оптимальное проектирование МК линейной секции осуществлялось в программном комплексе Siemens NX для наименьшей ($Q=18$ т/ч) и наибольшей ($Q=367$ т/ч) производительности конвейера при установленной скорости движения 0,5 м/с. Определен оптимальный профиль поперечного сечения МК линейной секции, и выявлена ее масса (таблица). Исследования проводились для трех длин линейной секции (1 м, 1,5 м, 2 м) с четырьмя типоразмерами ширины ленты (0,65 м, 0,8 м, 1 м, 1,2 м). С целью унификации металлоконструкции конвейера был принят профиль поперечного сечения одинакового типоразмера для всех стержней и раскосов линейной секции.

РАЗДЕЛ I. ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

Таблица

ЗНАЧЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ, ТИПОРАЗМЕРЫ ПРОФИЛЯ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ И МАССА МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИИ ЛИНЕЙНОЙ СЕКЦИИ, ПОЛУЧЕННЫЕ В ПРОЦЕССЕ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ ВАРИАНТОВ КОНВЕЙЕРА С ПОДВЕСНОЙ ЛЕНТОЙ

Table

VOLTAGE VALUES, CROSS-SECTIONAL PROFILE SIZES AND MASS OF THE LINEAR STEEL SECTION, OBTAINED IN THE OPTIMAL DESIGN PROCESS FOR VARIOUS CONSTRUCTIVE VARIANTS OF THE CONVEYOR HANGING BELT

№ п/п	Производительность КПЛ, т/ч	Длина МК линейной секции, мм	Ширина ленты, мм	Напряжения в МК, МПа	Момент сопротивления оптимального сечения, см ³	Размеры профиля поперечного сечения (прямоугольная труба)	Масса МК линейной секции, кг
1	18	1 000	650	96,57	0,093	15×10×1	38,5
2		1 500		197,24	0,208	15×10×1	63,5
3		2 000		186,63	0,263	15×10×1,5	87,5
4	367	1 000		185,15	1,095	30×15×2	46,2
5		1 500		196,76	1,668	30×20×2,5	95,6
6		2 000		201,66	2,434	40×20×2	120,5
7	18	1 000	800	129,71	0,124	15×10×1	43,6
8		1 500		176,29	0,202	15×10×1,5	67,7
9		2 000		173,63	0,273	20×10×1,5	91,5
10	367	1 000		184,66	1,276	30×20×1,5	58
11		1 500		191,22	1,984	40×20×2	97,8
12		2 000		190,30	2,655	35×25×3,5	155,5
13	18	1 000	1000	165,19	0,143	15×10×1	45,1
14		1 500		178,85	0,212	15×10×1	68,9
15		2 000		204,64	0,276	20×10×1	87,0
16	367	1 000		170,51	1,333	35×20×2	73,9
17		1 500		195,31	1,94	35×20×2,5	107,6
18		2 000		189,16	2,604	40×20×3	150,8
19	18	1 000	1200	155,21	0,152	15×10×1	46,9
20		1 500		179,29	0,268	15×10×1,5	71,6
21		2 000		184,76	0,315	20×10×1,5	95,9
22	367	1 000		202,73	1,465	30×20×2	77,3
23		1 500		188,67	1,919	35×25×2,5	123,1
24		2 000		185,45	3,103	45×30×2,5	169,6

В таблице представлен момент сопротивления сечения, полученный по результату оптимального проектирования МК, по данным которого принимается оптимальный профиль линейной секции конвейера. Также представлена масса одной линейной секции.

Влияние массы МК одной линейной секции

КПЛ в зависимости от установленного шага (продольного расстояния) вертикальных стоек 3 (см. рисунок 2) представлено на рисунке 6. Как видно, с увеличением шага вертикальных стоек происходит рост массы линейной секции, а также напряжений, возникающих в МК от внешних нагрузок.

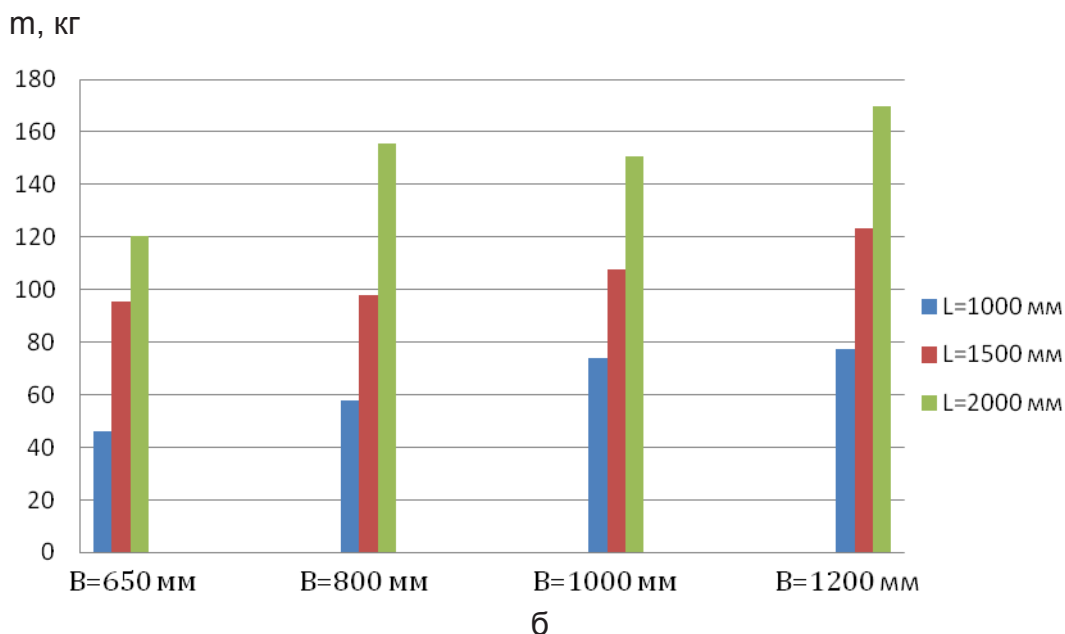
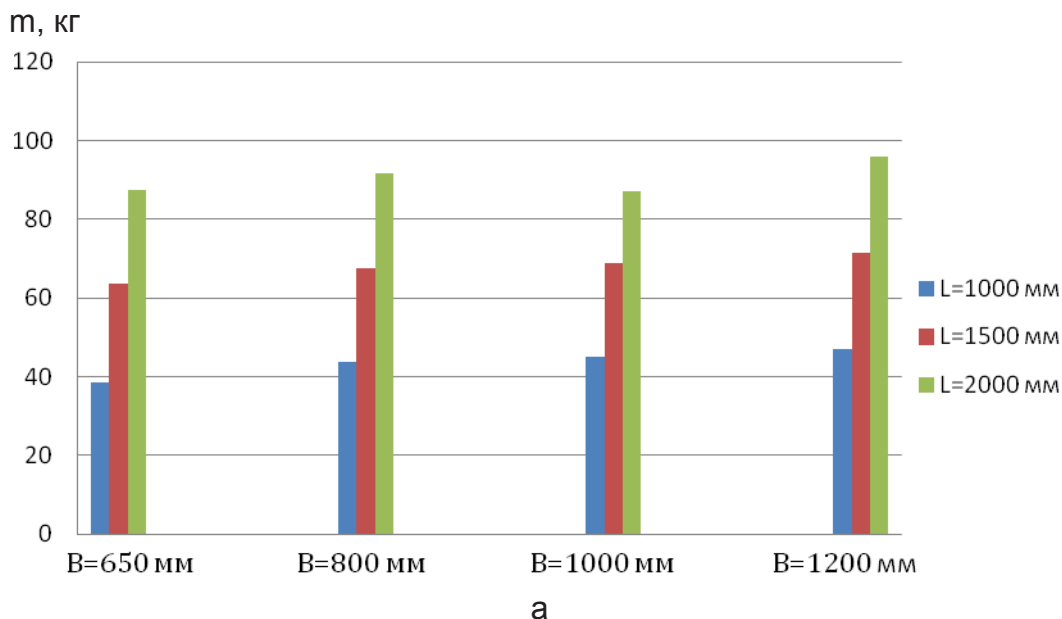


Рисунок 6 – Диаграмма зависимости массы от длины линейной секции при различной ширине ленты B для производительности конвейера: а – Q=18 т/ч; б – Q=367 т/ч
 Figure 6 – Dependence diagram of the mass on the linear section length for different widths of the B tape for the productivity of the conveyor: а – Q = 18 t / h; б – Q = 367 t / h

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании выполненной работы можно сделать следующие выводы:

1. Разработана математическая модель металлоконструкции линейной части конвейера с подвесной лентой, состоящая из целевой функции и систем ограничений.

2. Получены значения напряжений и проги-

бов, возникающих в металлоконструкции линейной секции, в зависимости от разной производительности конвейера.

3. Выявлены типоразмеры профилей поперечных сечений и массы металлоконструкции линейной секции для минимального и максимального значения производительности конвейера.

4. Приведены рекомендации по выбору массогабаритных размеров металлоконструкции линейной части конвейера с целью снижения ее массы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зенков Р.Л., Ивашков И.И., Колобов Л.Н. Машины непрерывного транспорта. Москва: Машиностроение, 1980. 303 с.

2. Пертен Ю.А. Конвейерный транспорт XXI века // Транспорт российской федерации. 2005. № 1. С. 42-43.

3. Спиваковский А.О. Транспортирующие машины. Москва: Машиностроение, 1983. 487 с.

4. Лагерева А.В., Толкачев Е.Н., Бословяк П.В. Проектирование и исследования конвейеров с подвесной грузоне-сущей лентой. Брянск: РИО БГУ, 2016. 303 с.

5. Ивченко В.Н., Давыдов С.В., Куров В.В. Опыт эксплуатации конвейеров с подвесной лентой // Горный журнал. 2003. №3. С. 66-70.

6. Ивченко В.Н., Куров С.В. Юбилей российского беспросыпного ленточного конвейера с подвесной лентой // Горная промышленность. 2007. № 4 (74). С. 76-77.

7. Конвейеры с подвесной лентой / В.И. Аверченков, В.Н. Ивченко, В.П. Дунаев [и др.] / под общ. ред. проф. В.И. Аверченкова. М.: Машиностроение-1, 2004. 256 с.

8. Вершинский А.В., Лагерева И.А., Шубин А.Н., Лагерева А.В. Численный анализ металлических конструкций подъемно-транспортных машин. Брянск: РИО БГУ, 2014. 186 с.

9. Бословяк П.В., Зуева Е.П. Универсальная методика оптимального проектирования основных конструктивных узлов металлоконструкции стационарного конвейера с подвесной лентой. Научно-технический вестник Брянского государственного университета, 2015. №1. С. 32-42. URL: <http://ntv-brgu.ru/wp-content/архив/2015-N1/2015-01-07.pdf>.

10. Лагерева А.В., Дунаев В.П. Конвейеры с подвесной грузонесущей лентой – инновационный вид машин непрерывного транспорта // Справочник. Инженерный журнал. 2009. № 10. С. 9-14.

11. 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, N. 4. P. 271–279.

12. 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. С. 14.

13. 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.

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

15. Бословяк П.В., Толкачев Е.Н. Математическая модель оптимизации приводной подвески конвейера с подвесной лентой и распределенным приводом. Научный рецензируемый журнал Вестник СибАДИ, 2018. №1. С. 8-18. DOI: <http://dx.doi.org/10.26518/2071-7296-2018-1-8-18>

16. Феодосьев В.И. Сопrotивление материалов. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. 592 с.

17. Сакало В.И. Сопrotивление материалов. Брянск, БГТУ, 2009. 528 с.

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

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

20. Лобов Н.А. Динамика передвижения кранов по рельсовому пути: учеб. пособие для вузов. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 230 с.

21. Лагерева А.В., Кулешов Д.Ю. Динамические процессы при переходных режимах работы дискретного участка конвейера с распределенным приводом // Вестник Брянского государственного технического университета. 2013. № 2. С. 50-56.

MATHEMATICAL MODEL OF THE METAL-CONSTRUCTION LINEAR CONVEYOR MASS WITH SUSPENDED GEARBOXING TAPE

P.V. Boslovyak, M.M. Jileykin, A.A. Ponitayev

ABSTRACT

Introduction. The article is devoted to the topical issue, which is related to the optimization of the linear part of the conveyor with a hanging load-carrying belt. In the work briefly reflect the main scientific and design developments of this conveyor type. Particular attention is paid to the use of techniques to reduce the weight of the metal structure of the conveyor linear part with hanging belt.

Methods and materials. The authors have developed and in detail presented mathematical model of the metal structure of the conveyor linear part with a hanging load-carrying belt, consisting of the target function and the systems of limitations, which realizes modern approaches at the metal structure design, thereby reducing the weight of the conveyor as a whole.

Results. According to the results of the research, the values of stresses and deflections arising in a metal construction of linear section of various design depend on the different productivity of the conveyor with hanging belt. The procedure of optimum design of the metal linear structure with various standard size of the conveyor with hanging belt performed for the minimum and maximum value of productivity is carried out. The authors present the results of optimal cross-sections rods and diagonal rods of the conveyor metal structures.

The discussion and conclusion. It is established that the application of modern approaches, in particular optimization, to design of the conveyor metal construction allows to improve conveyor mass-dimensional indicators.

KEYWORDS: metal structure, conveyor with hanging belt, linear section, optimal design, target function.

REFERENCES

1. Zenkov R.L., Ivashkov I.I., Kolobov L.N. *Mashiny nepreryvnogo transporta* [Machines of continuous transport]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1980. 303 p.
2. Perten Yu. A. *Konveyernyy transport XXI veka* [The conveyor transport of the XXI century]. Transport Rossijskoj federacii, 2005, no. 1, pp. 42–43.
3. Spivakovskiy A.O. *Transportiruyushchiye mashiny* [Transporting machines]. Moscow, Mashinostroyeniye, 1983. 487 p.
4. Lagerev A.V., Tolkachev E.N., Boslovyak P.V. *Proektirovaniye i issledovaniya konveyerov s podvesnoy gruzonesushchey lentoy* [Design and research of the conveyor with the suspended belt]. Bryansk, RIO BGTU. 2016. 303 p.
5. Ivchenko V.N., Davydov S.V. Kurov S.V. Opyt ekspluatatsii konveyerov s podvesnoy lentoy [Experience in the operation of conveyors with hanging belt]. *Gornyy zhurnal*, 2003, no. 3, pp. 66–70.
6. Ivchenko V.N., Kurov S.V. YUbielye 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.
7. 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, Mashinostroyeniye-1, 2004. 256 p.
8. Vershinckii A.V., Lagerev I.A., Shubin A.N., Lagerev A.V. *Chislennyy analiz metallicheskih konstruksiy pod'yemno-transportnykh mashin* [Numerical analysis of metal constructions of lifting-transport machines]. Bryansk, Bryanskiy Gosudarstvennyy Universitet, 2014. 186 p.
9. Boslovyak P.V., Zueva E.P. Universalnaya metodika optimalnogo proektirovaniya osnovnykh konstruktivnykh uzlov metallkonstruksiy konveyerov s podvesnoy lentoy [Universal method for optimal design main structural assemblies of steel structures stationary conveyor with hanging ribbon]. *Nauchno-tekhnicheskyy Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015, no.1, pp. 32–42. URL: <http://ntv-brgu.ru/wp-content/arhiv/2015-N1/2015-01-07.pdf>
10. 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.
11. 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.
12. Goncharov K.A., Boslovyak P.V., Kuleshov D.Yu. *Ekspperimental'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 razvitiy innovatsionnykh protsessov v ekonomike, nauke, obrazovanii: materialy IV mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Bryansk, BGTU, 2012. p. 14.
13. Kuleshov D.Yu. Podvesnoy prostranstvennyy gorizontallyno zamknuty lentochnyy konveyer [Suspended spatial horizontally closed belt conveyor]. *Dostizheniya molodykh uchenykh Bryanskoy oblasti: Materialy Regional'noy nauchnoy konferentsii studentov i aspirantov*. Bryansk, BGTU, 2010. pp. 29–31.
14. Perten YU.A., Zenkov R.L., Gnutov A.N., D'yachkov V.K., Volkov R.A. *Konveyery: spravochnik* [Conveyors: Handbook]. Leningrad, Mashinostroyeniye, 1984. 367 p.
15. Boslovyak P. V., Tolkachev E.N. Matematicheskaya model' optimizatsii privodnoy podveski konveyera s podvesnoy lentoy i raspredelennym privodom [Mathematical model of optimization metal construction of the drive suspension carrier section conveyor with suspended belt and distributed drive]. *Vestnik SibADI*, 2018, no. 1, pp. 8–18. DOI: <http://dx.doi.org/10.26518/2071-7296-2018-1-8-18>
16. Feodos'yev V.I. *Soprotivleniye materialov* [Strength of materials]. Moscow, Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 1999. 592 p.
17. Sakalo V.I. *Soprotivleniye materialov* [Strength of materials]. Bryansk, BGTU, 2009. 528 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. Lobov N. A. *Dinamika peredvizheniya kranov po rel'sovomu puti* [Dynamics of the movement of cranes along the track]. Moscow, Izd-vo MGTU im. N. E. Baumana, 2003. 230 p.
21. Lagerev A.V., Kuleshov D.YU. Dinamicheskiye protsessy pri perekhodnykh rezhimakh raboty diskretnogo uchastka konveyera s raspredelennym privodom [Dynamic processes in transient modes of operation of a discrete section of a conveyor with a distributed drive]. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2013, no. 2, pp. 50–56.

Поступила 23.03.2018, принята к публикации 20.04.2018.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бословяк Павел Валерьевич (Москва) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Подъемно-транспортные системы». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: boslovyak@bmstu.ru).

Boslovyak Pavel Valeryevich (Moscow) – Ph.D. of Technical Sciences, Associate professor of the Department «Hoisting and transport systems». Moscow State Technical University named after Bauman (BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: boslovyak@bmstu.ru).

Жилейкин Михаил Михайлович (Москва) – доктор технических наук, профессор кафедры «Колесные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: jileykin_m@mail.ru).

Jileykin Mikhail Mikhailovich (Moscow) – Dr. of Technical Sciences, Professor of the Department «Wheeled vehicles». Moscow State Technical University named after Bauman (BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: jileykin_m@mail.ru).

Понитаев Александр Анатольевич (Москва) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Подъем-

