

УДК (UDC) 621.867

ИЗМЕНЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНВЕЙЕРОВ С  
ПОДВЕСНОЙ ЛЕНТОЙ ПРИ ОТКАЗАХ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ  
ПРИВОДНЫХ ПОДВЕСОКCHANGING THE TECHNICAL CHARACTERISTICS OF CONVEYORS WITH  
A SUSPENDED BELT IN CASE OF FAILURES IN THE POWER SUPPLY SYSTEM  
OF DRIVE SUSPENSIONSТолкачев Е.Н.  
Tolkachev E.N.Брянский государственный технический университет (Брянск, Россия)  
Bryansk State Technical University (Bryansk, Russian Federation)

**Аннотация.** Результаты исследований, представленных в статье, относятся к принципиально новому виду машин непрерывного транспорта – конвейерам с подвесной грузонесущей лентой и распределенным приводом. Главные преимущества которых обусловлены особенностями кинематической схемы, в которой грузонесущая конвейерная лента удерживается бортами посредством роликовых подвесок на замкнутых вдоль трассы направляющих качения и не взаимодействует своим основанием с поддерживающими опорами, а привод реализован по распределенной схеме оборудованием отдельных подвесок индивидуальными мотор-редукторными приводами. Особенностью такой кинематической схемы является характер протекания отказов, связанных с работой высоконагруженных приводных подвесок, влияние которых сказывается на основных технических характеристиках конвейера при достаточно возросшем количестве. В работе представлена математическая модель, предназначенная для расчета динамических характеристик конвейера с подвесной лентой и распределенным приводом при наступлении свойственных данной конструкции конвейера видов отказов, связанных с разрывом подводящей электрической цепи питания мотор-редукторного привода подвесок. На основании разработанной математической модели для эталонной конструкции конвейера с подвесной лентой и распределенным приводом выполнена серия численных расчетов динамических характеристик при наступлении отказов приводных подвесок. Полученные результаты позволили установить, что при сокращении количества групп последовательно отказавших приводных подвесок, расположенных с равным шагом вдоль трассы, технические характеристики конвейера ухудшаются: скорость движения грузонесущей ленты и общая мощность приводов снижаются, а продольные растягивающие напряжения в ленте повышаются. При увеличении количества последовательно отказавших в рамках одной группы приводных подвесок мощность и скорость конвейера убывают нелинейным образом, а продольные напряжения в конвейерной ленте линейно повышаются. В целом,

**Abstract.** The results of the research presented in the article relate to a fundamentally new type of continuous transport machines-conveyors with a suspended load-carrying belt and a distributed drive. The main advantages of which are due to the features of the kinematic scheme, in which the load-bearing conveyor belt is held by the sides by means of roller suspensions on rolling guides closed along the route and does not interact with its base with supporting supports, and the drive is implemented according to the distributed scheme by the equipment of individual suspensions with individual motor-gear drives. A feature of such a kinematic scheme is the nature of the failures associated with the operation of highly loaded drive suspensions, the influence of which affects the main technical characteristics of the conveyor with a sufficiently increased number. The paper presents a mathematical model designed to calculate the dynamic characteristics of a conveyor with a suspended belt and a distributed drive when the types of failures characteristic of this conveyor design occur, associated with a break in the supply electrical circuit of the motor-gear drive of the suspensions. Based on the developed mathematical model for the reference design of a conveyor with a suspended belt and a distributed drive, a series of numerical calculations of dynamic characteristics in the event of failures of drive suspensions is performed. The obtained results allowed us to establish that with a reduction in the number of groups of consistently failed drive suspensions located with an equal step along the route, the technical characteristics of the conveyor deteriorate: the speed of movement of the load-bearing belt and the total power of the drives are reduced, and the longitudinal tensile stresses in the belt are increased. With an increase in the number of consistently failed drive suspensions within one group, the power and speed of the conveyor decrease nonlinearly, and the longitudinal stresses in the conveyor belt increase linearly. In general, the results of calculations of the technical characteristics of the reference idealized design demonstrated the possibility of the conveyor operation in case of failure of 90% of the drive suspensions. The actual performance indicators are determined by the technical characteristics of the used gear

результаты расчетов технических характеристик эталонной идеализированной конструкции продемонстрировали возможность работы конвейера при отказе 90% приводных подвесок. Реальные эксплуатационные показатели определяются техническими характеристиками используемых мотор-редукторных приводов.

**Ключевые слова:** конвейер ленточный, лента подвесная, модель математическая, отказ, подвеска, привод распределенный, обрыв электроцепи.

**Дата принятия к публикации:** 12.07.2021  
**Дата публикации:** 25.09.2021

#### Сведения об авторе:

**Толкачев Евгений Николаевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Подъемно-транспортные машины и оборудование» ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», e-mail: [tolkachev\\_en@mail.ru](mailto:tolkachev_en@mail.ru).  
ORCID: 0000-0002-2567-6336

motor drives.

**Keywords:** belt conveyor, suspended belt, mathematical model, failure, suspension, distributed drive, electric circuit breakage.

**Date of acceptance for publication:** 12.07.2021  
**Date of publication:** 25.09.2021

#### Author's information:

**Evgeniy N. Tolkachev** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department “Lifting and transport machines and equipment” at Bryansk State Technical University, e-mail: [tolkachev\\_en@mail.ru](mailto:tolkachev_en@mail.ru).  
ORCID: 0000-0002-2567-6336

#### Благодарности

*Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых-докторов наук №МД-422.2020.8*

#### Acknowledgements

*The study was supported by Presidential Grant for Governmental Support to Young Russian Scientists No. №MD-422.2020.8*

## 1. Введение

Ленточные конвейеры имеют широкое распространение во всем мире в качестве средства транспортирования насыпных грузов. Являясь наиболее производительным, достаточно эффективным и экономичным в сравнении с прочими видами транспорта, ленточные конвейеры имеют практически неограниченные возможности адаптации технических решений к ландшафту местности географического региона [1-4]. Также ленточные конвейеры могут рассматриваться как важный структурный элемент при реализации эффективных транспортно-логистических технологий в урбанизированной среде [5]. Реализации трасс сложной пространственной конфигурации и значительной протяженности стала возможной благодаря использованию промежуточных приводов, которые позволяют значительно сократить напряжения в ленте, исключить эксплуатационные затраты от использования перегрузочных пунктов, применяемых при каскадной схеме трассы из нескольких конвейеров,

повысить энерговооруженность и надежность [6-9].

Тем не менее, классические ленточные конвейеры имеют ряд существенных трудно устранимых недостатков, обусловленных взаимодействием движущейся грузонесущей конвейерной ленты и стационарных роликовых опор, которые приводят к образованию просыпи, пылению и дроблению транспортируемого груза, интенсивному изнашиванию конвейерной ленты, роликоопор и стоек металлоконструкции, а также повышению сопротивления движению [10-13].

Наиболее широко известные и распространенные типы промежуточных приводов ленточных конвейеров также не лишены недостатков. Барабанный привод требует сооружения добавочного пункта перегрузки, допускает буксование барабанов при недостаточной загрузке ленты и создает ее дополнительный перегиб. Тяговая способность привода линейного типа зависит от его длины, наполненности грузом и угла наклона конвейера [14-16], поэтому в условиях высокой неравномерности грузопотока, когда прижатие двух лент оказывается недоста-

точным для осуществления тяги промежуточным приводом, создается высокая вероятность обрыва грузонесущей ленты на головном барабане [3].

В соответствии с основными направлениями совершенствования конвейерного транспорта [2, 17] в последние десятилетия ведется научно-исследовательская и опытно-конструкторская работа по разработке ленточных конвейеров с подвесной грузонесущей лентой [11, 18], в том числе и с использованием распределенной схемы привода [19, 20]. Такие конвейеры не только лишены основных недостатков классических ленточных конвейеров, но и, как показывают результаты натурных экспериментов и эксплуатационных испытаний, значительно их превосходят [11, 19, 21].

Конструкция конвейера с подвесной лентой и распределенным приводом (рис. 1), базируется на зарекомендовавшем себя в эксплуатации конвейере с подвесной лентой и стационарным сосредоточенным приводом

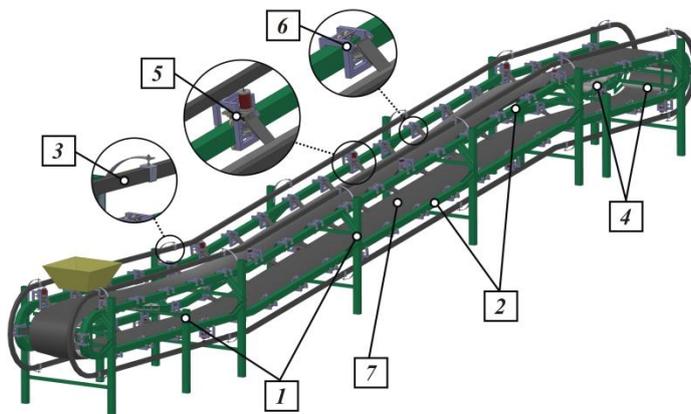


Рис. 1. Общий вид конвейера с подвесной лентой и распределенным приводом: 1 – став; 2 – направляющие качения; 3 – токоведущий троллейный шинопровод; 4 – стационарные ролюкоопоры; 5 – приводные подвески; 6 – неприводные подвески; 7 – лента

## 2. Постановка задачи исследования

Конвейеры с подвесной грузонесущей лентой и распределенным приводом в виде системы значительного числа высоконагруженных и движущихся однотипных приводных и неприводных подвесок являются сложным техническим объектом, подвер-

[18, 20, 22]. На рис. 2 показан общий вид токоведущего троллейного шинопровода [24]. Однако принципиальное отличие кинематической схемы, заключающееся в распределении тягового усилия вдоль трассы посредством оборудования подвесок индивидуальным мотор-редукторным приводом и регулируемым устройством прижатия ведущего ролика к направляющей качения, позволяет полностью исключить из конструкции металлоемкие и габаритные приводную и натяжную станции, а, следовательно, устранить проблему достаточно сложного предварительного натяжения конвейерной ленты и снять ограничения с максимальной протяженности става конвейера. Дополнительным мероприятием, направленным на снижение металлоемкости става конвейера, является его оптимальное проектирование, которое применительно к конвейеру с подвесной лентой рассмотрено в [23].

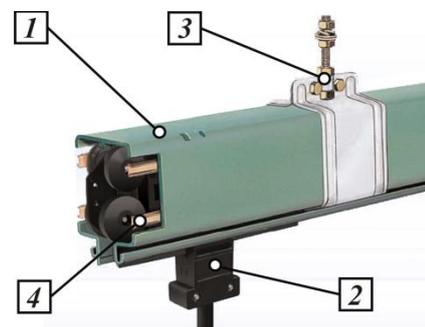


Рис. 2. Общий вид токоведущего троллейного шинопровода: 1 – защитный короб; 2 – токосъемник; 3 – подвесной кронштейн; 4 – медная шина

женным в процессе эксплуатации различным видам отказов вследствие протекающих при их работе деструктивных физических процессов различной природы – усталости, изнашивания, старения, коррозии. Тем не менее, имеется ряд обусловленных особенностями конструкции специфических видов потенциально возможных отказов, способ-

ных оказать определенное негативное воздействие на основные технические характеристики процесса транспортирования – затрачиваемую мощность, производительность и скорость транспортирования. В частности, к их числу относятся отказы, связанные с разрывом подводящей электрической цепи питания мотор-редукторного привода подвески, который, в частности, может быть обусловлен изнашиванием скользящих медно-графитовых башмаков каретки токосъемника, либо отсоединением или разрушением соединительных токопроводящих кабелей [22, 25].

Особенностью протекания названных отказов является то, что сами по себе единичные отказы приводных подвесок практически не могут заметно сказаться на ухудшении технических характеристик конвейера в целом вследствие значительного числа этих подвесок и возможности перераспределения эксплуатационной нагрузки со стороны грузонесущей ленты и транспортируемого груза на остальные подвески, оставшиеся в работоспособном состоянии. Поэтому единичный отказ приводной подвески не может являться основанием для остановки работы конвейера с целью проведения ремонтно-восстановительных мероприятий по устранению такого единичного отказа. Заметное влияние на ухудшение основных технических характеристик конвейера с подвесной лентой и распределенным приводом в целом могут оказать лишь множественные отказы приводных подвесок. Для каждого конвейера во времени они формируют случайный поток отказов, имеющий выраженный вероятностный характер как по случайным моментам времени возникновения отказов, так и по случайной его локализации в той или иной приводной подвеске. Поэтому практический интерес представляет количественный анализ степени влияния количества и распределения по длине конвейерной ленты отказавших подвесок на основные технические характеристики конвейера.

### 3. Методология исследования

Для моделирования динамических процессов, протекающих при отказе приводов ведущих подвесок, не оборудованных встроенными тормозами нормально-замкнутого типа, предлагается использовать следующую математическую модель.

Разрыв цепи электропитания сопровождается остановкой электродвигателя мотор-редуктора, при этом приводной ролик подвески имеет возможность вращения. В таком случае крутящий момент на валу мотор-редуктора обращается в ноль, а сопротивления движению остаются неизменными.

Величина, характеризующая подачу электрического тока на привод ведущей подвески, в общем виде может быть записана в виде вектор-столбца, количество элементов которого соответствует количеству приводных подвесок на одном контуре направляющих качения трассы конвейера:

$$N_{omk} = (n_{a,b}),$$

где  $n$  – показатель питания электрическим током  $i$ -й подвески ( $n=0$  – ток не подается,  $n=1$  – ток подается);  $a$  – количество строк матрицы, равное количеству приводных подвесок ( $n_n$ );  $b$  – количество столбцов матрицы, равное единице.

Для моделирования случайного распределения отказов приводных подвесок может быть использована функция  $rnd(n)$ , результат расчета которой необходимо округлить до целого значения.

Связь отказа приводных подвесок со временем обеспечивается следующим условием:

$$N_{omk}(t) = \begin{cases} k_{pc}, & \text{если } t \leq t_{omk}; \\ \text{иначе } N_{om}, & \end{cases}$$

где  $t_{omk}$  – время наступления отказа;  $k_{pc} = (1_{a,b})$  – величина, отражающая работоспособное состояние всех приводов ведущих подвесок.

Графики изменения величин, характеризующих подачу электрического тока на приводы ведущих подвесок, в зависимости от времени наступления отказа в общем виде представлены на рис. 3.

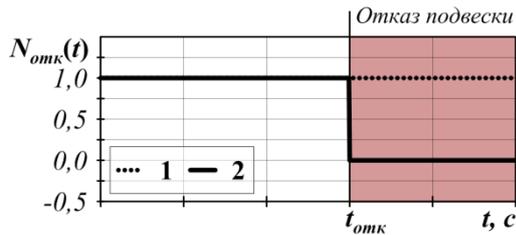


Рис. 3. Графики изменения величин, характеризующих подачу электрического тока и приводы ведущих подвесок:

- 1 – в штатном режиме работы;
- 2 – при наступлении отказа

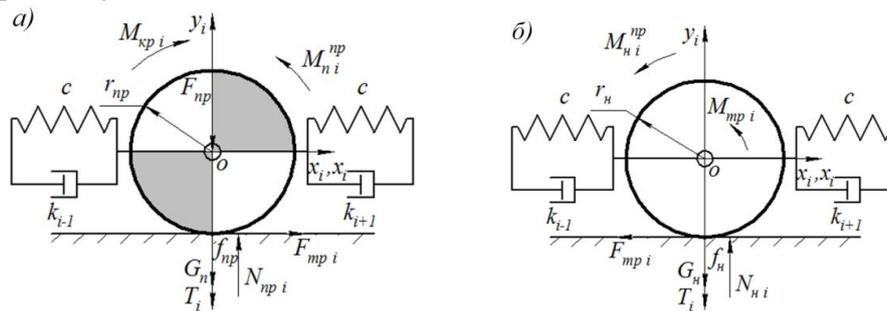


Рис. 4. Расчетные схемы роликов: а – приводного; б – холостого

$$\begin{cases} m_{ni}^{np} \ddot{x}_i = F_{cu_i} + (G_{nc_i} + T_i \sin \beta_i) \sin \alpha_i + c(x_{i-1} - 2x_i + x_{i+1}) + k_i(\dot{x}_{i-1} - 2\dot{x}_i + \dot{x}_{i+1}); \\ m_{ni}^{np} \ddot{y}_i = N_{np_i} - G_{nc_i} \cos \alpha_i - F_{np_i}; \\ J_{ni}^{np} \ddot{\phi}_i = N_{омк}(t) \cdot M_{кpi} - F_{cu_i} r_{np} - N_{np_i} f_{np} \operatorname{sgn}(\dot{x}_i) - M_{ni}^{np} \operatorname{sgn}(\dot{x}_i), \end{cases}$$

где  $F_{cu_i} = F_{cu}(x_i, x_{i+1}, x_{i-1}, \dot{x}_i, \dot{x}_{i+1}, \dot{x}_{i-1}, \dot{\phi}_i)$  – сила сцепления приводного ролика ведущей подвески;  $M_{кpi} = M_{кp}(\dot{\phi}_i)$  – крутящий момент на выходном валу привода ведущей подвески;  $\dot{x}_i, \dot{x}_{i-1}, \dot{x}_{i+1}$  – линейные скорости исходного, предыдущего и последующего роликов;  $x_i, x_{i-1}, x_{i+1}$  – перемещения исходного, предыдущего и последующего роликов;  $m_{ni}^{np}$ ,

$$\begin{cases} m_{ni}^{np} \ddot{x}_i = -F_{cu_i} + (G_{ni} + T_i \sin \beta_i) \sin \gamma_i + c(x_{i-1} - 2x_i + x_{i+1}) + k_i(\dot{x}_{i-1} - 2\dot{x}_i + \dot{x}_{i+1}); \\ m_{ni}^{np} \ddot{y}_i = N_{ni} - (G_{ni} + T_i \sin \beta_i) \cos \gamma_i; \\ J_{ni}^{np} \ddot{\phi}_i = F_{cu_i} r_n - N_{ni} f_{np} \operatorname{sign}(\dot{x}_i) - M_{mpi} \operatorname{sgn}(\dot{x}_i) - M_{ni}^{np} \operatorname{sgn}(\dot{x}_i), \end{cases}$$

где  $M_{mpi} = \mu_{np} r_{oi}$  – момент трения скольжения в оси неприводного ролика;  $m_{ni}^{np}$ ,  $J_{ni}^{np}$  – суммарные приведенные масса и момент инерции ведомой подвески.

Системы уравнений движения подвесок преобразованы с учетом возможности проскальзывания только приводных роликов модели. Движение всех подвесок одного

Кроме того, для исключения самопроизвольного перемещения механической системы под действием сил сопротивлений в обратном направлении, в математическую модель также вводится функция знака  $\operatorname{sgn}(x)$  [26]. Таким образом, с учетом выше перечисленных особенностей уравнения движения приводного (рис. 4, а) и холостого (рис. 4, б) роликов [18, 22, 27, 28] при моделировании отказа записываются в виде следующих выражений:

$J_{ni}^{np}$  – суммарные приведенные масса и момент инерции ведущей подвески;  $c$  – приведенная жесткость упругого элемента (ленты);  $k_i$  – коэффициент сопротивления демпфирующего элемента.

Система уравнений движения неприводного ролика ведомой подвески:

контура направляющей качения конвейера с подвесной лентой и распределенным приводом согласно математической модели описывается системой дифференциальных уравнений первого порядка, количество которых определяется числом и типом подвесок.

Общий вид системы уравнений выглядит как

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{dx_1}{d\tau} &= \dot{x}_1; \\
 \frac{d\dot{x}_1}{d\tau} &= \frac{1}{m_{h1}^{np}(x_1)} \left[ F_{cu1} + (G_{n1} + T_1 \sin \beta_1) \cdot \sin \alpha(x_1) + c \cdot (x_n - 2x_1 + x_2 - L_{mp}) + k_1(\dot{x}_n - 2\dot{x}_1 + \dot{x}_2) \right]; \\
 \frac{d\varphi_1}{d\tau} &= \dot{\varphi}_1; \\
 \frac{d\dot{\varphi}_1}{d\tau} &= \frac{1}{J_{n1}^{np}} \left[ N_{om\kappa}(t)_1 \cdot M_{kp1} - F_{cu1} r_n - M_{n1}^{np} \cdot \operatorname{sgn}(\dot{x}_1) - f(G_{nc1} \cos \alpha_1 + F_{np}) \cdot \operatorname{sgn}(\dot{x}_1) \right]; \\
 \frac{dx_2}{d\tau} &= \dot{x}_2; \\
 \frac{d\dot{x}_2}{d\tau} &= \frac{r_h}{J_{h2}^{np} + m_{h2}^{np} r_h^2} \left\{ -M_{h2}^{np} \cdot \operatorname{sgn}(\dot{x}_2) + r_h \left[ (G_{h2} + T_2 \sin \beta_2) \sin \gamma_2 + c(x_1 - 2x_2 + x_3) + \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + k_2(\dot{x}_1 - 2\dot{x}_2 + \dot{x}_3) \right] - (f_{hp} + \mu_{hp_o} r_o) (G_{h2} + T_2 \sin \beta_2) \cos \gamma_2 \cdot \operatorname{sgn}(\dot{x}_2) \right\}; \\
 \frac{dx_3}{d\tau} &= \dot{x}_3; \\
 \frac{d\dot{x}_3}{d\tau} &= \frac{r_h}{J_{h3}^{np} + m_{h3}^{np} r_h^2} \left\{ -M_{h3}^{np} \cdot \operatorname{sgn}(\dot{x}_3) + r_h \left[ (G_{h3} + T_3 \sin \beta_3) \sin \gamma_3 + c(x_2 - 2x_3 + x_4) + \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + k_2(\dot{x}_2 - 2\dot{x}_3 + \dot{x}_4) \right] - (f_{hp} + \mu_{hp_o} r_o) (G_{h3} + T_3 \sin \beta_3) \cos \gamma_3 \cdot \operatorname{sgn}(\dot{x}_3) \right\}; \\
 \dots \\
 \frac{dx_j}{d\tau} &= \dot{x}_j; \\
 \frac{d\dot{x}_i}{d\tau} &= \frac{1}{m_{hi}^{np}} \left[ F_{cui} + (G_{ni} + T_i \sin \beta_i) \sin \alpha_i + c(x_{i-1} - 2x_i + x_{i+1}) + k_i(\dot{x}_{i-1} - 2\dot{x}_i + \dot{x}_{i+1}) \right]; \\
 \frac{d\varphi_j}{d\tau} &= \dot{\varphi}_j; \\
 \frac{d\dot{\varphi}_i}{d\tau} &= \frac{1}{J_{ni}^{np}} \left[ N_{om\kappa}(t)_i \cdot M_{kpi} - F_{cui} r_n - M_{ni}^{np} \cdot \operatorname{sgn}(\dot{x}_i) - f_1(G_{nci} \cos \alpha_i + F_{np}) \cdot \operatorname{sgn}(\dot{x}_i) \right]; \\
 \dots \\
 \frac{dx_n}{d\tau} &= \dot{x}_n; \\
 \frac{d\dot{x}_n}{d\tau} &= \frac{r_h}{J_{hn}^{np} + m_{hn}^{np} r_h^2} \left\{ -M_{hn}^{np} \cdot \operatorname{sgn}(\dot{x}_n) + r_h \left[ (G_{hn} + T_n \sin \beta_n) \sin \gamma_n + c(x_{n-1} - 2x_n + x_{n+1} + L_{mp}) + \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + k_n(\dot{x}_{n-1} - 2\dot{x}_n + \dot{x}_{n+1}) \right] - (f_{hp} + \mu_{hp_o} r_o) (G_{hn} + T_n \sin \beta_n) \cos \gamma_n \cdot \operatorname{sgn}(\dot{x}_n) \right\}.
 \end{aligned} \right.$$

где



$$F_{cu}(x_1, x_2, x_n, \dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{x}_n, \dot{\varphi}_1, t_1) = \begin{cases} \mu_{np}(G_{nc1} \cos \alpha_1 + F_{np}), & \text{если } \dot{\varphi}_1 r_{np} - \dot{x}_1 > 0; \\ -\mu_{np}(G_{nc1} \cos \alpha_1 + F_{np}), & \text{если } \dot{\varphi}_1 r_{np} - \dot{x}_1 < 0; \end{cases}$$

$$= \frac{1}{J_{ni}^{np} + m_{ni}^{np} r_{np}^2} \left\{ m_{ni}^{np} r_{np} (N_{omk}(t)_1 \cdot M_{kp1} - M_{n1}^{np} \cdot \text{sgn}(\dot{x}_1) - N_{np1} f_1 \cdot \text{sgn}(\dot{x}_1)) - \right.$$

$$\left. - J_{n1}^{np} [(G_{n1} + T_1 \sin \beta_1) \sin \alpha_1 + c(x_n - 2x_1 + x_2 - L_{mp}) + k_1(\dot{x}_n - 2\dot{x}_1 + \dot{x}_2)] \right\}.$$

при начальных условиях

$$x_i(\tau = 0) = -h_n(i-1), \quad \dot{x}_i(\tau = 0) = 0, \quad \varphi_i(\tau = 0) = 0, \quad \dot{\varphi}_i(\tau = 0) = 0.$$

Для решения системы дифференциальных уравнений используется численный метод Рунге-Кутты 4-го порядка.

В качестве эталонного варианта выбран конвейер с подвесной лентой и распределенным приводом, со следующими техническими характеристиками (табл. 1), конфигурацией трассы (рис. 5) и расположением подвесок (рис. 6) [29, 30].

Моделирование динамики конвейера выполнялось в интервале времени от 0 до 100 с шагом 0,01 с. Время наступления отказа приводной подвески № 1 принято равным 30 с. Начальные линейные перемещения подвесок равны длине пути от начала грузовой ветви вдоль направляющих качения до соответствующих подвесок, в то время как угловые перемещения, а также линейные и угловые скорости принимались равными 0.

Таблица 1

Технические характеристики эталонного конвейера

Технический параметр	Значение параметра
Общие	
Длина горизонтальной проекции конвейера $L$ , м	30
Радиус концевой поворотной секции $R$ , м	0,625
Угол наклона конвейера $\alpha$ , град	0
Производительность расчетная $Q_p$ , т/ч	200
Объемная плотность транспортируемого груза $\rho$ , т/м <sup>3</sup>	1,2
Угол естественного откоса груза $\varphi$ , град	20
Скорость транспортирования расчетная $v_{zp}$ , м/с	1,0
Общее количество подвесок на одном контуре $n$ , шт.	80
Количество приводных подвесок (дискретных участков) на контуре $n_n$ , шт.	20
Количество подвесок в дискретном участке на одном контуре $n_{dy}$ , шт.	4
Шаг подвесок $h_n$ , м	0,8
Подвесок	
Сила прижатия прижимного устройства ведущей подвески $F_{np}$ , Н	140
Номинальный крутящий момент на валу привода ведущей подвески $M_{крн}$ , Н·м	8,0
Номинальная скорость вращения $n_n$ , об/мин	148,0
Скорость вращения без нагрузки $n_x$ , об/мин	165,0
Масса металлоконструкции прижимной секции $m_{мкнс}$ , кг	1,0

Окончание табл. 1

Технический параметр	Значение параметра
Масса приводного ролика $m_{np}$ , кг	2,0
Масса мотор-редуктора $m_{mp}$ , кг	4,2
Масса металлоконструкции несущей секции $m_{мкнс}$ , кг	7,0
Масса неприводного ролика $m_{np}$ , кг	0,07
Масса металлоконструкции неприводной подвески $m_{мкнт}$ , кг	5,0
Наружный радиус приводного ролика $r_{np}$ , м	0,065
Наружный радиус холостого ролика $r_{np}$ , м	0,025
Внутренний радиус ролика $r_o$ , м	0,006
Коэффициент трения качения приводного ролика (резина-сталь) $f_{np}$ , м	0,0077
Коэффициент трения скольжения приводного ролика (резина-сталь) $\mu_{np}$	0,5
Коэффициент трения качения неприводного ролика (сталь-сталь) $f_{np}$ , м	0,001
Коэффициент трения скольжения в оси неприводного ролика $\mu_{np_o}$	0,03
Количество холостых роликов в приводной подвеске $k_{II}$ , шт.	6
Количество холостых роликов в неприводной подвеске $k_H$ , шт.	4
Ленты	
Ширина ленты $B$ , м.	0,8
Число прокладок ленты $i_0$ , шт.	3
Толщина верхней обкладки $\delta_1$ /нижней обкладки $\delta_2$ , мм	1,0/2,0
Толщина тягового каркаса ленты $y_{max}$ , мм	3
Прочность ленты $[\sigma_p]$ , Н/мм	400
Модуль упругости ленты $E_x$ , МПа	380
Модуль упругости ленты в поперечном направлении $E_z$ , МПа	190
Коэффициент жесткости $k$ , кН/м	570
Коэффициент затухания колебаний $\zeta$	0,05

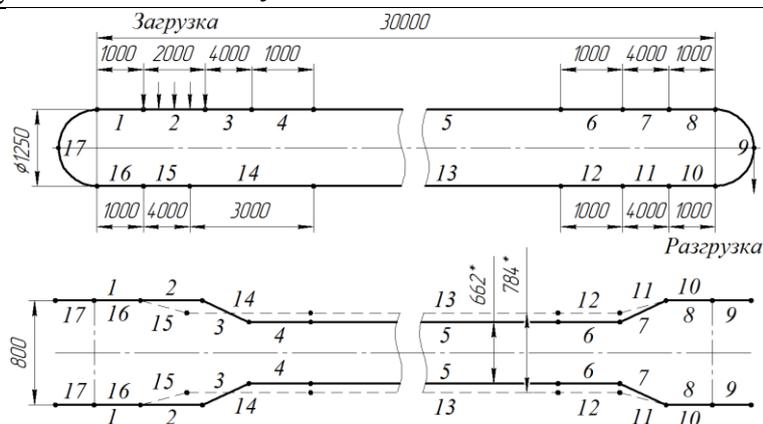


Рис. 5. Схема трассы эталонного конвейера с подвесной лентой и распределенным приводом:  
 1-8 – грузовая ветвь; 10-16 – холостая ветвь; 9, 17 – концевые поворотные участки;  
 2 – загрузочный пункт; 3, 11 – желобообразующие участки; 7, 15 – выполаживающие участки; 5, 13 – линейные участки



Рис. 6. Схема исходного расположения ведущих и ведомых подвесок на трассе конвейера с подвесной лентой и распределенным приводом

В работе [22] представлены результаты сравнительной оценки влияния результатов моделирования динамических характеристик конвейеров для случаев упорядоченного и произвольного расположения отказавших приводных подвесок, а также при различном времени наступления отказа. Установлено, что для выполнения расчетов, связанных с исследованием влияния на показатели конвейера общего количества отказавших приводных подвесок достаточно выявить основные промежуточные расчетные случаи упорядоченного расположения отказавших подвесок. В табл. 2 представлены принятые в соответствии с параметрами эталонной конструкции конвейера расчетные варианты взаимного расположения отказавших подвесок на трассе.

В приведенной табл. 2 расчетные варианты имеют обозначение в виде  $B_{X,Y}$ , где  $X$  — общее количество отказавших приводных подвесок;  $Y$  — количество групп последовательно отказавших приводных подвесок, расположенных с равным шагом вдоль трассы.

#### 4. Обсуждение результатов

Обобщенные результаты распределения величин главных технических характеристик конвейера с подвесной лентой и распределенным приводом в зависимости от количества и конфигурации на трассе отказавших приводных подвесок представлено на рис. 7. Видно, что при сокращении количества групп последовательно отказавших приводных подвесок, расположенных с равным шагом вдоль трассы, технические характеристики конвейера ухудшаются: скорость движения грузонесущей ленты и общая мощность приводов снижаются, а продольные

растягивающие напряжения в ленте повышаются.

Представленные результаты подтверждают, что при увеличении концентрации отказавших приводных подвесок в одной области, т.е. при отказе приводных подвесок одной группой последовательно расположенных друг за другом подвесок, исследуемые технические конвейера принимают наиболее неблагоприятные значения [22]. Поэтому далее более подробно рассматриваются результаты расчета динамических характеристик в зависимости от количества отказавших приводных подвесок, находящихся в составе одной группы последовательно расположенных приводных подвесок.

Изменение во времени мощности конвейера и скорости движения грузонесущего полотна при отказах приводных подвесок происходит в соответствии с зависимостями, приведенными на рис. 8.

В моделируемый момент времени наступления отказа приводных подвесок (10 с) происходит достаточно резкое падение величин исследуемых динамических характеристик. После чего, для расчетных вариантов  $B_{2,1} - B_{17,1}$  мощность и скорость конвейера принимают некоторые средние значения и сохраняют их на протяжении оставшегося времени моделирования. Для вариантов  $B_{18,1} - B_{20,1}$  исследуемые динамические характеристики обращаются в ноль. В целом из результатов моделирования видно, что при увеличении количества отказавших приводных подвесок мощность и скорость конвейера убывают нелинейным образом. Зависимости средних значений мощности конвейера и скорости транспортирования, измеренных после наступления отказа, от количества вышедших из строя приводных подвесок приведены на рис. 9.

Таблица 2

Основные промежуточные расчетные варианты сочетания отказавших приводных подвесок эталонной конструкции конвейера (табл. 1)

Вариант	Номер приводной подвески																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$B_{0,0}$																				
$B_{1,1}$	X																			
$B_{2,1}$	X	X																		
$B_{3,1}$	X	X	X																	
$B_{4,1}$	X	X	X	X																
$B_{5,1}$	X	X	X	X	X															
$B_{6,1}$	X	X	X	X	X	X														
$B_{7,1}$	X	X	X	X	X	X	X													
$B_{8,1}$	X	X	X	X	X	X	X	X												
$B_{9,1}$	X	X	X	X	X	X	X	X	X											
$B_{10,1}$	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X										
$B_{11,1}$	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X									
$B_{12,1}$	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X								
$B_{13,1}$	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X							
$B_{14,1}$	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X						
$B_{15,1}$	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X					
$B_{16,1}$	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X				
$B_{17,1}$	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			
$B_{18,1}$	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
$B_{19,1}$	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
$B_{20,1}$	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
$B_{2,2}$											X									
$B_{4,2}$											X	X								
$B_{6,2}$											X	X	X							
$B_{8,2}$											X	X	X	X						
$B_{10,2}$											X	X	X	X	X					
$B_{12,2}$											X	X	X	X	X	X				
$B_{14,2}$											X	X	X	X	X	X	X			
$B_{16,2}$											X	X	X	X	X	X	X	X		
$B_{18,2}$											X	X	X	X	X	X	X	X	X	
$B_{4,4}$																				
$B_{8,4}$																				
$B_{12,4}$																				
$B_{16,4}$																				
$B_{5,5}$																				
$B_{10,5}$																				
$B_{15,5}$																				
$B_{10,5}$																				

Продольные напряжения в конвейерной ленте при отказе приводных подвесок изменяются следующим образом (рис. 10, а). Наглядно видно, что с увеличением количества вышедших из строя приводных подвесок величина напряжений в конвейерной ленте по-

вышается во всех точках трассы. На рис. 10, б представлен график изменения максимальных значений продольных напряжений, соответствующих участку конечному поворотному участку 9.

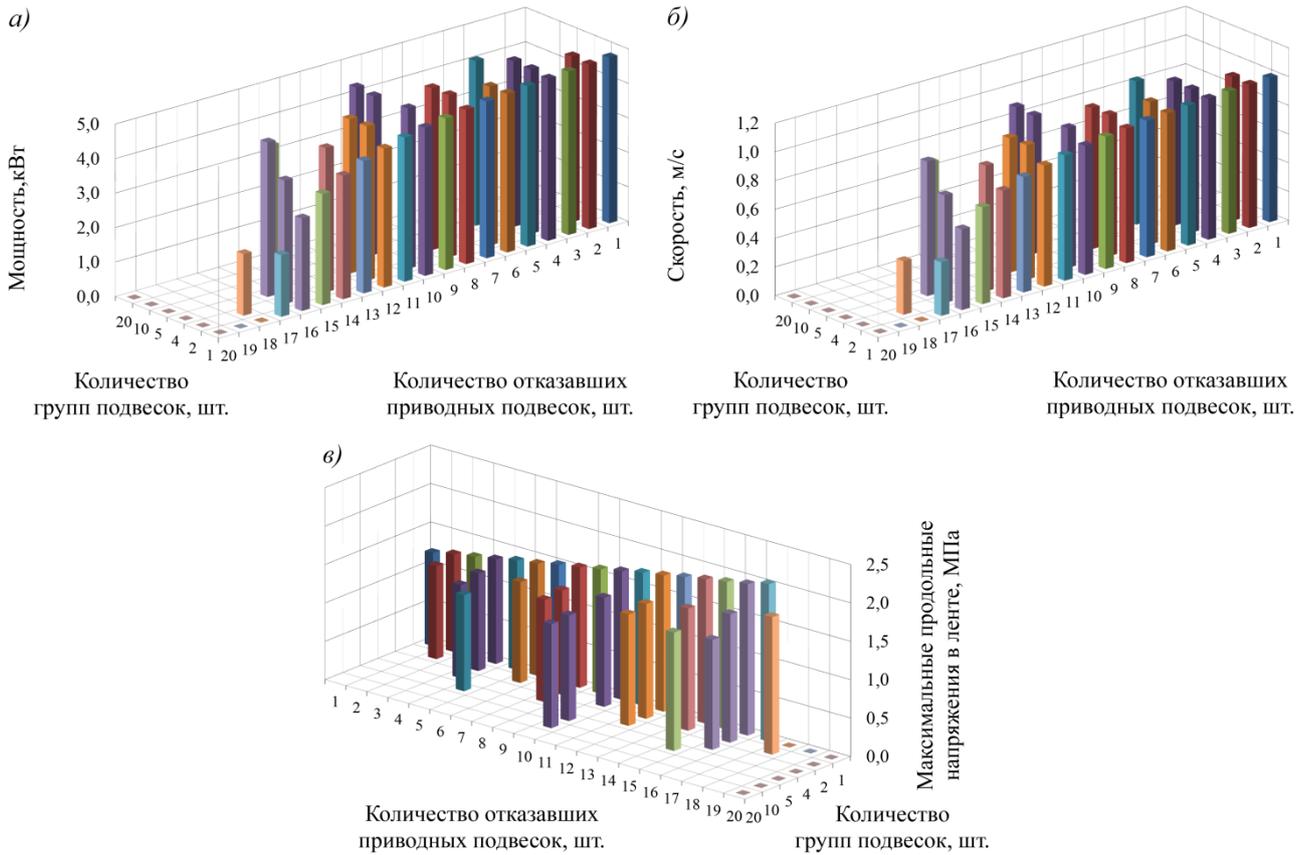


Рис. 7. Распределение величин технических характеристик конвейера с подвесной лентой и распределенным приводом в зависимости от взаимного сочетания на трассе отказавших приводных подвесок: а – общей мощности приводов; б – скорости транспортирования; в – максимальных продольных напряжений в ленте

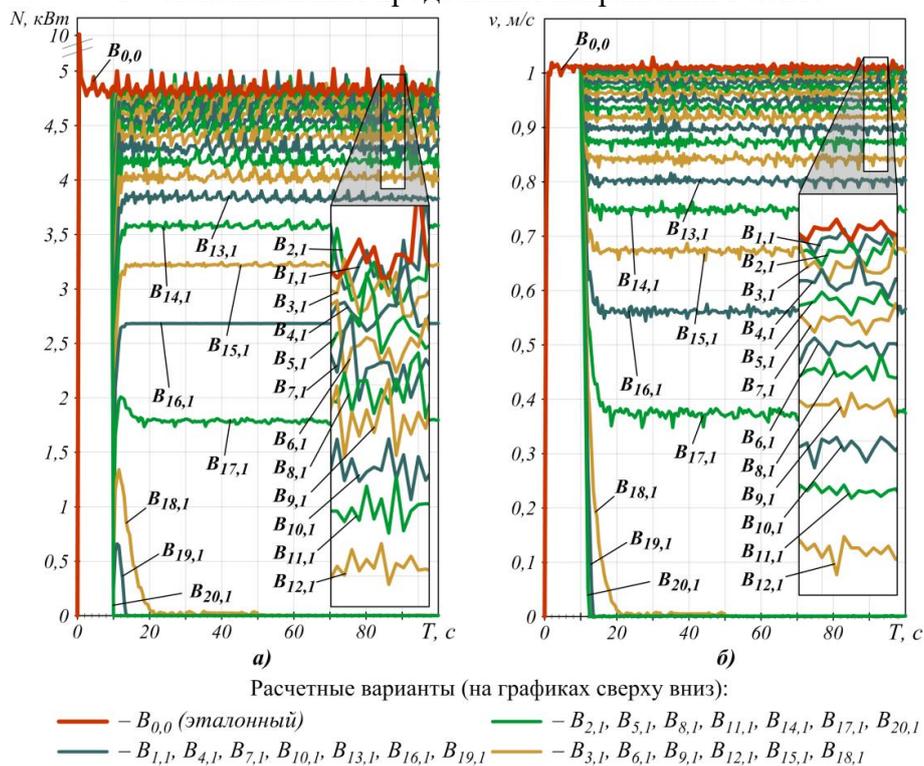


Рис. 8. Изменение во времени в зависимости от количества отказавших подвесок технических характеристик конвейера: а – мощности; б – скорости

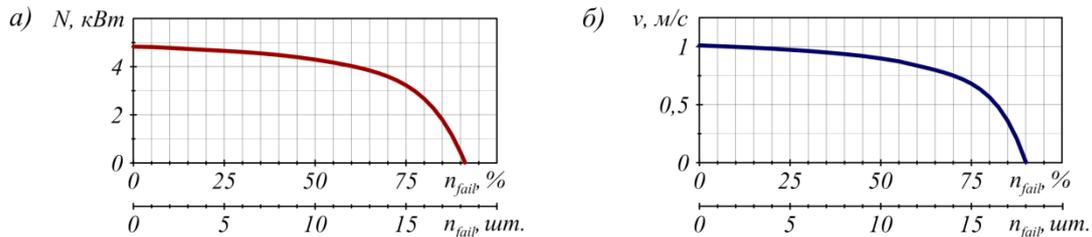


Рис. 9. Изменение в зависимости от количества отказавших подвесок технических характеристик конвейера: а – мощности; б – скорости

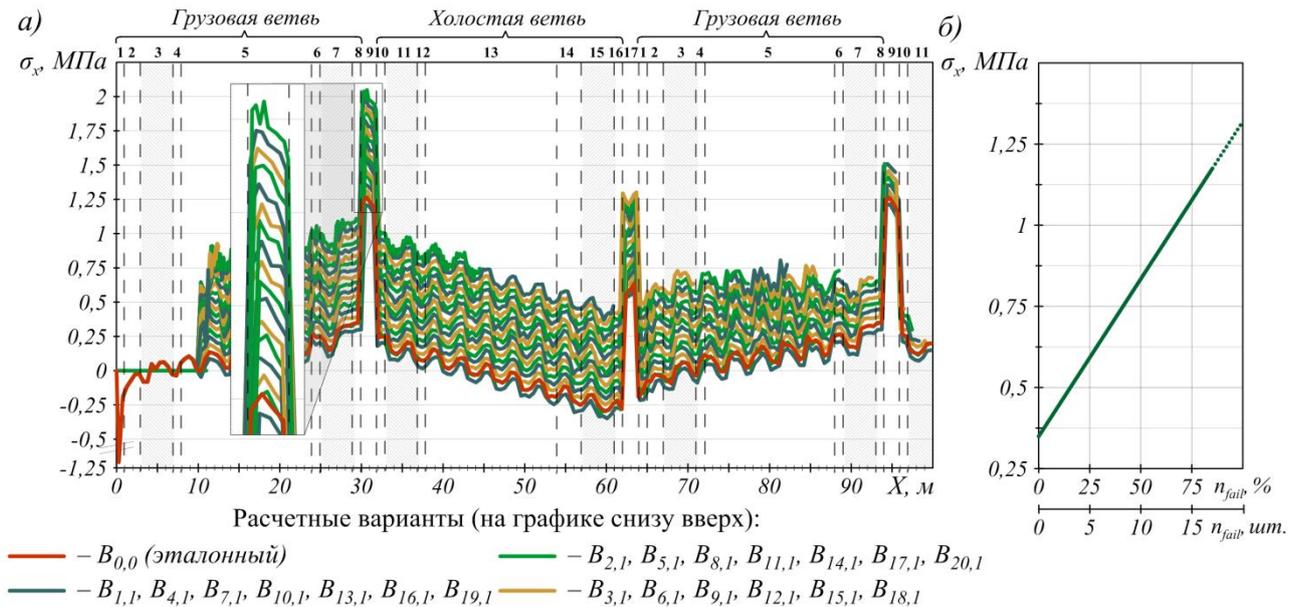


Рис. 10. Зависимости напряжений в ленте конвейера от количества отказавших подвесок: а – продольных напряжений вдоль трассы конвейера; б – максимальных продольных напряжений

### 5. Заключение

Конвейер с подвесной лентой и распределенным приводом эталонной конструкции способен осуществлять транспортирование груза со сниженными техническими характеристиками при отказе до 90% от общего количества приводных подвесок. Реальные эксплуатационные показатели главным образом определяются техническими характеристиками, используемых в подвесках мотор-редукторных приводах.

Используемый подход моделирования отказов ведущих подвесок конвейера позволяет оценивать допустимые значения основных технических характеристик и, таким образом, планировать диагностические или планово-предупредительные ремонты конвейеров с подвесной грузонесущей лентой и распределенным приводом в зависимости от их конструктивных параметров, трассы и вида транспортируемого груза, режима эксплуатации.

## Список литературы

1. Левис А., Гребенщиков А.Л. Транспортирование насыпных материалов конвейерами большой протяженности // Горная промышленность. 2003. № 5. С. 27-29.
2. Пертен Ю.А. Конвейерный транспорт XXI века // Транспорт Российской Федерации. 2005. № 1. С.42-43.
3. Труфанова И.С. Обоснование рациональных параметров промежуточных линейных приводов с прижимными элементами для ленточных конвейеров: дис. ... канд. тех. наук. / СПб., 2014. 151 с.
4. Karolewski B., Ligocki P. Modelling of long belt conveyors // Maintenance and reliability. 2014. Vol. 16, No. 2. P. 179-187.
5. Короткий А.А., Лагереv А.В., Месхи Б.Ч., Лагереv И.А., Панфилов А.В., Таричко В.И. Транспортно-логистические технологии и машины для цифровой урбанизированной среды. Ростов-на-Дону, ДГТУ, 2019. 268 с.  
DOI: <http://doi.org/10.5281/zenodo.3551132>
6. Дьяков В.А., Шахмейстер Л.Г., Дмитриев В.Г., Запенин И.В., Пухов Ю.С., Шешко Е.Е. Ленточные конвейеры в горной промышленности. М.: Недра, 1982. 349 с.
7. Тарасов Ю.Д., Юнгмейстер Д.А., Авдеев В.А. Промежуточные приводы ленточных конвейеров. М.: Недра, 1996. 157 с.
8. Alspaugh M.A. Longer Overland Conveyors with Distributed Power. Rockwell Automation Fair. St Louis, MO, USA, 2005. 10 p.
9. Хачатрян С.А., Киборт А.Н. Экономическая эффективность применения многоприводных ленточных конвейеров Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2013. № 3. С. 385-389.
10. Swinderman R.T., Goldbeck R.T., Marti A.D. Foundations-3. The Practical Resource for Total Dust and Material Control. USA: Martin Engineering Neponset, Illinois, 2002. 216 p.
11. Толкачев Е.Н. Выбор рациональных конструктивных параметров конвейера с подвесной лентой, распределенным приводом и вертикально-замкнутой трассой: дис. ... канд. тех. наук. / Москва: МАДИ, 2017. 198 с.

## References

1. Levis A., Grebenshchekov A.L. Transportation of bulk materials by long-distance conveyors. *Gornaya promyshlennost*, 2003, No.5, pp. 27-29.
2. Perten Yu.A. *Konveyernyy transport XXI veka* [Conveyor transport of the XXI century]. *Transport Rossiyskoy Federatsii*, 2005, No.1, pp.42-43. (In Russian)
3. Trufanova I.S. *Obosnovanie ratsionalnykh parametrov promezhutochnykh lineynykh privodov s prizhimnymi elementami dlya lentochnykh konveyerov* [Substantiation of rational parameters of intermediate linear drives with clamping elements for belt conveyors]. Diss. Cand. Sci. (Engineering). Saint-Petersburg, 2014. 151 p. (In Russian)
4. Karolewski B., Ligocki P. Modelling of long belt conveyors. *Maintenance and reliability*, 2014, Vol. 16, No. 2, pp. 179-187.
5. Korotkiy A.A., Lagerev A.V., Meskhi B.Ch., Lagerev I.A., Panfilov A.V., Tarichko V.I. *Transportno-logisticheskie tekhnologii i mashiny dlya tsifrovoy urbanizirovannoy sredy* [Transport and logistics technologies and machines for the digital urban environment]. *Rostov-on-Don, Don State Technical University*, 2019. 268 p.  
DOI: <http://doi.org/10.5281/zenodo.3551132> (In Russian)
6. Spivakovskiy A.O., Dyakov V.A., Shahmeyster L.G., Dmitriev V.G., Zapenin I.V., Puhov Yu.S., Sheshko E.E. *Lentochnye konveyery v gornoy promyshlennosti* [Belt conveyors in mining industry]. Moscow, Nedra, 1982. 349 p. (In Russian)
7. Tarasov Yu.D., Yungmeyster D.A., Avdeev V.A. *Promezhutochnye privody lentochnykh konveyerov* [Intermediate drives of belt conveyors. Moscow, Nedra, 1996. 157 p. (In Russian)
8. Alspaugh M.A. Longer Overland Conveyors with Distributed Power. Rockwell Automation Fair. St Louis, MO, USA, 2005. 10 p.
9. Hachatryan S.A., Kibort A.N. *Ekonomicheskaya effektivnost primeneniya mnogoprivodnykh lentochnykh konveyerov* [Economic efficiency of using multidrive belt conveyors]. *Gornyy informatsionno-*

12. Lihua Zhao, Lin Yin. Typical failure analysis and processing of belt conveyor // *Procedia Engineering*. 2011. Vol. 26. P. 942-946.

13. Gurjar R.S., Yadav A. Failure Analysis of Belt Conveyor system in a Thermal Power Plant // *International Journal of Advanced Technology & Engineering Research (IJATER)*. 2012. Vol. 2. No.3. P. 195-200.

14. Goncharov K.A. A mathematical model of the distribution of tractive efforts between drives of a belt conveyor with hydraulic couplings at their failure // *Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS 2015): December 1-4, 2015 Tomsk Polytechnic University, IEEE Catalog Number: CFP1561Y-ART, 02-15-NSAP*.

15. Goncharov K.A., Grishin A.V. Theoretical study of influence of belt tension of intermediate belt conveyor drive on value of zone of relative slip of traction and carrying belts // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 87 (2017) 022008. DOI: 10.1088/1755-1315/87/2/022008.

16. Гончаров К.А., Гришин А.В. Экспериментальный стенд для исследования влияния конструкции промежуточного ленточного привода ленточного конвейера на его рабочие процессы // *Научно-технический вестник Брянского государственного университета*. 2017. № 1. С. 52-59. DOI: 10.22281/2413-9920-2017-03-01-52-59.

17. Ефременков А.Б., Казанцев А.А., Блащук М.Ю. Горные машины и оборудование. Введение в специальность. Ч.1. Томск: ТПУ, 2009. 152 с.

18. Лагереv А.В., Толкачев Е.Н., Бословяк П.В. Проектирование и исследования конвейеров с подвесной грузонесущей лентой. Брянск: РИО БГУ, 2016. 303 с.

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1197308>

19. Nuttall A. Design Aspects of Multiple Driven Belt Conveyors: Doctoral dissertation. Delft: Delft University of Technology, 2007. 158 p.

20. Лагереv А.В., Дунаев В.П. Конвейеры с подвесной грузонесущей лентой – инновационный вид машин непрерывного

*analiticheskii byulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)*, 2013, No.3, pp. 385-389. (In Russian)

10. Swinderman R.T., Goldbeck R.T., Marti A.D. Foundations-3. The Practical Resource for Total Dust and Material Control. USA: Martin Engineering Neponset, Illinois, 2002. 216 p.

11. Tolkachev E.N. Selection of rational design parameters of a conveyor with a suspended belt, a distributed drive and a vertically closed track. Diss. Cand. Sci. (Engineering). Moscow, 2017. 198 p. (In Russian)

12. Lihua Zhao, Lin Yin. Typical failure analysis and processing of belt conveyor. *Procedia Engineering*, 2011, Vol. 26, pp. 942-946.

13. Gurjar R.S., Yadav A. Failure Analysis of Belt Conveyor system in a Thermal Power Plant. *International Journal of Advanced Technology & Engineering Research*, 2012, Vol. 2, No.3, pp. 195-200.

14. Goncharov K.A. A mathematical model of the distribution of tractive efforts between drives of a belt conveyor with hydraulic couplings at their failure. *Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS 2015): December 1-4, 2015 Tomsk Polytechnic University, IEEE Catalog Number: CFP1561Y-ART, 02-15-NSAP*.

15. Goncharov K.A., Grishin A.V. Theoretical study of influence of belt tension of intermediate belt conveyor drive on value of zone of relative slip of traction and carrying belts. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, Vol. 87, 022008. DOI: 10.1088/1755-1315/87/2/022008.

16. Goncharov K.A., Grishin A.V. Experimental test bench for the study of impact of intermediate belt drive construction of belt conveyor on its operation. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2017, No.1, pp. 52-59. DOI: 10.22281/2413-9920-2017-03-01-52-59 (In Russian)

17. Efremenkov A.B., Kazantsev A.A., Blashchuk M.Yu. *Gornye mashiny i oborudovanie. Vvedenie v spetsialnost. CH.1. [Mining machines and equipment. Introduction to the specialty. V.1.]*. Tomsk, Izdatelstvo

транспорта // Справочник. Инженерный журнал, 2009. № 10. С. 9-14.

21. Лагереv А.В., Кулешов Д.Ю. Динамические процессы при переходных режимах работы дискретного участка конвейера с распределенным приводом // Вестник Брянского государственного технического университета. 2013. №2 (38). С. 50-56. DOI: 10.5281/zenodo.1302028

22. Лагереv А.В., Толкачев Е.Н., Гончаров К.А. Моделирование рабочих процессов и проектирование многоприводных ленточных конвейеров. Брянск: РИО БГУ, 2017. 384 с. DOI: 10.5281/zenodo.1196612

23. Лагереv А.В., Бословьяк П.В. Универсальная методика оптимального проектирования металлоконструкций конвейеров с подвесной лентой // Вестник Брянского государственного технического университета. 2014. № 1 (41). С. 31-36. DOI: 10.5281/zenodo.1302225

24. Московский Б.Г. Современные системы электропитания машин и механизмов. Порядок выбора шинопроводов для мостовых грузоподъемных кранов // Подъемно-транспортное дело. 2016. № 4-5 (86). С. 20-23.

25. Толкачев Е.Н. Математическая модель отказа приводов ведущих подвесок конвейера с подвесной лентой и распределенным приводом при разрыве электроцепи // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2017. № 2. С. 178-189. DOI: 10.22281/2413-9920-2017-03-02-178-189.

26. Никитин С.В. Динамическая модель ленточного конвейера // Современное машиностроение. Наука и образование. 2014. № 4. С. 722-731.

27. 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. DOI: 10.15866/iremos.v9i4.9808.

28. 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 // Вестник Брян-

Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2009. 152 p. (In Russian)

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

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1197308> (In Russian)

19. Nuttall A. Design Aspects of Multiple Driven Belt Conveyors: Doctoral dissertation. Delft: Delft University of Technology, 2007. 158 p.

20. Lagerev A.V., Dunaev V.P. Conveyors with suspension carrying belt – new type of continuous transport machines. *Inzhenerniy zhurnal. Spravochnik*, 2009, No.10, pp.9-14. (In Russian)

21. Lagerev A.V., Kuleshov D.Yu. Dynamic processes of discrete section of a conveyor with suspended belt and distributed drive at transient state of work. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2013, No.2, pp. 50-56. DOI: 10.5281/zenodo.1302028 (In Russian)

22. Lagerev A.V., Tolkachev E.N., Goncharov K.A. *Modelirovanie rabochnik protsessov i proektirovanie mnogoprivodnykh lentochnykh konveyerov* [Modeling of work processes and design of multi-drive belt conveyors]. Bryansk, RIO BGU, 2017. 384 p. DOI: 10.5281/zenodo.1196612 (In Russian)

23. Lagerev A.V., Boslovyak P.V. *Universalnaya metodika optimalnogo proektirovaniya metallkonstruktsiy konveyerov s podvesnoy lentoy* [Universal method for optimal design of steel structures conveyors with hanging belt]. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2014, No.1, pp. 31-36. DOI: 10.5281/zenodo.1302225 (In Russian)

24. Moskovskiy B.G. *Sovremennye sistemy elektropitaniya mashin i mekhanizmov. Poryadok vybora shinoprovodov dlya mostovykh gruzopodemnykh kranov* [Modern power supply systems of machines and mechanisms. The procedure for the selection of busbars for bridge cranes]. *Podemno-transportnoe delo*, 2016, No. 4-5 (86), pp. 20-23. (In Russian)

ского государственного технического университета. 2013. №4 (40). С. 33-40. DOI: 10.5281/zenodo.1302214

29. Лагереv А.В., Толкачев Е.Н. Математическая модель конвейера с подвесной лентой, распределенным приводом и вертикально замкнутой трассой // Вестник Брянского государственного технического университета. 2014. №2 (43). С. 44-52. DOI: 10.5281/zenodo.1302231

30. 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. № 10. P. 4669-4678. DOI: 10.1007/s12206-017-0913-7

25. Tolkachev E.N. Mathematical model of failure the drives suspensions of the conveyor with suspended belt and distributed drive at break in the electric chain. *Nauchno-tekhnichestkiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2017, No.2, pp. 178-189. DOI: 10.22281/2413-9920-2017-03-02-178-189. (In Russian)

26. Nikitin S.V. *Dinamicheskaya model lentochnogo konveyera* [Dynamic model of belt conveyor]. *Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie*, 2014, No. 4, pp.722-731. (In Russian)

27. 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. DOI: 10.15866/iremos.v9i4.9808.

28. Lagerev A.V., Tolkachev E.N. The study of the motion of suspensions of discrete section of a conveyor with suspended belt, distributed drive, and the vertically-closed track with the single-mass dynamic model. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2013, No.4, pp. 33-40. DOI: 10.5281/zenodo.1302214 (In Russian)

29. Lagerev A.V., Tolkachev E.N. Mathematical model of a special conveyor with suspended belt and distributed drive. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2014, No.3, pp. 44-52. DOI: 10.5281/zenodo.1302231 (In Russian)

30. 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. DOI: 10.1007/s12206-017-0913-7