

УДК 621.867

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОДВЕСОК НА ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНВЕЙЕРА С ПОДВЕСНОЙ ЛЕНТОЙ И РАСПРЕДЕЛЕННЫМ ПРИВОДОМ

Лагерев А.В., Толкачев Е.Н.

Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского

Для эталонной конструкции конвейера с подвесной лентой и распределенным приводом выполнена серия численных расчетов, по результатам которой установлено влияние фрикционных и массо-габаритных конструктивных параметров подвесок на основные технические показатели конвейера. Сформулированы рекомендации по выбору рациональных параметров.

**Ключевые слова:** ленточный конвейер, подвеска, подвесная лента, распределенный привод, рациональные параметры, численный анализ.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ для научных проектов, выполняемых молодыми учеными (Мой первый грант) № 16-38-00058.

Одной из наиболее прогрессивных разработок в области транспортирования насыпных материалов в настоящее время по праву считается конвейер с подвесной лентой и распределенным приводом [1]. Возможность беспросыпного, а в некоторых конструктивных решениях [2, 3] и герметичного, бесперегрузочного транспортирования материалов по трассе большой протяженности и сложной пространственной конфигурации – главные достоинства таких машин. Однако не менее существенными преимуществами при этом являются повышенная надежность системы приводов, а также наименьшие среди прочих напряжения в грузонесущей ленте, что в совокупности обусловлено использованием в качестве несущих и тяговых элементов установленных на направляющих качения подвесок, часть из которых оборудована индивидуальным приводом (рис. 1).

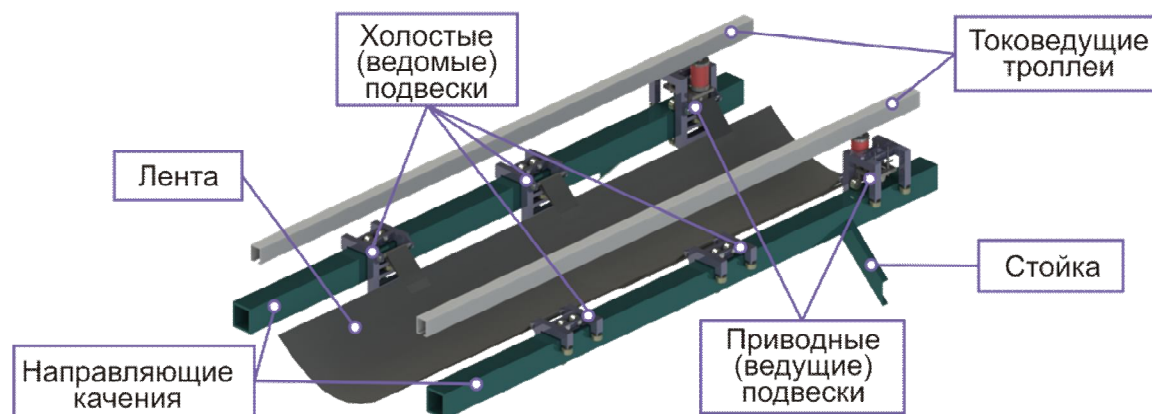


Рис. 1. Участок трассы конвейера с подвесной лентой и распределенным приводом

Ведущие и ведомые подвески являются наиболее ответственными структурными элементами конструкции конвейера, определяющими работоспособное состояние машины [4, 5]. Поэтому определение рациональных параметров подвесок, обеспечивающих наилучшее сочетание главных технических характеристик конвейера с подвесной лентой и распределенным приводом, является актуальной задачей.

Одним из наиболее важных технических показателей, определяющих энергоемкость транспортирующих установок, является мощность, расходуемая на перемещение груза. Достижение наивысшей энергетической эффективности конвейера с подвесной лентой обеспечивается при минимальной суммарной мощности приводов подвесок.

Так мощность  $i$ -го привода ведущей подвески в установившемся режиме движения определяется как

$$N(\dot{\phi}_{np_i}) = M_{кр}(\dot{\phi}_{np_i}) \cdot \dot{\phi}_{np_i},$$

где  $M_{кр}$  – крутящий момент на приводном ролике  $i$ -й ведущей подвески;  $\dot{\phi}_{np_i}$  – угловая скорость приводного ролика  $i$ -й ведущей подвески.

Следовательно, общая мощность конвейера может быть вычислена как удвоенная сумма средних значений мощностей приводных подвесок, установленных на одном контуре направляющих качения:

$$N = 2 \sum_{j=1}^{n_n} \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N(\dot{\phi}_{np_i}) \right]_j.$$

Другой важнейший показатель конвейера – скорость транспортирования. С одной стороны увеличение скорости способствует пропорциональному повышению производительности, с другой – при постоянной производительности увеличение скорости позволяет снизить погонную нагрузку от груза и использовать ленту меньшего типоразмера.

В расчетах скорость движения конвейерной ленты принимается равной среднему значению скорости движения подвески в установившемся режиме:

$$v = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \dot{x}_{np_i},$$

где  $\dot{x}_{np_i}$  – линейная скорость приводного ролика  $i$ -й ведущей подвески;  $n$  – число шагов численного интегрирования.

При оценке степени влияния параметров подвесок на основные технические характеристики конвейера с подвесной лентой используется математическая модель, учитывающая параметры конфигурации вертикально-замкнутой трассы, конструктивные особенности подвесок, механические характеристики индивидуальных приводов, встроенных в подвески, инерционные и силовые характеристики элементов конструкции, а также продольную деформацию грузонесущей ленты [6-8].

С использованием ЭВМ была произведена серия расчетов параметров конвейерной установки. В качестве эталонной конструкции принят конвейер с подвесной лентой и распределенным приводом, конфигурация трассы которого изображена на рис. 2, а технические характеристики представлены в табл. 1.

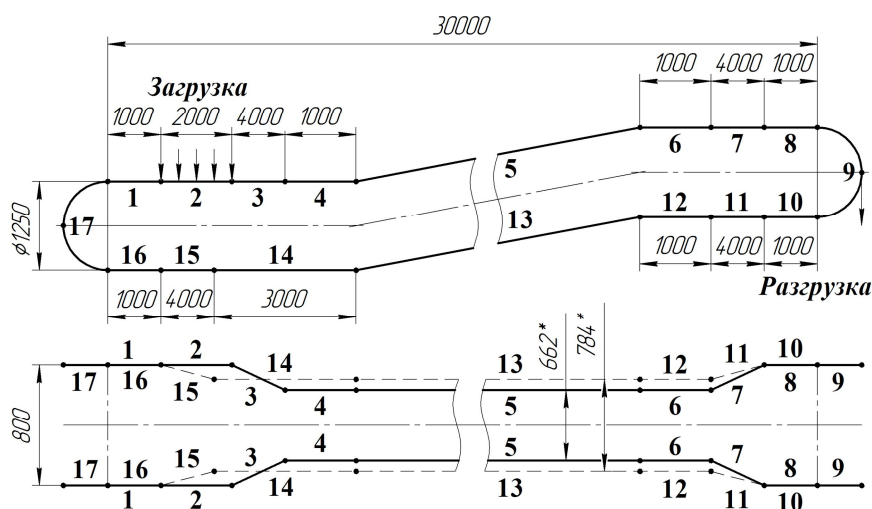


Рис. 2. Схема трассы эталонного конвейера с подвесной лентой и распределенным приводом:  
 1-8 – грузовая ветвь; 10-16 – холостая ветвь; 9, 17 – концевые поворотные участки;  
 2 – загрузочный пункт; 3, 11 – желобообразующие участки; 7, 15 – выполаживающие участки; 5, 13 – наклонные участки

Таблица 1

Технические характеристики эталонного конвейера

Техническая характеристика	Обозначение	Единица измерения	Значение
<i>Общие характеристики</i>			
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	$v_{cp}$	м/с	1,0
Общее количество подвесок	$n$	шт.	80
Количество приводных подвесок (дискретных участков)	$n_n$	шт.	16
Количество подвесок в дискретном участке	$n_{ду}$	шт.	5
Шаг размещения подвесок	$h_n$	м	0,8
<i>Характеристики подвесок</i>			
Сила прижатия ведущего ролика приводной подвески	$F_{np}$	Н	140
Номинальный крутящий момент на валу привода ведущей подвески	$M_{крн}$	Н·м	10,0
Номинальная скорость вращения	$n_n$	об/мин	148,0
Скорость вращения без нагрузки	$n_x$	об/мин	165,0
Масса металлоконструкции прижимной секции	$m_{мкпс}$	кг	1,0
Масса приводного ролика	$m_{нр}$	кг	2,0
Масса мотор-редуктора	$m_{мр}$	кг	4,2
Масса металлоконструкции несущей секции	$m_{мкнс}$	кг	7
Масса неприводного ролика	$m_{нр}$	кг	0,07
Масса металлоконструкции неприводной подвески	$m_{мкнп}$	кг	5,0
Наружный радиус приводного ролика	$r_{нр}$	м	0,065
Наружный радиус холостого ролика	$r_{нр}$	м	0,025
Внутренний радиус ролика	$r_o$	м	0,006
Коэффициент трения качения (резина-сталь)	$f_{нр}$	м	0,0077
Коэффициент трения скольжения (резина-сталь)	$\mu_{нр}$	-	0,5
Коэффициент трения качения (сталь-сталь)	$f_{нр}$	м	0,001
Коэффициент трения скольжения в осях	$\mu_{нрo}$	-	0,03
Количество холостых роликов в приводной подвеске	$k_{II}$	шт.	6
Количество холостых роликов в неприводной подвеске	$k_H$	шт.	4
<i>Характеристики ленты</i>			
Ширина ленты	$B$	м	0,8
Число прокладок ленты	$i_0$	шт.	3
Толщина верхней обкладки / нижней обкладки	$\delta_1 / \delta_2$	мм	1,0 / 2,0

Техническая характеристика	Обозначение	Окончание табл. 1	
		Единица измерения	Значение
Толщина тягового каркаса ленты	$y_{\max}$	мм	3
Толщина ленты	-	мм	9
Модуль упругости ленты в продольном направлении	$E_x$	МПа	380
Модуль упругости ленты в поперечном направлении	$E_z$	МПа	190
Коэффициент жесткости	$k$	кН/м	570
Коэффициент затухания колебаний	$\xi$	-	0,05

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 нулевыми.

В табл. 2 указаны интервалы варьирования исследованных фрикционных и массогабаритных параметров подвесок конвейера.

Таблица 2.

Варьируемые технические параметры подвесок конвейера

Техническая характеристика	Обозначение	Численное значение		
		эталонное	минимальное	максимальное
Сила упругости устройства прижатия ведущего ролика приводной подвески, Н	$F_{np}$	140	100	500
Коэффициент трения скольжения приводного ролика	$\mu_{np}$	0,5	0,1	0,7
Коэффициент трения качения приводного ролика, м	$f_{np}$	0,0077	0,0005	0,0090
Коэффициент трения скольжения в оси Холостого ролика	$\mu_{np o}$	0,03	0,01	0,05
Коэффициент трения качения холостого ролика, м	$f_{np}$	0,001	0,001	0,005
Наружный радиус приводного ролика, м	$r_{np}$	0,065	0,040	0,100
Наружный радиус холостого ролика, м	$r_{np}$	0,025	0,015	0,045
Масса прижимной секции, кг	$m_{nc}$	3,0	0,5	3,0
Масса несущей секции, кг	$m_{nc}$	7,4	4,0	12,0
Масса неприводной подвески, кг	$m_n$	5,3	3,0	14,0

По результатам, представленным на рис. 3, видно, что изменение основных технических показателей конвейера от величины силы прижатия приводного ролика ведущей подвески происходит по линейным зависимостям. Увеличение усилия со 100 до 500 Н сопровождается повышением мощности более чем на 30 % и снижением скорости транспортирования груза на 4,7 %. Из этого следует, что для обеспечения наименьшей энергоемкости транспортирования и повышения производительности конвейера необходимо принимать минимальное значение силы прижатия приводного ролика. Однако согласно результатам исследования [9] при уменьшении усилия прижимного устройства в большей мере снижаются сцепные характеристики, чем уменьшаются сопротивления движению. Поэтому считается целесообразным выбирать наименьшее значение силы прижатия, которое обеспечивает качественное сцепление без проскальзывания приводного ролика по направляющей качения.

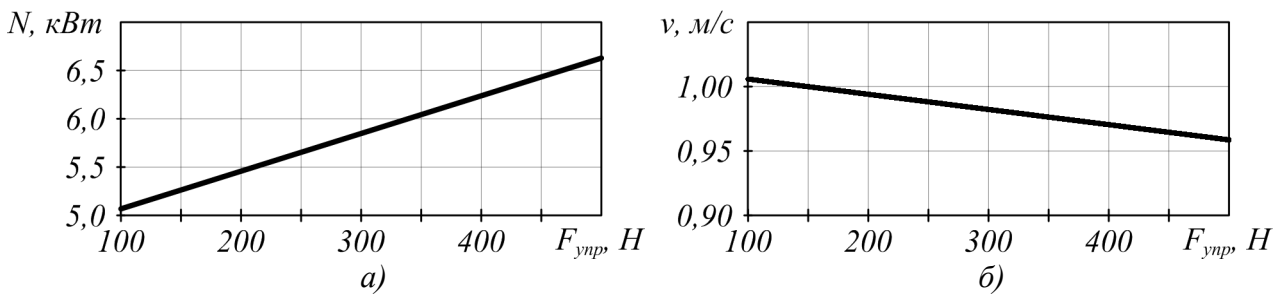


Рис. 3. Зависимость технических характеристик от усилия прижатия приводного ролика: *a* – общая мощность приводов конвейера; *б* – скорость движения ленты

Изменение коэффициента трения скольжения приводного ролика от 0,1 до 0,7 не повлияло на технические показатели конвейера (рис. 4): общая мощность приводов и скорость движения грузонесущей ленты в установившемся режиме движения сохранились неизменными. Исходя из того, что величина коэффициента трения скольжения не оказывает влияния на мощность и скорость конвейера, но является определяющей для движения без проскальзывания [9], то стоит принимать наибольшее возможное значение данного технического параметра.

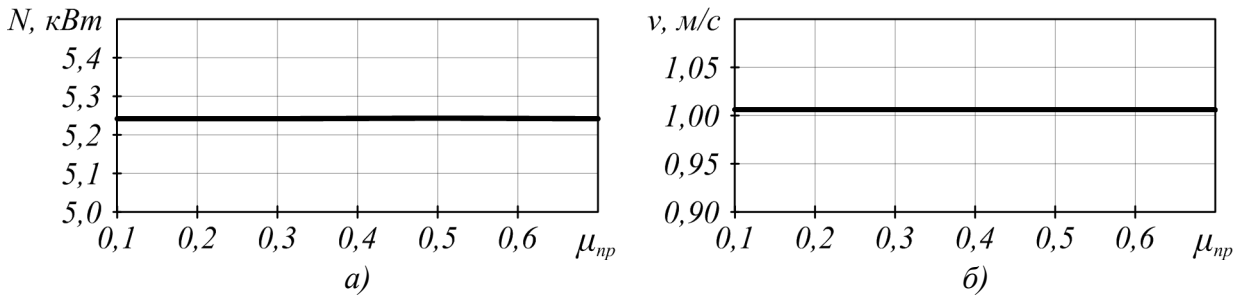


Рис. 4. Зависимость технических характеристик от коэффициента трения скольжения приводного ролика: *a* – общая мощность приводов; *б* – скорость движения ленты

Варьирование величины коэффициента трения качения приводного ролика ведущей подвески показало следующее (рис. 5): изменение величины коэффициента с 0,0005 до 0,009 м сопровождается линейным ростом общей мощности приводов конвейера на 9,1 % и линейным снижением скорости движения ленты на 1,1 %. Следовательно, для снижения потребляемой мощности и повышения скорости, на первый взгляд, необходимо сокращать коэффициент трения качения, однако, учитывая сравнительно незначительное изменение мощности и скорости конвейера, целесообразно в первую очередь ориентироваться на величину коэффициента трения качения для данного материала.

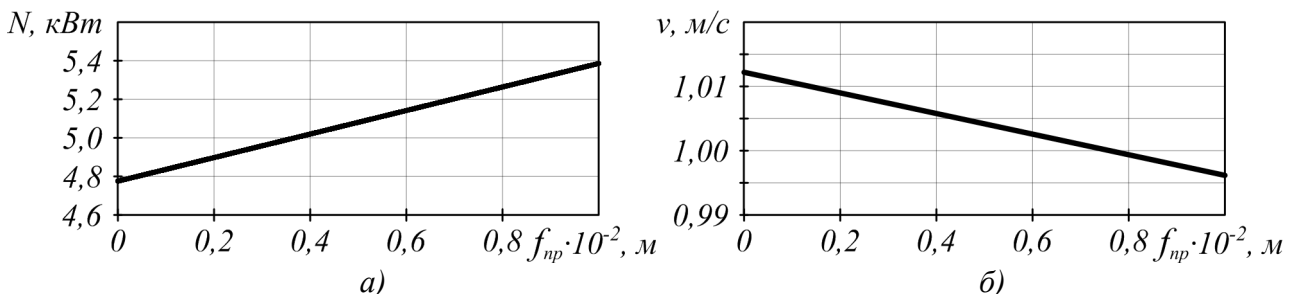


Рис. 5. Зависимость технических характеристик от коэффициента трения качения приводного ролика: *a* – общая мощность приводов; *б* – скорость движения ленты

Варьирование коэффициента трения скольжения в осях холостых роликов подвесок выражается в повышении общей мощности конвейера, а также в снижении скорости движения

ленты (рис. 6). Увеличение коэффициента трения с 0,01 до 0,05 привело к росту общей мощности приводов на 17,6 %, и уменьшению скорости конвейера на 2,3 %. Поэтому для обеспечения наилучших технических показателей конвейера необходимо принимать коэффициент трения скольжения в осях холостых роликов наименьшим.

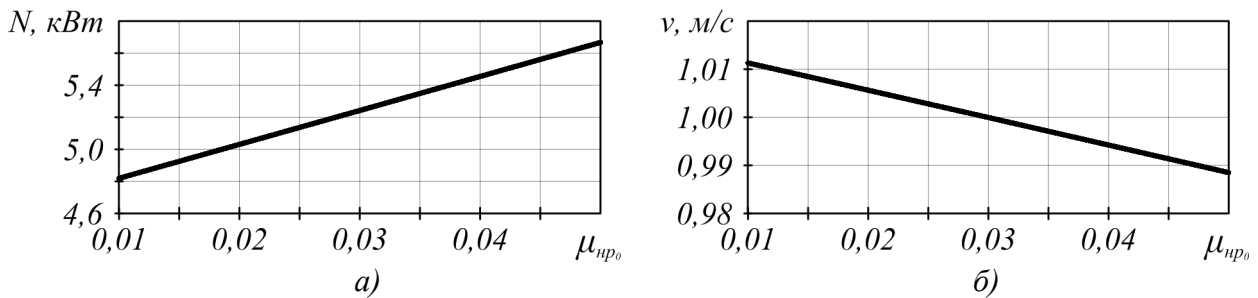


Рис. 6. Зависимость технических характеристик от коэффициента трения скольжения холостого ролика: *а* – общая мощность приводов; *б* – скорость движения ленты

Увеличение коэффициента трения качения холостых роликов ведомых подвесок с 0,001 по 0,005 м, как видно из полученных результатов (рис. 7), приводит к нелинейному росту общей мощности приводов (приблизительно на 152 %), интенсивность которого снижается по мере повышения коэффициента. В тоже время, скорость транспортирования сокращается по линейной зависимости на 37,7 %. Для данного технического параметра подвесок также необходимо использовать наименьшие среди возможных значения.

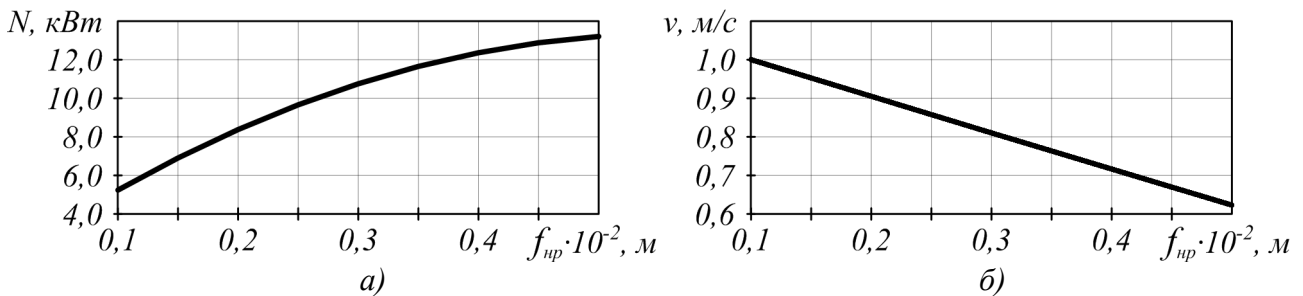


Рис. 7. Зависимость технических характеристик от коэффициента трения качения холостого ролика: *а* – общая мощность приводов; *б* – скорость движения ленты

Линейным повышением технических показателей конвейера сопровождается увеличение наружного радиуса приводного ролика ведущей подвески (рис. 8). Результатом увеличения радиуса с 0,04 до 0,1 м явилось изменение величины общей мощности приводов на 117,6 %, а скорость движения ленты возрасла на 124,6 %. Учитывая наибольшую процентную величину прироста скорости, а также эффективность при повышении сцепных характеристик [9], рекомендуется принимать наибольшие среди возможных наружные радиусы приводных роликов ведущих подвесок.

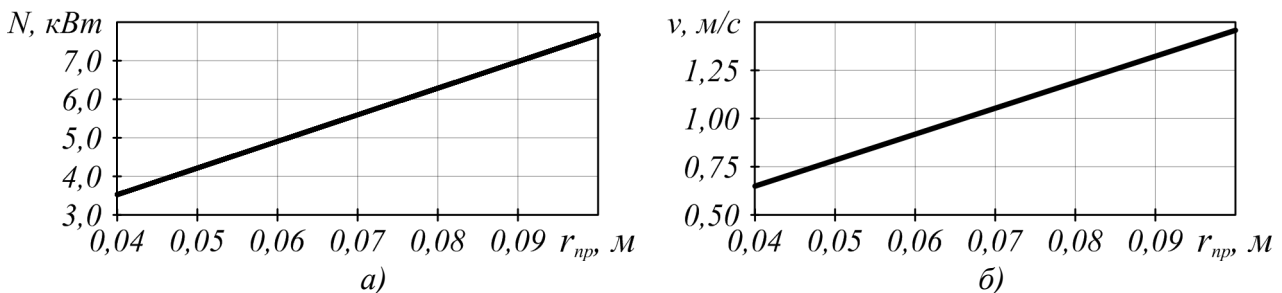


Рис. 8. Зависимость технических характеристик от наружного радиуса приводного ролика: *а* – общая мощность приводов; *б* – скорость движения ленты

Зависимости технических показателей конвейера от величины наружного радиуса холостых роликов подвесок имеют нелинейный характер (рис. 9). Увеличение радиуса роликов с 0,015 по 0,045 м позволяет сократить общую мощность приводов конвейера на 55,5 %, а также повысить скорость движения ленты на 12,7 %. Поэтому наружный радиус холостых роликов следует выбирать наибольшим с учетом конструктивных ограничений.

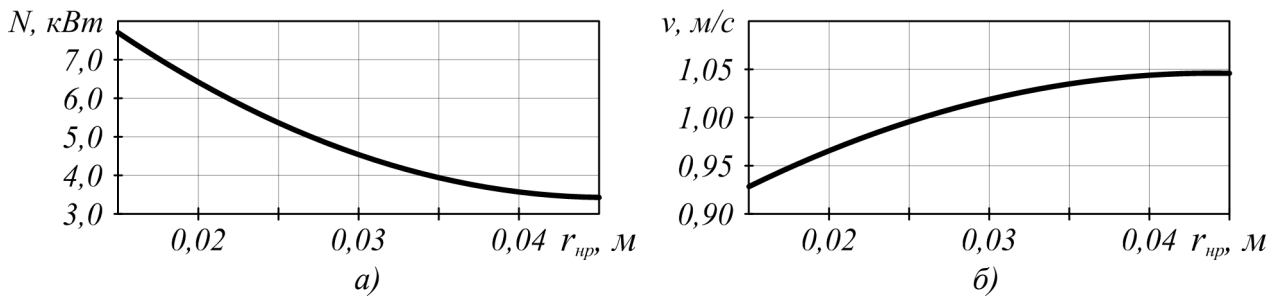


Рис. 9. Зависимость технических характеристик от наружного радиуса холостого ролика: *а* – общая мощность приводов; *б* – скорость движения ленты

Повышение массы прижимных секций ведущих подвесок оказывает линейное влияние на технические показатели конвейера (рис. 10). Увеличение массы прижимной секции с 0,5 до 3,0 кг приводит к росту мощности конвейера на 2,7 % и незначительному уменьшению скорости транспортирования - на 0,4 %.

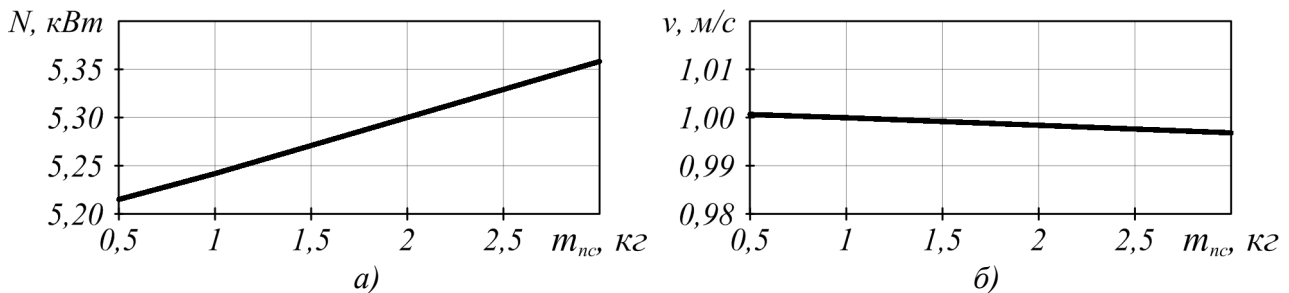


Рис. 10. Зависимость технических характеристик от массы прижимной секции приводной подвески: *а* – общая мощность приводов; *б* – скорость движения ленты

Результат варьирования массы несущих секций приводных подвесок конвейера отражается в повышении общей мощности приводов, а также в снижении скорости движения ленты по линейным зависимостям (рис. 11). Увеличение массы с 4 до 12 кг привело к росту мощности на 10,2 % и уменьшению скорости на 1,4 %.

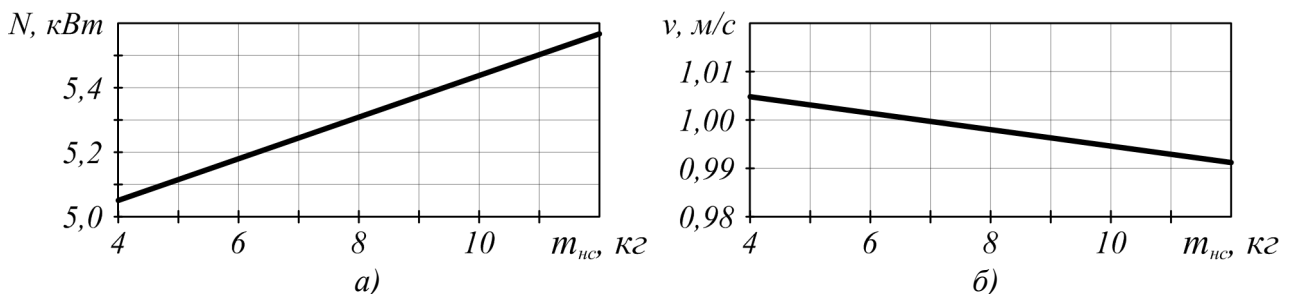


Рис. 11. Зависимость технических характеристик от массы несущей секции приводной подвески: *а* – общая мощность приводов; *б* – скорость движения ленты

Увеличение массы неприводных подвесок, исходя из результатов расчета (рис. 12), способствует повышению общей мощности конвейера и снижению скорости транспортирования груза. При повышении массы неприводных подвесок с 3 до 14 кг увеличение мощности составляет 9,7 %, а уменьшение скорости - 1,3 %.

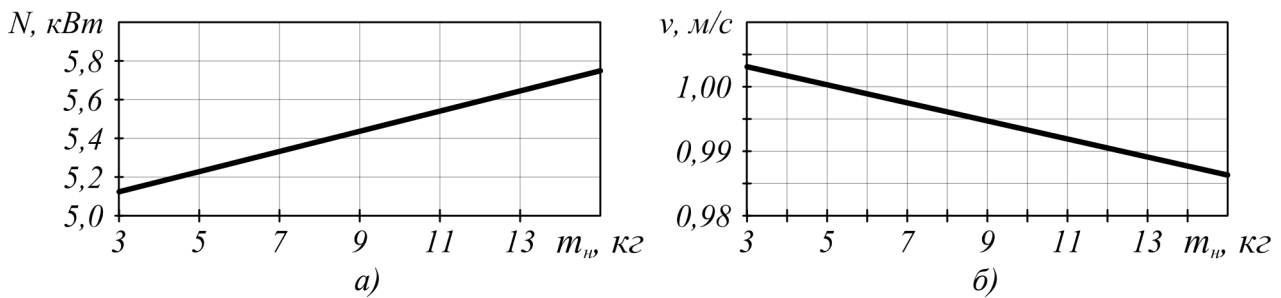


Рис. 12. Зависимость технических характеристик от массы неприводной подвески:  
 а – общая мощность приводов; б – скорость движения ленты

Исходя из полученных результатов, целесообразно снижать массы составных секций приводных и массы неприводных подвесок.

Установленная в результате проведения численного анализа математической модели конвейера с подвесной лентой и распределенным приводом направленность и степень влияния конструктивных параметров подвесок на основные технические показатели конвейера позволяют осуществлять обоснованный их выбор. При этом предлагается автоматизировать расчеты, используя разработанный программный комплекс «Моделирование динамики конвейеров с подвесной лентой и распределенным приводом» [10].

### Список литературы

1. Лагерев, А.В. Конвейеры с подвесной грузонесущей лентой – инновационный вид машин непрерывного транспорта / А.В. Лагерев, В.П. Дунаев // Справочник. Инженерный журнал. – 2009. – № 10. – С. 9–14.
2. Патент 94550 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> В 65 G 15/00. Подвесной ленточный конвейер / Лагерев А.В., Дунаев В.П., Кулешов Д.Ю. – Заявл. 30.12.2009, № 2009149559/22. Оpubл. 27.05.2010. – Бюл. № 15.
3. Патент 126323 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> В 65 G 15/08. Конвейер с подвесной лентой / Лагерев А.В., Дунаев В.П., Кулешов Д.Ю., Толкачев Е.Н. – Заявл. 19.04.2012, № 2012115925/11. Оpubл. 27.03.2013. – Бюл. № 9.
4. Толкачев, Е.Н. Определение условий работоспособности дискретного участка конвейера с подвесной лентой и распределенным приводом / Е.Н. Толкачев // Научные исследования и разработки молодых ученых: Сб. материалов XII Междунар. молодеж. науч.-практ. конф. (8 июл., 5 авг. 2016 г.). Новосибирск: Изд-во ЦРНС. – 2016. – Ч.1. – С. 81-89.
5. Лагерев, А.В. Исследование движения подвесок дискретного участка конвейера с подвесной лентой, распределенным приводом и вертикально замкнутой трассой с помощью одномассовой динамической модели / А.В. Лагерев, Е.Н. Толкачев // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2013. – № 4. – С. 33-40.
6. Лагерев, А.В. Математическая модель конвейера с подвесной лентой, распределенным приводом и вертикально замкнутой трассой / А.В. Лагерев, Е.Н. Толкачев // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2014. – №3. - С. 44-52.
7. Лагерев, А.В. Оценка качества сцепления ведущих роликов подвесок конвейера с подвесной лентой и распределенным приводом / А.В. Лагерев, Е.Н. Толкачев // Достижения молодых ученых в развитии инновационных процессов в экономике, науке, образовании: материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. (21-23 окт. 2014 г.). Брянск: БГТУ. – 2014. – С. 147-150.
8. Лагерев, А.В. Моделирование динамики конвейера с подвесной лентой и распределенным приводом / А.В. Лагерев, Е.Н. Толкачев // Будущее машиностроения России: сб. тр. VIII Всерос. конф. молодых ученых и специалистов (23-26 сент. 2015 г.). Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2015. – С. 886-890.
9. Лагерев, А.В. Рациональные параметры подвесок конвейера с подвесной лентой и распределенным приводом / А.В. Лагерев, Е.Н. Толкачев // Подъемно-транспортное дело. – 2016. – № 1-2 (84). – С. 17-20.



10. Лагереv А.В., Толкачев Е.Н., Лагереv И.А. Программный комплекс «Моделирование динамики конвейеров с подвесной лентой и распределенным приводом». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016618964 от 10 августа 2016 г. (Федеральная служба по интеллектуальной собственности).

### **Сведения об авторах**

Лагереv Александр Валерьевич – доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе НИИ фундаментальных и прикладных исследований ФГБОУ ВО «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского», [bsu-avl@yandex.ru](mailto:bsu-avl@yandex.ru).

Толкачев Евгений Николаевич – специалист отдела инновационного развития ФГБОУ ВО «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского», [tolkachev\\_en@mail.ru](mailto:tolkachev_en@mail.ru).

## **INFLUENCE ANALYSIS OF DESIGN PARAMETERS OF SUSPENSIONS ON THE TECHNICAL SPECIFICATIONS OF CONVEYOR WITH SUSPENDED BELT AND DISTRIBUTED DRIVE**

Lagerev A.V., Tolkachev E.N.

Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University

Using the basic design of the conveyor with suspended belt and distributed drive, a series of numerical calculations was performed. As a result, the influence of friction and mass-dimensional design parameters of suspensions on the main technical parameters of the conveyor was established. Recommendations on the choice of rational parameters were formulated.

**Key words:** *conveyor belt, distributed drive, numerical analysis, rational parameters, suspended belt, suspension.*

### **References**

1. Lagerev A.V., Dunaev V.P. Conveyors with suspension carrying belt – new type of continuous transport machines, *Inzhenernyi zhurnal. Spravochnik*, 2009, No.10, pp.9-14.
2. Patent RU 94550. *Podvesnoy lentochmyy konveyer* [Conveyor with suspended belt]. Lagerev A.V., Dunaev V.P. Kuleshov D.Yu. Declared 30.12.2009. Published 27.05.2010.
3. Patent RU 126323. *Konveyer s podvesnoy lentoy* [Conveyor with suspended belt]. Lagerev A.V., Dunaev V.P., Kuleshov D.Yu., Tolkachev E.N. Declared 19.04.2012. Published 27.03.2013.
4. Tolkachev E.N. Definition of terms efficiencies for discrete section of the conveyor with suspended belt and distributed drive [Opredelenie usloviy rabotosposobnosti diskretnogo uchastka konveyera s podvesnoy lentoy i raspredelennym privodom]. *Sbornik materialov XII mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Nauchnye issledovaniya i razrabotki molodykh uchenykh"* (Proceedings of the XII International scientific-practical conference "Scientific research and development young scientists". Novosibirsk, TsRNS, 2016, Part No.1, pp. 81-89.
5. 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 di-namic model, *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2013, No.4, pp. 33–40.
6. 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.
7. Lagerev A.V., Tolkachev E.N. Assessment of the quality of clutch rollers suspension conveyor with suspended belt and distributed drive [Otsenka kachestva stspleniya vedushchikh rolikov podvesok konveyera s podvesnoy lentoy i raspredelennym privodom]. *Materialy VI*

*mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Dostizheniya molodykh uchenykh v razviti innovatsionnykh protsessov d ekonomike, nauke, obrazovanii"* (Proceedings of the VI International scientific-practical conference "Achievements of young scientists in the development of innovative processes in economy, science, education". Bryansk, BGTU, 2014, pp. 147-150.

8. Lagerev A.V., Tolkachev E.N. Modeling of dynamics of conveyor with suspended belt and distributed drive [Modelirovanie dinamiki konveyera s podvesnoy lentoy i raspredelennym privodom]. *Future Engineering of Russia. Proceedings of the 8 All-Russian Conference of young scientists and specialists. Moscow, MGTU im. N.E.Baumana, 23-26 Sept. 2014.* Moscow, MGTU im. N.E. Baumana, 2015, pp. 886-890.

9. Lagerev A.V., Tolkachev E.N. Rational conveyor suspension parameters with suspended belt and distributed drive. *Podyemno-transportnoe delo*, 2016, No.1-2, pp. 17-20.

10. Lagerev A.V., Tolkachev E.N., Lagerev I.A. *Programmnyy kompleks „Modelirovanie dinamiki konveyerov s podvesnoy lentoy i raspredelennym privodom“*. *Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programm dlya EVM* [The software package "Dynamics simulation of conveyors with suspended belt and distributed drive". The Certificate on official registration of the computer program]. No. 2016618964, 2016.

#### **Authors' information**

Alexander V. Lagerev - Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice director of Research Institute of Fundamental and Applied Research at Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University, *bsu-avl@yandex.ru*.

Evgeniy N. Tolkachev - specialist at Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University, *tolkachev\_en@mail.ru*.