На правах рукописи
УДК 621. 86

БОСЛОВЯК ПАВЕЛ ВАЛЕРЬЕВИЧ

ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ СТАЦИОНАРНЫХ КОНВЕЙЕРОВ С ПОДВЕСНОЙ ЛЕНТОЙ

Специальность
05.05.04 – Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва, 2015

Работа выполнена на кафедре подъемно-транспортных машин и оборудования ФГБОУ ВПО «Брянский государственный технический университет».

Научный руководитель	доктор технических наук, профессор Лагерев Александр Валерьевич
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, профессор Короткий Анатолий Аркадьевич, зав. кафедрой «Транспортные системы и логистика» Донского государственного технического университета
	кандидат технических наук, доцент Толоконников Александр Сергеевич, доцент кафедры «Подъемно-транспортные машины и оборудование» Тульского государственного университета
Ведущая организация:	ФГБОУ ВПО Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ)

Защита диссертации состоится 14 декабря 2015 г. в 14:30 на заседании диссертационного совета Д 212.141.07 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005 г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направлять по данному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана» и на сайте www.bmstu.ru.

Автореферат разослан «____»_____ 2015 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, профессор Е.Б. Сарач

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Современным и перспективным типом конвейерного транспорта является конвейер с подвесной лентой (КПЛ), который хорошо зарекомендовал себя при транспортировке сыпучих грузов в сложных условиях: в пожаро- и взрывоопасных условиях, при большом угле наклона конвейерной трассы и повышенных экологических требованиях.

Главными особенностями и преимуществами КПЛ являются:

- отсутствие просыпей груза на всей протяженности рабочей ветви ленты;
- уменьшенная до 1,5 раз энергоемкость транспортирования груза;
- увеличение срока службы ленты в 1,5-2 раза;
- уменьшение пыления и дробления груза при его транспортировке;
- возможность изгиба конвейера с подвесной лентой в горизонтальной плоскости с радиусами до 15-20 метров.

Конвейеры с подвесной лентой используются в промышленности при транспортировании железной руды, окатышей, аммиачной селитры, глины, гранулированной серы и других материалов. Основные технические характеристики разработанных конструкций конвейеров следующие: производительность – 60...700 т/ч; скорость движения ленты – 0,75...1,3 м/с; ширина грузонесущей ленты – 0,8...1,2 м; длина конвейера – 24...98 м.

Важной технической задачей при проектировании стационарных конвейеров с подвесной лентой является снижение металлоемкости. При проведении исследований теоретического и практического характера данному вопросу было уделено недостаточно внимания. Поэтому оптимизация металлоконструкции является актуальной задачей на этапе разработки и создания стационарных конвейеров с подвесной лентой.

Объектом исследования является металлоконструкции стационарных конвейеров с подвесной грузонесущей лентой.

Цель работы: повышение эффективности использования стационарных КПЛ на основе снижения материалоемкости их металлоконструкций, улучшения массогабаритных показателей с учетом выполнения конструктивных, прочностных, жесткостных и коррозионных ограничений.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ известных в настоящее время металлоконструкций КПЛ и сформировать универсальные структурные схемы основных конструктивных узлов конвейера, подлежащие оптимизации.

2. Разработать оптимизационные математические модели металлоконструкции КПЛ, включающие целевые функции ее основных конструктивных узлов и системы конструктивных, прочностных, жесткостных и коррозионных ограничений.

3. Осуществить реализацию разработанных математических моделей, используемых в ходе проведения оптимизации, в программном комплексе NX.

4. Провести совершенствование конструктивных параметров, подлежащих оптимизации, и разработать рекомендации по оптимальному проектированию конвейеров с подвесной грузонесущей лентой.

Методы исследований. Теоретические исследования проводились на основе положений и методов математического моделирования, основ конструирования, проектирования и расчета ленточных конвейеров, оптимального проектирования, метода конечных элементов.

МГТУ
ИМ. Н.Э. БАУМАНА
БИБЛИОТЕКА

Научная новизна работы:

1. Разработаны оптимизационные математические модели основных конструктивных узлов (приводной, натяжной станций, линейной секции) металлоконструкций стационарных конвейеров с подвесной лентой, обеспечивающие наилучшие массогабаритные показатели с учетом конструктивных, прочностных, жесткостных и коррозионных ограничений.

2. Предложены универсальные структурные схемы основных конструктивных узлов конвейера, подлежащие оптимизации, позволяющие учесть наличие избыточных элементов металлоконструкции.

3. Разработаны подходы, позволяющие осуществлять как полную процедуру оптимизации металлоконструкции КПЛ в целом, включающую оптимальное проектирование всех ее основных узлов, так и параметрическую оптимизацию, отличающуюся тем, что в процедуру оптимального проектирования металлоконструкции включается только линейная часть конвейера.

Практическая значимость работы:

1. Разработана методика формирования оптимальных конструктивных схем металлоконструкций основных узлов КПЛ на основе исключения избыточных стержней.

2. Разработана методика выбора оптимальных геометрических параметров поперечных сечений элементов металлоконструкций стационарных КПЛ.

3. Разработаны рекомендации по оптимальному проектированию металлоконструкций с учетом влияния конструктивных параметров и режимов работы конвейера с подвесной лентой.

4. Разработана конструкция КПЛ, защищенная патентом РФ № 113514.

Обоснованность и достоверность. Адекватность разработанных математических моделей и методики оптимального проектирования металлоконструкций стационарных КПЛ основывается на корректном использовании положений и методов теории упругости, прикладной механики, теории оптимального проектирования, метода конечных элементов, а также на опыте теоретических исследований, расчета и проектирования стержневых металлоконструкций машин непрерывного транспорта.

Апробация работы. Результаты исследований были представлены на Международной научно-практической конференции «Достижения молодых ученых в развитии инновационных процессов в экономике, науке, образовании» (Брянск, 2013); на Международной научно-практической конференции «Современные материалы, техника и технология» (Курск, 2013); на Международной научно-практической конференции «Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации» (Курск, 2014); на Международной научно-технической конференции «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии» (Могилев, 2014); на XVIII Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Подъёмно-транспортные, строительные, дорожные, путевые машины и робототехнические комплексы» (Москва, 2014); на Международной научно-практической конференции «Проблемы и инновации в области механизации и технологий в строительных и дорожных отраслях» (Саратов, 2014); на Международной научно-технической конференции «Молодые ученые – основа будущего машиностроения и строительства» (Курск, 2014); на VII Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов (Москва, 2014); на XIX Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, аспи-

рантов и молодых ученых «Подъёмно-транспортные, строительные, дорожные, путевые машины и робототехнические комплексы» (Москва, 2015), а также на научных семинарах кафедры «Подъемно-транспортные машины и оборудование» ФГБОУ ВПО БГТУ (Брянск, 2013 и 2014) и кафедры «Подъемно-транспортные системы» ФГБОУ ВПО МГТУ (Москва, 2014 и 2015).

Реализация работы. Результаты выполненных исследований используются ООО «Конвейер» (г. Брянск) при проектировании металлоконструкций стационарных КПЛ, ООО «Промбезопасность» (г. Брянск) при расчете, проектировании и экспертизе рамных и ферменных конструкций подъемно-транспортных машин и оборудования, в учебном процессе на кафедре «Подъемно-транспортные машины и оборудование» Брянского государственного технического университета.

Публикации. Результаты исследований, включенные в диссертационную работу, изложены в 17 публикациях общим объемом 2,75 п.л. (в том числе в 2 статьях в журналах, рекомендуемых ВАК РФ), получен патент РФ на полезную модель RU № 113514.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов и результатов, списка использованных источников из 196 наименований. Работа изложена на 160 страницах, содержит 106 рисунков и 16 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, изложены ее научная новизна и практическая значимость.

В первой главе выполнен обзор типовых металлоконструкций специальных ленточных конвейеров; проведен анализ существующих методов расчета и методик оптимального проектирования металлоконструкций подъемно-транспортных машин (ПТМ); рассмотрены условия и режимы эксплуатации КПЛ; определены цели и задачи диссертационного исследования.

На основании обзора научных работ А.В. Вершинского, М.М. Гохберга, В.Г. Дмитриева, В.П. Дунаева, В.Н. Ивченко, А.П. Кобзева, Г.Л. Колмогорова, А.В. Лагерева, И.А. Лагерева, В.Л. Лифшица, Ю.Д. Тарасова, Ю.А. Подопригоры, В.Т. Полунина, В.Н. Пустового, В.Ю. Сапьянова, Л.Г. Серлина, С.А. Соколова, Л.Г. Шахмейстера и др. были сделаны следующие выводы:

1. В настоящее время разработаны и применяются различные методики оптимального проектирования механизмов и несущих металлоконструкций ПТМ. Однако отсутствуют методики расчета и оптимального проектирования МК конвейеров с подвесной лентой.

2. Существует необходимость разработки математических моделей и методики оптимального проектирования металлоконструкции КПЛ, направленных на оптимизацию структурной схемы МК и определение оптимальных характеристик поперечных сечений ее конструктивных элементов.

3. В качестве среды, реализующей разработанные оптимизационные математические модели, целесообразно использовать программный комплекс CAD/CAM/CAE NX. На его основе могут быть проведены как расчеты методом конечных элементов напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов МК, так и оптимальное проектирование металлоконструкций КПЛ.

Во второй главе выполнена постановка задачи оптимального проектирования металлоконструкции стационарного КПЛ, суть которой состоит в снижении

массы его металлоконструкции с учетом выполнения систем ограничений. Конструкция конвейера с подвесной лентой представлена на Рис. 1.

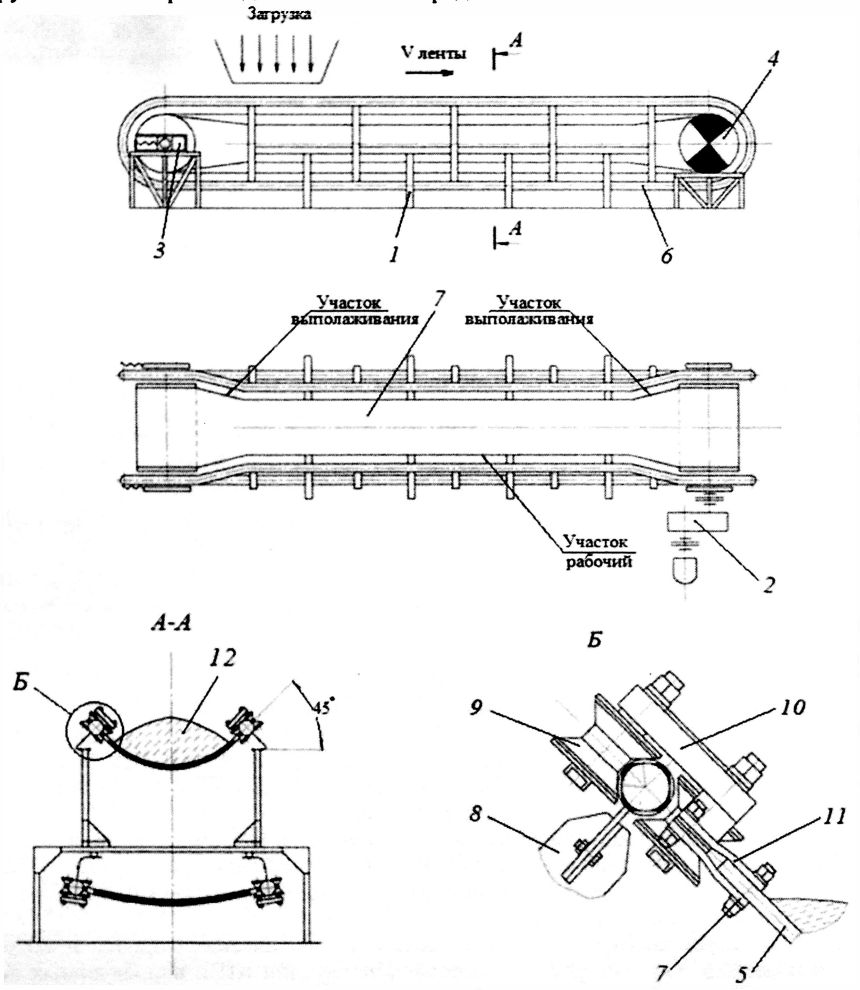


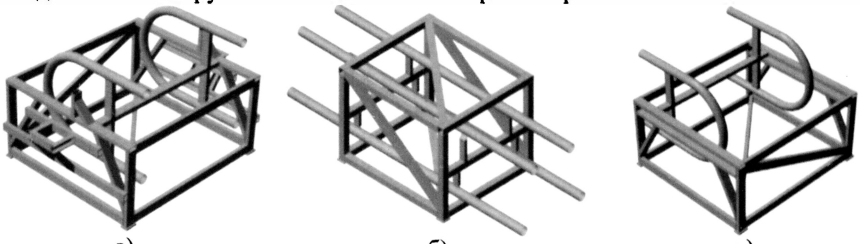
Рис. 1.
Конвейер с подвесной лентой: 1 – став; 2 – привод; 3 – натяжной барабан; 4 – приводной барабан; 5 – лента; 6 –направляющие; 7 – узел крепления; 8 – кронштейн; 9 – ролик; 10 – подвеска; 11 – ленточка; 12 – груз

На основе анализа существующих схем конструктивных узлов металлоконструкций КПЛ разработаны универсальные структурные схемы, включающие все потенциально возможные стержни и раскосы. Они позволяют, не меняя структуру целевых функций, выполнять расчет металлоконструкций с различными конструктивными схемами.

В связи с тем, что исходная универсальная структурная схема трансформируется в процессе оптимизации, т.е. отдельные стержни могут исключаться из МК, для учета этого обстоятельства вводится коэффициент j_i, который определяет факт наличия (j_i =1) или отсутствия (j_i =0) i-го конструктивного элемента в оптимизируемой металлоконструкции.

В универсальных структурных схемам МК конвейера учитывалось воздействие внешних возмущений со стороны натяжного и приводного барабанов, от натяжения ленты. Продольные и поперечные нагрузки, действующие на трубчатые направляющие со стороны роликовых подвесок на грузовой (холостой) ветви, являлись постоянными, что обусловлено транспортировкой сыпучих материалов при допущении равномерной загрузки ленты.

Целевые функции были разработаны применительно к универсальным структурным схемам основных конструктивных узлов КПЛ: приводной и натяжной станций, а также линейной части конвейера, состоящей из нескольких однотипных линейных секций (Рис. 2). Основные узлы, в свою очередь, подразделялись на отдельные конструктивные элементы – стержни и раскосы.



а) б) в)

Рис. 2.

Основные конструктивные узлы конвейера с подвесной лентой:
а) – приводная станция; б) – линейная секция; в) – натяжная станция

Стержневые элементы металлоконструкции КПЛ могут иметь поперечные сечения различной геометрической формы. В практике конвейеростроения наибольшее распространение получили такие профили, как прямоугольная или круглая труба, швеллер и уголок.

Задача оптимального проектирования металлоконструкции стационарного КПЛ в общем виде формулируется следующим образом: для конкретного варианта МК требуется найти такое сочетание размеров ее конструктивных элементов, при котором достигается минимум массы МК с учетом конструктивных e_m, прочностных f_n, жесткостных g_p и коррозионных k_s ограничений:

$$Ц(\{x\},\{z\}) \to \min;$$
$$e_m(\{x\},\{z\}) \geq 0, (m = 1,\ldots,M);$$
$$f_n(\{x\},\{z\}) \geq 0, (n = 1,\ldots,N);$$
$$g_p(\{x\},\{z\}) \geq 0, (p = 1,\ldots,P);$$
$$k_s(\{x\},\{z\}) \geq 0, (s = 1,\ldots,S).$$

Целевая функция $Ц(\{x\}, \{z\})$ – масса металлоконструкции стационарного КПЛ, которая складывается из масс отдельных конструктивных узлов – приводной $m_{пс}$ и натяжной $m_{нс}$ станций и n линейных секций $m_{лс}$:

$$M = m_{пс} + nm_{лс} + m_{нс}.$$

Для основных конструктивных узлов КПЛ целевые функции принимают вид:

• целевая функция металлоконструкции приводной станции

$$Ц_1(\{x_i^r\},\{z_i^r\})=\{j_1^n 8\rho_1 z_1^n x_1^n (x_2^n + x_3^n - 2x_1^n) + j_1^ш 4\rho_1 z_1^ш [x_1^ш (x_2^ш - 2x_3^ш) + 2x_4^ш x_3^ш] + j_1^y 4\rho_1 z_1^y x_1^y (x_2^y + x_3^y - x_1^y) + j_1^к 4\pi\rho_1 z_1^к x_1^к (x_2^к - x_1^к)\} + \ldots + \{j_{17}^n 2\rho_{17} x_{58}^n x_{59}^n (x_{60}^n + x_{61}^n - 2x_{59}^n) + j_{17}^ш \rho_{17} x_{69}^ш [x_{70}^ш (x_{71}^ш - 2x_{72}^ш) + 2x_{73}^ш x_{72}^ш] + j_{17}^y \rho_{17} x_{45}^y x_{46}^y (x_{47}^y + x_{48}^y - x_{46}^y) + j_{17}^к \pi\rho_{17} x_{26}^к x_{27}^к (x_{28}^к - x_{27}^к)\};$$

• целевая функция металлоконструкции линейной секции

$$Ц_2(\{x_i^r\},\{z_i^r\})=\{j_1^n 8\rho_1 z_1^n x_1^n (x_2^n + x_3^n - 2x_1^n) + j_1^ш 4\rho_1 x_1^ш [x_2^ш (x_3^ш - 2x_4^ш) + 2x_5^ш x_4^ш] + j_1^y 4\rho_1 x_1^y x_2^y (x_3^y + x_4^y - x_2^y)\} + \ldots + \{j_9^n 2\rho_9 x_{31}^n x_{32}^n (x_{33}^n + x_{34}^n - 2x_{32}^n) + j_9^ш \rho_9 x_{39}^ш [x_{40}^ш (x_{41}^ш - 2x_{42}^ш) + 2x_{43}^ш x_{42}^ш] + j_9^y \rho_9 x_{31}^y x_{32}^y (x_{33}^y + x_{34}^y - x_{32}^y) + j_9^к \pi\rho_9 x_{11}^к x_{12}^к (x_{13}^к - x_{12}^к)\};$$

• целевая функция металлоконструкции натяжной станции

$$Ц_3(\{x_i^r\},\{z_i^r\})=\{j_1^n 8\rho_1 z_1^n x_1^n (x_2^n + x_3^n - 2x_1^n) + j_1^ш 4\rho_1 z_1^ш [x_1^ш (x_2^ш - 2x_3^ш) + 2x_4^ш x_3^ш] + j_1^y 4\rho_1 z_1^y x_1^y (x_2^y + x_3^y - x_1^y) + j_1^к 4\pi\rho_1 z_1^к x_1^к (x_2^к - x_1^к)\} + \ldots + \{j_{11}^n 2\rho_{11} x_{33}^n x_{34}^n (x_{35}^n + x_{36}^n - 2x_{34}^n) + j_{11}^ш \rho_{11} x_{43}^ш [x_{44}^ш (x_{45}^ш - 2x_{46}^ш) + 2x_{47}^ш x_{46}^ш] + j_{11}^y \rho_{11} x_{33}^y x_{34}^y (x_{35}^y + x_{36}^y - x_{34}^y) + j_{11}^к \pi\rho_{11} x_{13}^к x_{14}^к (x_{15}^к - x_{14}^к)\};$$

• целевая функция металлоконструкции КПЛ в целом

$$Ц(\{x\},\{z\})=Ц_1(\{x_i^r\},\{z_i^r\})+Ц_2(\{x_i^r\},\{z_i^r\})+Ц_3(\{x_i^r\},\{z_i^r\})),$$

где r – показатель формы поперечного сечения ($r=n$ –прямоугольная труба; $r=к$ – круглая труба; $r=ш$ – швеллер; $r=y$ – уголок); ρ_i – плотность материала i-го элемента; x_a^r, z_b^r – варьируемый (изменяемый в процессе оптимизации) и фиксированый (неизменяемый в процессе оптимизации) параметры МК соответственно; a, b – номер варьируемого и фиксированного параметров конструктивного элемента в универсальной структурной схеме МК соответствующего основного узла КПЛ.

Применительно к каждой из целевых функций основных конструктивных узлов КПЛ сформированы системы ограничений.

В число конструктивных ограничений были включены следующие условия в форме неравенств:

• для приводной и натяжной станций: длины поперечных стержней должны превышать длину обечайки приводного или натяжного барабана; длины вертикальных стержней должны превышать в 1,5...2 раза диаметр приводного (натяжного) барабана; поперечные размеры профилей конструктивных элементов должны находиться в интервале от минимального до максимального значения их сортамента;

• для линейной секции: шаг установки вертикальных стоек не должен превышать четырех метров, так как при его больших значениях существенно возрастают динамические нагрузки на направляющие со стороны движущейся ленты с грузом.

В число прочностных ограничений были включены условия:

• продольные силы N в элементах металлоконструкции, подверженных центральному растяжению или сжатию, не должны превышать предельной продольной силы $AR_y\gamma_c$ с учетом режима работы конвейера при расчете на статическую прочность:

$$AR_y\gamma_c - N \geq 0; \qquad (1)$$

• продольные силы N в элементах металлоконструкции, подверженных центральному сжатию, не должны превышать предельной продольной силы $\varphi A R_y \gamma_c$ с учетом режима работы конвейера и коэффициента продольного изгиба центрально-сжатых стержней при расчете на устойчивость:

$$\varphi A R_y \gamma_c - N \geq 0; \qquad (2)$$

• напряжения изгиба в элементах металлоконструкции, подверженных действию изгибающих моментов в вертикальной и горизонтальной плоскостях, не должны превышать предела текучести материала $R_y \gamma_c$ с учетом режима работы конвейера при расчете на статическую прочность:

$$R_y \gamma_c - \left(\frac{M_y}{I_y} z + \frac{M_z}{I_z} y\right) \geq 0, \qquad (3)$$

где A – площадь сечения конструктивного элемента; γ_c – коэффициент, учитывающий условия работы конструкции, в том числе, динамические процессы; R_y – предел текучести материала; φ – коэффициент продольного изгиба центрально-сжатых стержней; M_y , M_z – изгибающие моменты в горизонтальной (относительно оси y-y) и вертикальной (относительно оси z-z) плоскостях соответственно; I_y , I_z – момент сопротивления сечения относительно оси y-y и z-z соответственно; y, z – координаты рассматриваемой точки сечения относительно главных осей.

В число жесткостных ограничений включены условия не превышения прогибами f конструктивных элементов МК их предельных значений f_u:

$$f_u - f \geq 0.$$

Предельные прогибы стержней и раскосов для стержневых решетчатых конструкций при длине стержней до 6 метров принимались как

$$f_u = \left(\frac{l}{120} \ldots \frac{l}{200}\right).$$

В процессе эксплуатации на металлоконструкцию КПЛ возможно негативное коррозионное воздействие как со стороны окружающей среды, так и со стороны транспортируемого материала. С течением времени оно приводит к постепенному удалению материала с поверхности конструктивных элементов МК и, таким образом, к уменьшению площади и моментов инерции их поперечных сечений. Это обстоятельство обуславливает необходимость включения в оптимизационные математические модели основных узлов КПЛ коррозионных ограничений, учитывающих изменение геометрических характеристик конструктивных элементов узлов и позволяющих прогнозировать их значения к моменту времени исчерпания заданного срока эксплуатации МК конвейера.

Коррозионные ограничения представляют собой условия превышения площадью поперечного сечения корродированного элемента в течение заданного срока службы МК конвейера τ_{cc} минимально допустимого по условиям прочности и жесткости поперечного сечения:

$$A(\tau = 0) - \int_0^{\tau_{cc}} v_A(\tau)\, d\tau - A_{\min} \geq 0,$$

где $A(\tau=0)$ – начальная площадь поперечного сечения конструктивного элемента; v_A – скорость уменьшения площади конструктивного элемента в процессе коррозии; τ_{cc} – заданный срок службы металлоконструкции КПЛ; $A_{\min}$ – минимально допустимая площадь поперечного сечения конструктивного элемента.

В третьей главе представлена реализация разработанных математических моделей конструктивных узлов МК стационарных КПЛ в программном комплексе NX. С помощью данного комплекса проводились расчеты металлоконструкций по первой и второй группам предельных состояний методом конечных элементов и определялись оптимальные по массе геометрические характеристики поперечных сечений конструктивных элементов, удовлетворяющие установленным ограничениям.

Последовательность процедуры оптимального проектирования МК конвейера показана на Рис. 3.

Процедура оптимизации выполнялась методом прямого поиска – методом Хука-Дживса.

Исходный расчетный вариант МК представляет собой геометрическую каркасную модель, соответствующую универсальной структурной схеме оптимизируемого основного узла КПЛ. Ее размеры определяются техническими характеристиками при проектировании КПЛ. Геометрическая каркасная модель преобразуется в конечноэлементную расчетную схему (Рис. 4), задаются условия закрепления (жесткие заделки), а также места приложения и величины эксплуатационных нагрузок. При этом конструктивные элементы разделяются на группы, в дальнейшем в разной

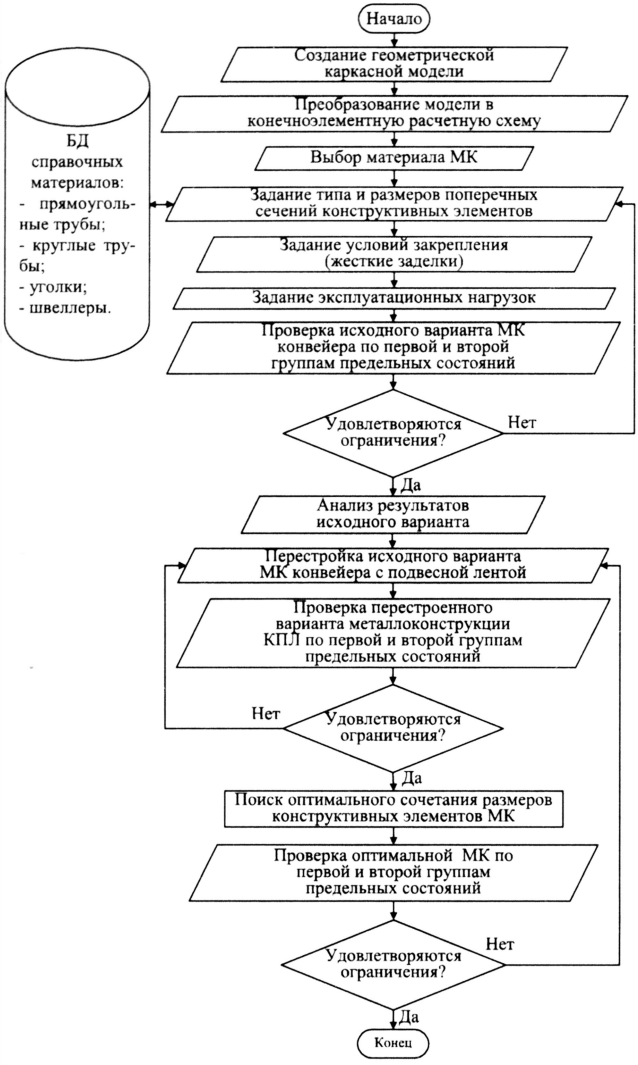


Рис. 3.
Этапы оптимального проектирования МК конвейера

степени участвующими в процессе оптимизации. Каждый элемент группы разбивается на заданное число конечных элементов. Группам элементов назначается требуемый материал, физико-механические характеристики которого заложены в библиотеку конструкционных материалов.

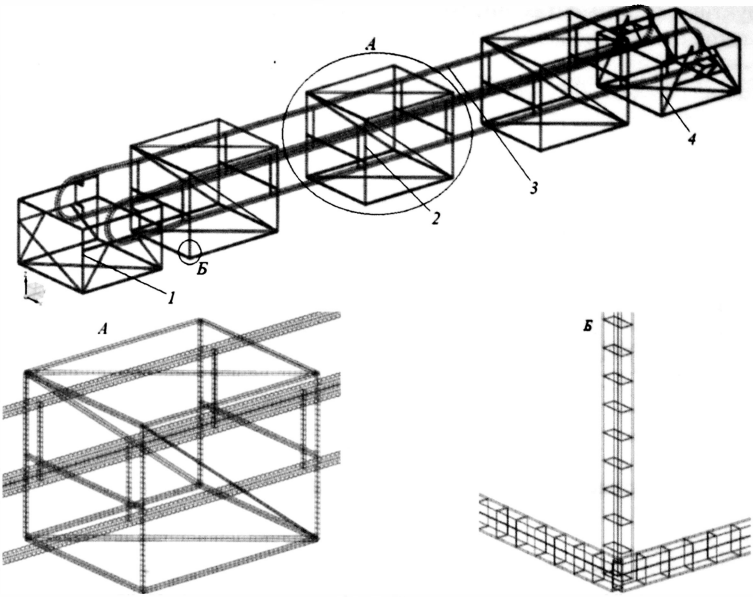
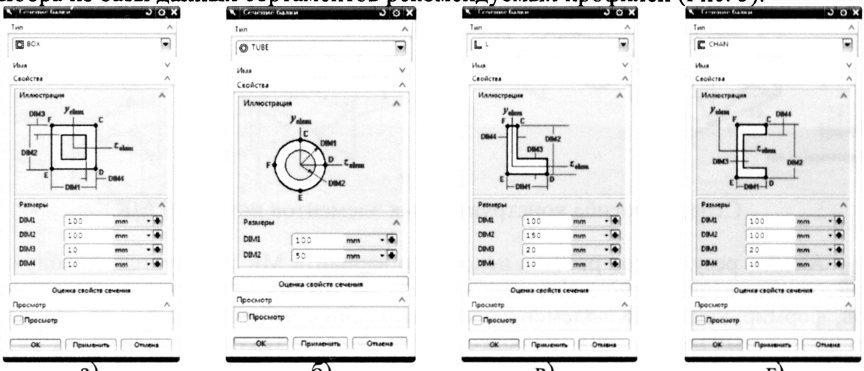


Рис. 4.
Конечноэлементная схема металлоконструкции КПЛ: 1 – натяжная станция; 2 – линейная секция; 3 – направляющая; 4 – приводная станции

Тип и размеры поперечных сечений конструктивных элементов задаются путем выбора из базы данных сортаментов рекомендуемых профилей (Рис. 5).



а) б) в) г)

Рис. 5.
Выбор типа и размеров профиля конструктивного элемента:
а) – прямоугольная труба; б) – круглая труба; в) – уголок; г) – швеллер

Исходный вариант МК проходит проверку работоспособности по первой и второй группам предельных состояний для условий стационарной работы конвейера с полной загрузкой ленты транспортируемым грузом. Выполняется расчет внутренних силовых факторов, эквивалентных напряжений и прогибов во всех конструктивных элементах оптимизируемого узла КПЛ. Пример представления результатов расчета показан на Рис. 6 и 7.

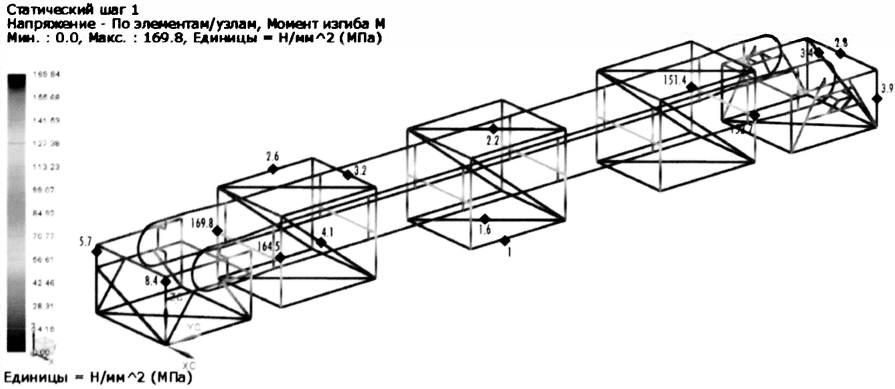


Рис. 6.
Эквивалентные напряжения конструктивных элементов исходной МК

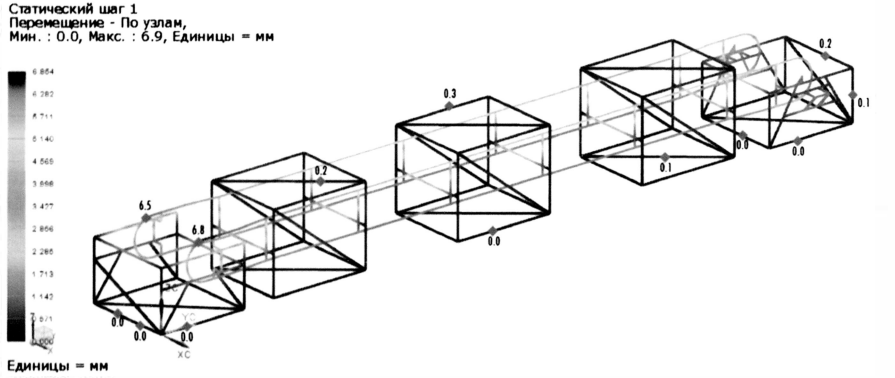


Рис. 7.
Стрела прогиба конструктивных элементов исходной МК

Анализ результатов расчета исходного варианта МК базируется на полученной оценке напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов, формирующих МК. Элементы, испытывающие действие малых по величине эквивалентных напряжений (не более 5...10% предела текучести материала, т.е. до 10...20 МПа) исключаются из конструктивной схемы МК. В случаях, когда по конструктивным соображениям их исключение невозможно или нецелесообразно, выполняется уменьшение размеров их поперечных сечений.

Таким образом производится перестройка исходной универсальной структурной схемы МК и получение оптимизируемой структурной схемы МК, которая от универсальной отличается наличием меньшего числа конструктивных элементов.

Процедура проверки перестроенного исходного варианта МК по первой и второй группам предельных состояний выполняется аналогично. Целью данной проверки является оценка работоспособности МК с оптимизируемой структурной схемой и заданными величинами поперечных сечений сохраненных конструктивных элементов. По ее окончанию определяется новое распределение значений эквивалентных напряжений и стрелы прогибов конструктивных элементах МК (Рис. 8, 9).

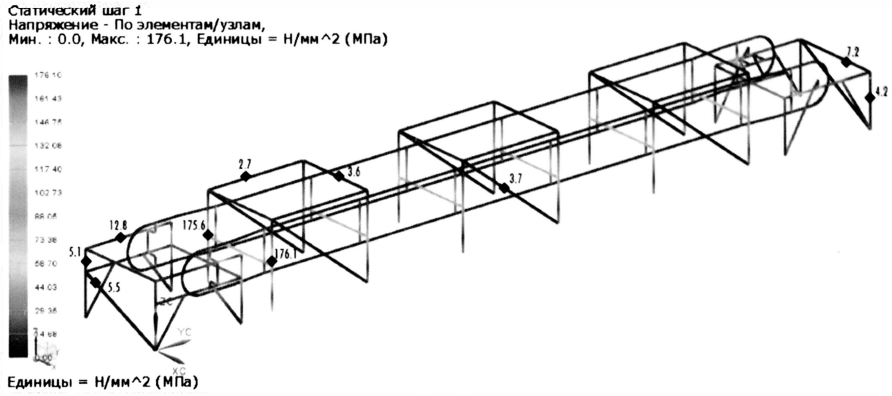


Рис. 8.
Эквивалентные напряжения перестроенной схемы МК

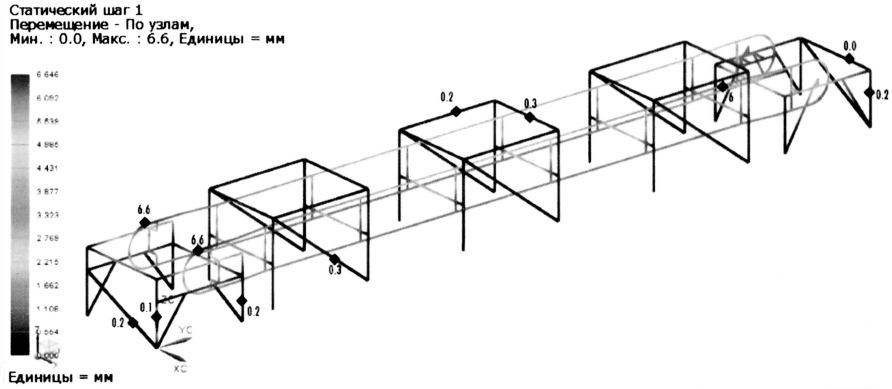


Рис. 9.
Стрела прогиба перестроенной схемы МК

Процедура нахождения оптимального сочетания геометрических размеров поперечных сечений конструктивных элементов оптимизируемых узлов КПЛ, при котором достигается минимум массы МК при соблюдении всей совокупности конструктивных, прочностных, жесткостных и коррозионных ограничений, вы-

полняется в среде Altair HyperOpt программного комплекса NX. Процедура предусматривает поочередное пошаговое изменение величины варьируемых параметров задачи оптимального проектирования с вычислением на каждом шаге величины целевой функции $L(\{x\}, \{z\})$ оптимизируемого узла КПЛ и проверки соответствия текущих значений размеров поперечных сечений конструктивных элементов установленной системе ограничений (1) - (3) при расчете по первой группе предельных состояний. Найденное таким образом оптимальное сочетание геометрических размеров обеспечивает практически полную нагруженность основных несущих конструктивных элементов МК, так как действующие в них эквивалентные напряжения оказываются близки по величине к допускаемым значениям.

Заключительным этапом процедуры оптимального проектирования является проверка оптимальной МК по второй группе предельных состояний для случая стационарной работы конвейера при полной загрузке ленты транспортируемым грузом, а также по первой и второй группам предельных состояний при нестационарной работе конвейера с полной загрузкой ленты транспортируемым грузом и с отсутствием груза на ленте.

В четвертой главе представлена практическая реализация разработанной методики оптимального проектирования МК стационарного КПЛ.

Проводилось оптимальное проектирование МК конвейера с подвесной лентой, перемещающего груз по прямолинейной вертикально замкнутой трассе. Его основные технические характеристики: производительность – 120 т/ч; длина конвейера – 33 м; скорость движения ленты – 1,1 м/с; ширина ленты – 0,8 м; шаг роликовых подвесок – 1 м; длина линейной секции – 2 м. В качестве базы для сравнения использовался КПЛ с аналогичными техническими характеристиками, спроектированный и изготовленный ООО «Конвейер» (г.Брянск). В Таблице 1 приведены МК массы основных конструктивных узлов КПЛ для оптимального варианта и варианта ООО «Конвейер», в Таблице 2 – размеры профилей конструктивных элементов узлов КПЛ.

Таблица 1.

Масса металлоконструкций КПЛ

Узел конвейера	Масса металлоконструкции варианта, кг	
	оптимального	ООО «Конвейер»
Линейная секция	52	177
Натяжная станция	45	300
Приводная станция	51	231
Конвейер в целом	2837	4807

Таблица 2.

Профили конструктивных элементов МК узлов КПЛ

Узел конвейера	Профили поперечного сечения варианта	
	оптимального	ООО «Конвейер»
Линейная секция	прямоугольная труба 50×25×3; прямоугольная труба 20×10×2	швеллер № 6,5
Натяжная станция		прямоугольная труба 80×40×4
Приводная станция		швеллер №6,5 и прямоугольная труба 80×40×4

Масса МК конвейера в целом, полученная в результате оптимального проектирования, на 41% (на 1972 кг) оказывается меньше массы МК конвейера произ-

водства ООО «Конвейер». Аналогичные результаты наблюдаются и при сравнении масс отдельных узлов КПЛ: для приводной станции снижение составляет 78% (180 кг), для натяжной станции – 85% (255 кг), для одной линейной секции – 71% (125 кг). Учитывая, что МК конвейера состоит из значительного числа линейных секций, именно снижение массы одной секции является наиболее эффективным мероприятием с точки зрения снижения материалоемкости КПЛ в целом.

Достигнутая эффективность применения оптимального проектирования обуславливается, главным образом, максимально возможным использованием прочностных свойств материала и несущей способности конструктивных элементов МК. Для оптимальной МК эквивалентные напряжения к моменту выработки заданного срока службы конвейера составляли 262 МПа (или 99% величины допустимого напряжения для стали 09Г2С, равного 265 МПа) независимо от принятой в расчетах скорости коррозионного повреждения металла конструктивных элементов. Для начального момента времени ввода конвейера в эксплуатацию эквивалентные напряжения оказываются ниже, составляя 224 МПа (при наибольшей линейной скорости коррозии, равной 0,1 мм/год). Для конвейера ООО «Конвейер» максимальные эквивалентные напряжения составляют 104 МПа (или 39% величины допустимого напряжения), т.е. конструктивные элементы его МК имеют избыточный запас несущей способности.

В пятой главе выполнен анализ влияния конструктивных и режимных параметров стационарных КПЛ на результаты оптимального проектирования их МК.

Удельный вклад масс основных конструктивных узлов в общую массу металлоконструкции КПЛ существенно зависит от длины конвейера (Рис. 10). При длине конвейера более 50 метров суммарный вклад масс приводной и натяжной станций составляет менее 10...15% общей массы МК конвейера в целом. Поэтому при длине проектируемого КПЛ более 50...60 м возможно исключать металлоконструкции приводной и натяжной станций из процедуры оптимального проектирования, ограничиваясь лишь параметрической оптимизацией линейных секций.

С увеличением массовой производительности конвейера при условии постоянства расстояния между его направляющими массы основных конструктивных узлов МК возрастают прямо пропорционально (Рис. 11).

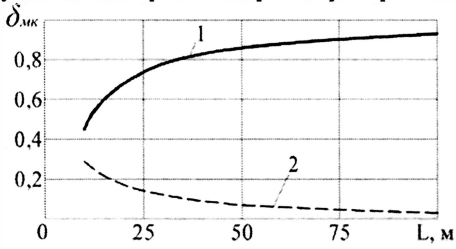


Рис. 10.
Зависимость удельных вкладов масс основных узлов КПЛ от его длины:
1 – линейные секции; 2 – приводная и натяжная станции

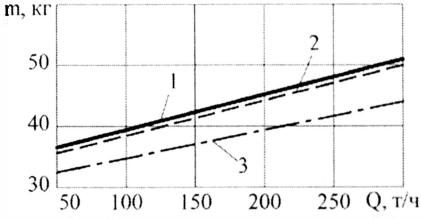


Рис. 11.
Зависимость массы КПЛ от массовой производительности: 1 – линейная секция; 2 – приводная станция; 3 – натяжная станция

Анализ влияния величины массовой производительности КПЛ на напряженно-деформированном состояние МК показал (Рис. 12), что повышение производительности приводит к увеличению размеров поперечных сечений стержней и рас-

косов металлоконструкции. При этом значения эквивалентных напряжений и прогибов в элементах МК для разной массовой производительности меняются нелинейно.

Для нестационарного режима конвейера без груза значения эквивалентных напряжений и прогибов с увеличением производительности заметно снижаются, что связано с увеличением размеров поперечных сечений элементов при отсутствии нагрузок на МК со стороны грузонесущей ленты.

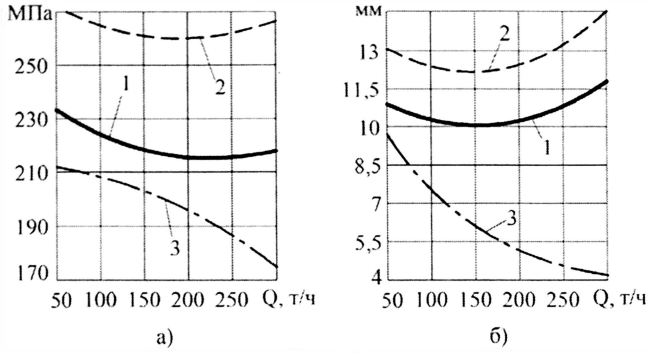


Рис. 12.
Зависимость напряжений и прогибов конструктивных элементов МК от массовой производительности КПЛ:
а) – эквивалентные напряжения; б) – стрела прогибов;
1 – стационарный режим с грузом; 2 – нестационарный режим с грузом; 3 – нестационарный режим без груза

Коррозионное воздействие при эксплуатации КПЛ обуславливает необходимость увеличения массы оптимального варианта МК, причем наблюдается прямо пропорциональная зависимость между линейной скоростью коррозии и увеличением массы МК основных узлов и КПЛ в целом (Рис. 13). Так, при изменении скорости коррозии от 0 до 0,1 мм/год масса оптимальной МК конвейера увеличивается на 60%.

Осуществлен анализ влияния разных марок строительной стали, используемой для МК, на результат оптимального проектирования (Рис. 14).

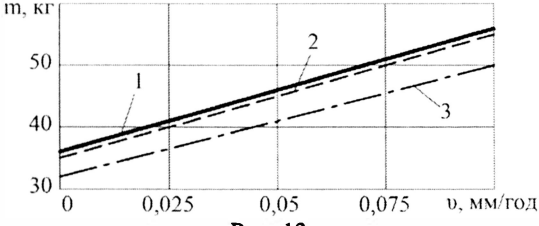


Рис. 13.
Зависимость массы от скорости коррозии МК:1 – линейная секция; 2 – приводная станция; 3 – натяжная станция

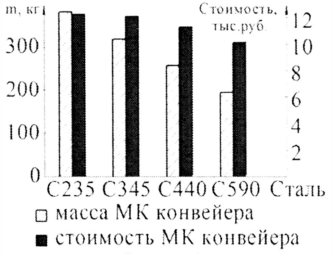


Рис. 14.
Зависимость масс МК конвейера от марки стали

С увеличением механических характеристик строительных сталей наблюдается снижение массы и стоимости металлоконструкции за счет того, что скорость снижения массы преобладает над скоростью повышения стоимости стали.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. В процессе оптимизации реализуется процедура переформирования исходных универсальных структурных схем основных узлов металлоконструкции путем исключения избыточных конструктивных элементов (стержней и раскосов), оказывающих незначительное влияние на конструктивную прочность и жесткость. Доказано, что разработанные универсальные структурные схемы, математические модели и методика оптимального проектирования основных узлов металлоконструкции стационарных конвейеров с подвесной лентой позволяют на этапе проектирования создавать оптимальные по критерию минимума массы варианты металлоконструкции при условии соблюдения требуемых конструктивных, прочностных, жесткостных и коррозионных ограничений.

2. Установлено, что использование оптимизации при проектировании металлоконструкции стационарных конвейеров с подвесной лентой значительно снижает их материалоемкость. Доказано, что масса металлоконструкции в целом может быть снижена на 20…50% по сравнению с традиционной методикой проектирования. Это достигается применением расширенной номенклатуры оптимальных профилей поперечных сечений конструктивных элементов, варьированием их геометрических характеристик, а также обеспечением их максимально возможной нагруженности.

3. Установлено, что в зависимости от длины конвейера с подвесной лентой целесообразно проводить либо полную оптимизацию металлоконструкции, включающую оптимальное проектирование всех ее основных узлов (натяжной станции, линейной части, приводной станции), либо параметрическую оптимизацию, включающую оптимальное проектирование металлоконструкции только линейной части конвейера. Доказано, что при длине конвейера порядка 50 метров масса приводной и натяжной станций составляет менее 10...15% суммарной массы конвейера. Поэтому при проектировании конвейеров длиной более 50 м возможно ограничиться лишь параметрической оптимизацией металлоконструкции.

4. Для металлоконструкций конвейеров, испытывающих при эксплуатации коррозионное воздействие со стороны окружающей среды или транспортируемого материала, необходимо учитывать его интенсивность путем включения в задачу оптимизации коррозионных ограничений. Показано, что в условиях коррозионного износа при изменении скорости общей равномерной коррозии от 0 до 0,1 мм/год масса оптимального варианта металлоконструкции конвейера с подвесной лентой увеличивается на 60% по сравнению с массой оптимального варианта металлоконструкции без учета воздействия коррозии.

5. Масса основных конструктивных узлов МК при использовании строительной стали С590 снижается на 50% по сравнению с использованием стали С235, обладающей более низкими механическими свойствами и стоимостью. Тем не менее, стоимость металлоконструкции из стали С590 оказывается на 20% ниже, чем из стали С235. Поэтому для изготовления металлоконструкций КПЛ, спроектированных на основе оптимального проектирования, целесообразно использовать строительные стали с более высокими механическими свойствами.

6. При стационарном и нестационарном режимах работы конвейера с подвесной лентой повышение его массовой производительности в интервале от 50 до 300 т/ч за счет увеличения плотности транспортируемого материала вызывает линейный рост эквивалентных напряжений и прогибов наиболее нагруженных элементов металлоконструкции в пределах 5…10%.

7. Конструкция конвейера с подвесной лентой защищена патентом РФ на полезную модель № 113514. Результаты выполненных исследований используются в ООО «Конвейер» (г. Брянск) при проектировании металлоконструкций стационарных конвейеров с подвесной лентой, в ООО «Промбезопасность» (г. Брянск) при расчете, проектировании и экспертизе рамных и ферменных конструкций подъемно-транспортных машин и оборудования, а также в учебном процессе на кафедре «Подъемно-транспортные машины и оборудование» Брянского государственного технического университета.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В журналах из списка ВАК РФ:

1. Лагерев А.В., Бословяк П.В. Универсальная методика оптимального проектирования металлоконструкций конвейеров с подвесной лентой // Вестник Брянского государственного технического университета. 2014. №1. С. 31-36. (0,8 п.л. / 0,4 п.л.).

2. Лагерев А.В., Бословяк П.В. Оптимальное проектирование узлов металлоконструкции конвейера с подвесной лентой в программном комплексе NX // Вестник Брянского государственного технического университета. 2014. №2. С. 38-44. (0,8 п.л. / 0,4 п.л.).

Документы на объекты интеллектуальной собственности:

3. Конвейер с подвесной лентой: пат. 113514 РФ / А.В. Лагерев, В.П. Дунаев, Д.Ю. Кулешов, Е.И. Ильин, П.В. Бословяк заявл. 25.05.11; опубл. 20.02.12. Бюл. № 5.

Публикации в других изданиях:

4. Бословяк П.В. Оптимальное проектирование металлоконструкции конвейера с подвесной лентой в программном комплексе NX // Подъёмно-транспортные, строительные, дорожные, путевые машины и робототехнические комплексы. Материалы XVIII Моск. Междунар. межвуз. научн.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. М.: МАДИ, 2014. Ч. I. С. 14-17. (0,3 п.л.).

5. Лагерев А.В., Бословяк П.В. Оптимальное проектирование металлоконструкций стационарных конвейеров с подвесной лентой на основе разработанной базы конструктивных схем // Проблемы и инновации в области механизации и технологий в строительных и дорожных отраслях. Материалы Междунар. научн.-практ. конф. / Под ред. Н.В. Крючковой. Саратов: СГТУ им. Ю.А. Гагарина, 2014. № III. С. 63-67. (0,4 п.л. / 0,2 п.л.).

6. Бословяк П.В. Оптимальное проектирование металлоконструкций стационарных конвейеров с подвесной лентой // Будущее машиностроения России. Сб. тр. VII Всерос. конф. молодых ученых и специалистов. М: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. С.368-370. (0,2 п.л.).

7. Бословяк, П.В. Влияние производительности и режимов работы конвейера с подвесной лентой на оптимальное проектирование металлоконструкции // Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые машины и робототехнические комплексы. Материалы XIX Моск. Междунар. межвуз. научн.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. М: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. С. 27-29. (0,2 п.л.).