

УДК 621. 86

РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДИКИ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИИ КОНВЕЙЕРА С ПОДВЕСНОЙ ЛЕНТОЙ

П.В. Бословяк, Е.П. Зуева

Брянский государственный технический университет

Представлены результаты оптимального проектирования металлоконструкции стационарного конвейера с подвесной лентой. Выполнен анализ результатов оптимального проектирования металлоконструкции стационарного конвейера с подвесной лентой.

Ключевые слова: металлоконструкция, конвейер с подвесной лентой, оптимальное проектирование, оптимизация, параметры, конструктивные узлы, силовые факторы, эксплуатационные нагрузки.

Технические характеристики для проектирования стационарного конвейера с подвесной лентой (КПЛ), перемещающего нефтяной кокс по прямолинейной трассе, представлено в табл. 1 [2, 5].

Таблица 1

Технические характеристики конвейера с подвесной лентой

Параметр	Значение
Производительность	120 т/ч
Длина конвейера	33 м
Скорость движения ленты	1,1 м/с
Ширина ленты	0,8 м
Тип ленты	ТК200
Число прокладок ленты	2
Шаг роликовых подвесок	1 м
Масса роликовой подвески	6 кг
Длина линейной секции	2 м
Время пуска конвейера	5 с
Нормативный срок служба металлоконструкции конвейера	12 лет
Условия эксплуатации	Работа на открытом воздухе

Схема стационарного конвейера с подвесной лентой показана на рис. 1.

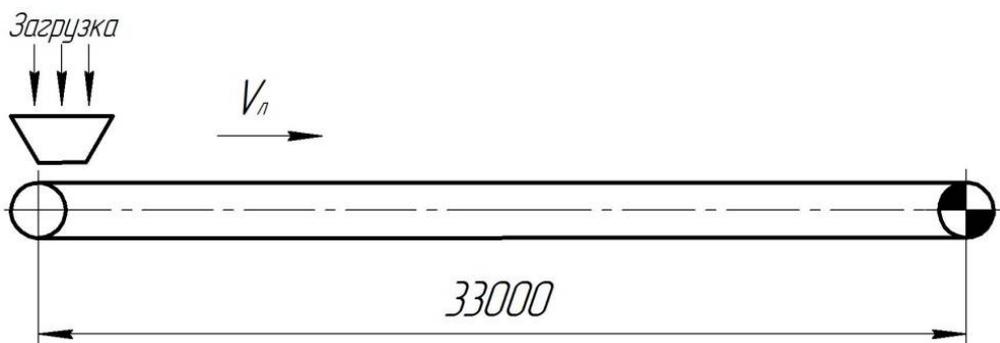


Рис. 1. Схема трассы стационарного конвейера с подвесной лентой

Эксплуатационные нагрузки, действующие на металлоконструкцию (МК) при различных режимах работы стационарного конвейера с подвесной лентой, приведены в табл. 1.

На первоначальном этапе осуществлялось проектирование оптимальной металлоконструкции стационарного конвейера с подвесной лентой. Выполнялась проверка исходного варианта МК при условии стационарного режима работы конвейера с полной загрузкой ленты по первой группе предельного состояния [3, 6, 7].

Таблица 2

Нагрузки, действующие на металлоконструкцию конвейера с подвесной лентой

Усилие на металлоконструкцию со стороны	Стационарный режим с загрузкой лентой	Нестационарный режим с загрузкой лентой	Нестационарный режим без загрузки ленты
натяжного барабана $R_{нб}$	2,26 кН		
приводного барабана $R_{пб}$	1,93 кН		
приводного устройства, R_n	1,8 кН		
натяжения ленты, N	4 кН		
подвесок на грузовой ветви (поперечное усилие), F_1	0,33 кН	0,41 кН	0,18 кН
подвесок на холостой ветви (поперечное усилие), F_2	0,15 кН	0,18 кН	0,18 кН
подвесок на грузовой ветви (продольное усилие), T_1	0,12 кН	0,16 кН	0,07 кН
подвесок на холостой ветви (продольное усилие), T_2	0,04 кН	0,06 кН	0,06 кН

Вся металлоконструкция стационарного конвейера с подвесной лентой состоит из приводной станции, семи линейных секций и натяжной станции.

Далее осуществлялось преобразование каркасной модели в конечноэлементную расчетную схему. При этом элементы конструкции разделялись по группам, в дальнейшем в разной степени участвующим в процессе оптимизации. Каждая деталь группы разбивалась на конечное число элементов, которое составило 20 элементов на метр, для расчета металлоконструкции МКЭ. Данное число конечных элементов позволило получить точный результат при относительно малых затратах времени на вычисление. Для каждой группы элементов из библиотеки материалов выбирался требуемый материал – сталь 09Г2С (рис. 2).

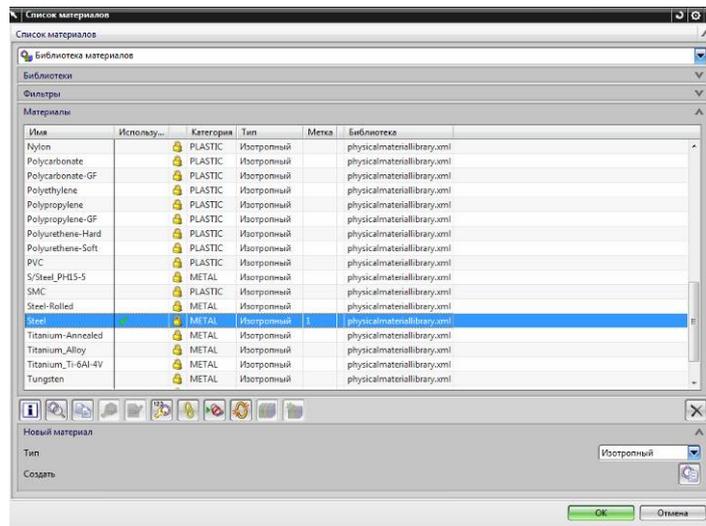


Рис. 2. Выбор материала из библиотеки

Для деталей каждой группы предварительно назначался тип профиля поперечного сечения, который выбирался из базы данных справочных материалов. В качестве предпочтительного был принят прямоугольный профиль поперечного сечения с геометрическими размерами 60×30×3 (рис. 3).

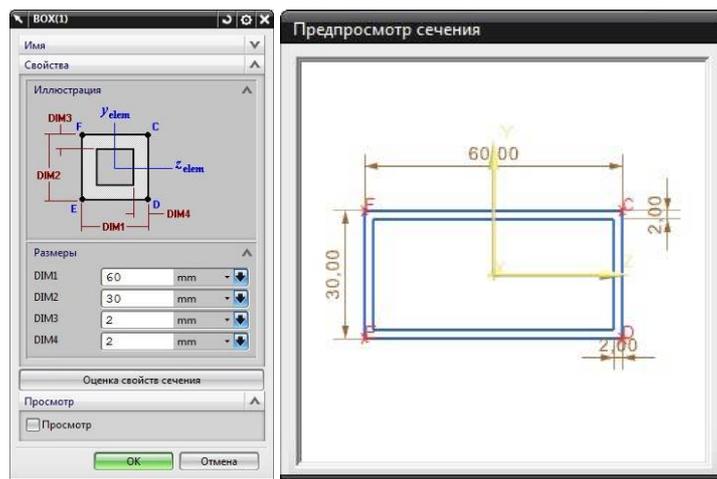


Рис. 3. Выбор типа и размеров прямоугольного профиля поперечного сечения

Коррозионные ограничения учитывались на начальном этапе проектирования путем равномерного уменьшения толщин стенок поперечных сечений всех стержней и раскосов металлоконструкции. В течение установленного нормативного срока эксплуатации стационарного конвейера с подвесной лентой снижение профиля всех конструктивных элементов составило 1 мм.

Формирование сетки конечных элементов выполнялось в модуле Advanced Simulation программного комплекса NX, предназначенном для осуществления инженерного анализа.

В местах контакта МК конвейера с опорной поверхностью устанавливались жесткие заделки, и осуществлялся ввод эксплуатационных нагрузок.

Помимо указанных нагрузок (табл. 1) учитывался собственный вес металлоконструкции, а также условия работы конструкции. Исходная расчетная схема МК приведена в [2, 3].

Далее проводились расчеты металлоконструкции КЭЛ по первой и второй группам предельных состояний. Результаты представлены в [1].

Аналогичные расчеты по первой и второй группам предельных состояний осуществлялись в качестве проверки для нестационарного режима работы конвейера с подвесной лентой при полной загрузке и при отсутствии груза на ленте. Величины внутренних силовых факторов, возникающих в МК конвейера с подвесной лентой, представлены в табл. 3.

Таблица 3

Значения внутренних силовых факторов исходной МК

Внутренний силовой фактор, деформация	Стационарный режим с загрузкой ленты	Нестационарный режим с загрузкой ленты	Нестационарный режим без загрузки ленты
Осевая сила N , кН			
- растяжение	1,78	2,21	1,69
- сжатие	2,67	3,13	2,95
Поперечная сила Q , кН	0,95	1,19	0,84
Изгибающий момент M , Н·м	310	975	206
Эквивалентное напряжение, МПа	169,8	202,3	108,7
Стрела прогиба, мм	6,8	8,4	4,4

Проведя анализ полученных результатов МК данного конвейера, выявлено:

1. Наибольшее значение осевой силы $N=3,13$ кН возникает в раскосах приводной станции с профилем квадратной трубы $60 \times 30 \times 3$. При этом допускаемое значение осевой си-

лы составляет 119 кН. В нижних стержнях и раскосах всей металлоконструкции действуют минимальные осевые силы.

2. Поперечная сила имеет максимальное значение $Q=1,19$ кН, которое возникает в продольных стержнях натяжной станции и поперечных стержнях линейных секций и является незначительным. В нижних стержнях и раскосах металлоконструкции действуют наименьшие поперечные силы.

3. Максимальный изгибающий момент возникает в прямолинейных направляющих ($M=975$ Н·м), имеющих профиль в виде круглой трубы $53 \times 3,5$. Допускаемое значение изгибающего момента круглой трубы $M = [\sigma] W_x = 2342$ Н·м. В нижних стержнях и раскосах натяжной и приводной станций действуют моменты, имеющие минимальные значения (менее 10% от максимального изгибающего момента).

4. Наибольшие эквивалентные напряжения $\sigma = 202,3$ МПа, полученные в результате расчета МК, не превышают предельных напряжений $[\sigma] = 265$ МПа для стали 09Г2С. Минимальные значения напряжений возникают в конструктивных элементах приводной и натяжной станции металлоконструкции (менее 5% от максимальной величины напряжения) и в стержнях линейной секции.

5. Максимальная стрела прогиба металлоконструкции $f = 8,4$ мм имеет место на участках прямолинейных направляющих и соответствует допускаемому значению для круглой трубы длиной 4 метра $[f] = (l / 200) = 20$ мм. Минимальные прогибы возникают в нижней части металлоконструкции (менее 10% от наибольшей величины прогиба). Также для стержней линейной секции максимальная стрела прогиба составляет $f = 1,7$ мм при допускаемом значении прогиба данного стержня длиной 0,8 метра $[f] = (l / 120) = 6,7$ мм.

Металлоконструкция удовлетворяет условиям первой и второй групп предельных состояний, поэтому проектирование в среде NX Nastran заканчивается.

На основании полученных результатов осуществлялся анализ исходного варианта металлоконструкции [2, 3, 6, 8].

Выполнялась перестройка исходного варианта МК, заключающаяся в удалении из структурной схемы МК элементов, в которых действуют незначительные напряжения [2, 6].

Производилась последовательность действий, аналогичных начальному этапу. Формировалась новая сетка конечных элементов, которая в дальнейшем преобразуется в расчетную схему [3, 4].

Далее осуществляется расчет перестроенного варианта МК, результаты которого представлены в [3].

Значения внутренних силовых факторов, возникающие в перестроенной расчетной схеме металлоконструкции для различных режимов работы стационарного конвейера с подвесной лентой, представлены в табл. 4.

Таблица 4

Значения внутренних силовых факторов перестроенной МК

Внутренний силовой фактор, деформация	Стационарный режим с загрузкой ленты	Нестационарный режим с загрузкой ленты	Нестационарный режим без загрузки ленты
Осевая сила N , кН			
- растяжение	2,01	2,35	1,69
- сжатие	3,05	3,55	2,86
Поперечная сила Q , кН	1,04	1,24	0,78
Изгибающий момент M , Н·м	330	424	218
Эквивалентное напряжение, МПа	176,1	210	116,2
Стрела прогиба, мм	6,6	8,1	4,4

Анализ полученных результатов перестроенной металлоконструкции КПЛ:

1. Наибольшее значение осевой силы $N=3,55$ Н возникает при нестационарном режиме с загрузкой ленты в вертикальных стержнях линейной секции с профилем прямоугольной трубы $60 \times 30 \times 3$. При этом допустимое значение осевой силы $N=119$ кН. В раскосах и стержнях линейной секции, натяжной и приводной станций металлоконструкции действуют минимальные осевые силы (менее 5% от максимального значения).

2. Поперечная сила имеет максимальное значение $Q=1,24$ кН, которое возникает в продольных стержнях приводной станции и поперечных стержнях линейных секций и является незначительным. Поэтому величина силы удовлетворяет условиям прочности металлоконструкции. Наименьшие значения поперечной силы действуют в стержнях и раскосах линейной секции, приводной и натяжной станции (менее 10% от максимальной величины).

3. Максимальный изгибающий момент возникает в прямолинейных направляющих ($M=424$ Н·м), имеющих профиль в виде круглой трубы $53 \times 3,5$. Допустимое значение изгибающего момента круглой трубы $M=2337$ Н·м. В стержнях линейной секции, приводной и натяжной станции действуют моменты, имеющие минимальные значения (менее 10% от максимального изгибающего момента).

4. Наибольшие эквивалентные напряжения $\sigma = 210$ МПа, полученные в результате расчета МК, не превышают предельных напряжений $[\sigma]=265$ МПа для марки стали 09Г2С. Минимальные значения напряжений возникают в стержнях и раскосах линейной секции, приводной и натяжной станции металлоконструкции (менее 8% от максимальной величины).

5. Максимальная стрела прогиба металлоконструкции $f = 8,1$ мм имеет место на участках прямолинейных направляющих и соответствует допустимому значению $[f] = 20$ мм. Минимальные значения прогибов возникают в стержнях приводной станции и линейной секции металлоконструкции (менее 5% от наибольшей величины прогиба). Также для стержней линейной секции максимальная стрела прогиба составляет $f = 1,9$ мм при допустимом значении прогиба данного стержня $[f] = 6,7$ мм.

Максимальные и минимальные значения внутренних силовых факторов перестроенной и исходной расчетных схем МК отличаются незначительно. Металлоконструкция удовлетворяет условиям первой и второй групп предельных состояний.

Далее осуществлялась процедура оптимального проектирования в среде Altair Hyper-Opt программного комплекса NX.

Вводились системы конструктивных, прочностных, жесткостных и коррозионных ограничений [2, 9].

На варьируемые параметры поперечных сечений стержней и раскосов металлоконструкции накладывались значения нижнего и верхнего пределов (рис. 4).

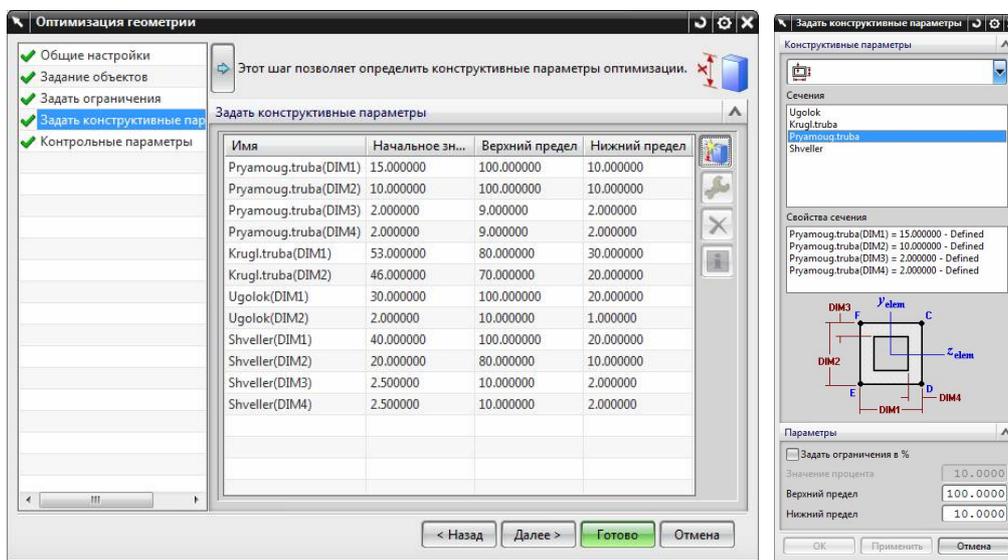


Рис. 4. Задание конструктивных ограничений

Для прямоугольной трубы границы размеров оптимального результата ширины и высоты установлены в пределах 20...100 мм, а толщина стенки 2...9 мм. Для круглой трубы границы размеров оптимального результата внешнего и внутреннего диаметров установлены в пределах 30...80 мм и 20...70 мм. Для уголка границы размеров оптимального результата ширины полки и толщины полки установлены в пределах 20...100 мм и 1...10 мм. Для швеллера установлены границы размеров оптимального результата для высоты 20...100 мм, ширины полки 10...80 мм, толщины стенки 2...10 мм и толщины полки 2...10 мм.

Устанавливалось число итераций (40 итераций) для получения оптимального результата металлоконструкции конвейера с подвесной лентой. При проведении оптимального проектирования желаемый результат лежал в интервале 20...40 итерации.

Приступали к процедуре оптимального проектирования, которая предусматривает очередное пошаговое изменение величины варьируемых параметров задачи оптимального проектирования с вычислением на каждом шаге величины целевой функции $C(\{x\}, \{z\})$ оптимизируемого узла КПЛ и проверки соответствия текущих значений размеров поперечных сечений конструктивных элементов установленной системе ограничений 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.

В табл. 5 указаны профили поперечных сечений и массы узлов металлоконструкции КПЛ после проведения процедуры оптимального проектирования.

Таблица 5

Результат оптимального проектирования металлоконструкции КПЛ

Узел конвейера		Профиль поперечного сечения	Масса металлоконструкции, кг
Конвейер			2837
Линейная часть		прям. труба 50×25×3, прям. труба 20×10×2	364
Натяжная станция			45
Приводная станция			51
Направляющая	прямолинейная	круг. труба 53×3,5	2049
	криволинейная	круглый профиль 53	328

Из табл. 5 видно, что общая масса металлоемкости конструкции КПЛ составила 2837 кг. Наибольший вклад масс в металлоконструкцию конвейера приходился от МК направляющей и линейной части, включающей 7 линейных секций.

Осуществлялась проверка оптимального варианта металлоконструкции по первой и второй группам предельных состояний при стационарном и нестационарном режимах работы конвейера с подвесной лентой (рис. 5-6).

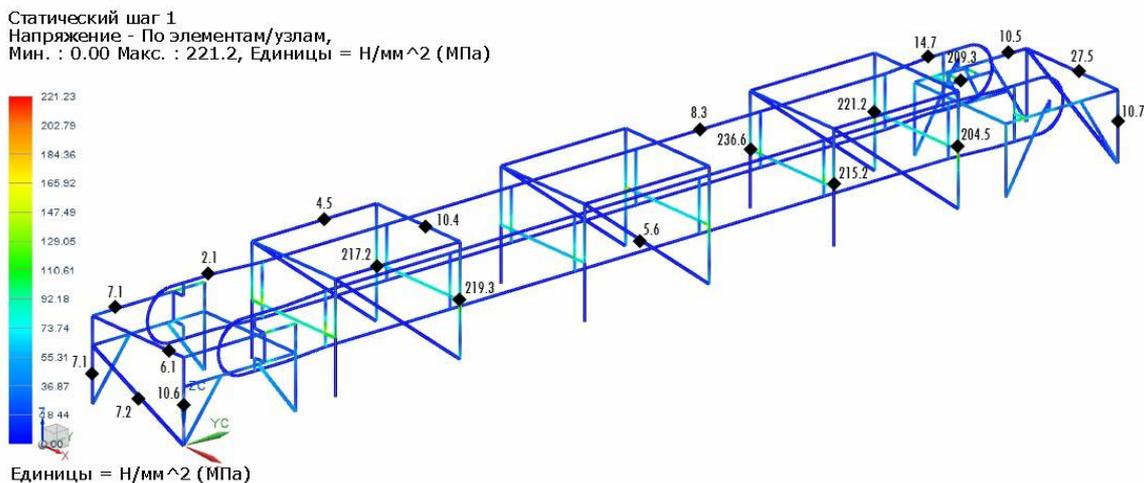


Рис. 5. Эквивалентные напряжения в стержнях и раскосах оптимальной МК

На основании выполненных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Использование при разработке металлоконструкций стационарных конвейеров с подвесной лентой подходов, основанных на оптимальном проектировании, позволяет существенно улучшить их массогабаритные и стоимостные показатели. Это достигается за счет разработанной методики оптимального проектирования, обеспечивающей максимальное использование несущей конструкции элементов стационарного конвейера с подвесной лентой.

2. На основании проведенного анализа напряженно-деформированного состояния конструкции КПЛ выявлено, что максимальные напряжения возникают в вертикальных стержнях линейной секции МК конвейера. Максимальные эквивалентные напряжения, возникающие в оптимальном варианте металлоконструкции, составляют $\sigma = 261,8$ МПа.

3. Максимальные значения внутренних силовых факторов возникают при нестационарном режиме работы КПЛ с полной загрузкой ленты. При этом данные величины внутренних силовых факторов на (15...20)% превышают значения, возникающие при расчетном случае стационарного режима работы КПЛ с учетом коррозионных ограничений.

4. Минимальные значения внутренних силовых факторов возникают в нижних стержнях и раскосах универсальной расчетной схемы металлоконструкции стационарного конвейера с подвесной лентой. В процессе оптимального проектирования данные элементы исключаются из расчетной схемы металлоконструкции, как лишние.

Список литературы

1. Бословяк, П.В. Анализ влияния конструктивных и режимных параметров стационарных конвейеров с подвесной лентой на результаты оптимального проектирования их металлоконструкций / П.В. Бословяк, Е.П. Зуева // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. - 2015. - №2. - С. 23-30.

2. Бословяк, П.В. Оптимальное проектирование металлоконструкций стационарных конвейеров с подвесной лентой: дис. ... канд. техн. наук (05.05.04) / П.В. Бословяк. - М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. - 160 с.

3. Бословяк, П.В. Универсальная методика оптимального проектирования основных конструктивных узлов металлоконструкции стационарного конвейера с подвесной лентой / П.В. Бословяк, Е.П. Зуева // Научно-технический вестник Брянского государственного университета, 2015. - №1. - С. 32-42.

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

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

6. Лагереv, А.В. Универсальная методика оптимального проектирования металлоконструкций конвейеров с подвесной лентой / А.В. Лагереv, П.В. Бословяк // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2014. - №1. - С. 31-36.

7. Лагереv 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.

8. Лагереv, А.В. Оптимальное проектирование металлоконструкций стационарных конвейеров с подвесной лентой на основе разработанной базы конструктивных схем / А.В. Лагереv, П.В. Бословяк // Вестник развития науки и образования. - 2014. - №3. - С. 63-67.

9. Лагереv, И.А. Оптимальное проектирование подъемно-транспортных машин / И.А. Лагереv, А.В. Лагереv. - Брянск: БГТУ, 2013. - 228 с.

Сведения об авторах

Бословяк Павел Валерьевич – ассистент ФГБОУ ВПО «Брянский государственный технический университет», *boslovyak89@mail.ru*.

Зуева Елена Павловна – кандидат технических наук, доцент ФГБОУ ВПО «Брянский государственный технический университет».

REALIZATION METHODOLOGY FOR OPTIMAL DESIGN OF STEEL STRUCTURES CONVEYORS WITH HANGING BELT

P.V. Boslovyak, E.P. Zueva

Bryansk State Technical University

Presents the results of optimum design of metal structures of the fixed conveyor with hanging belt. The analysis results optimum design of steel structures of stationary conveyor with hanging belt.

Keywords: steel structures, conveyor with hanging ribbon, optimal design, optimization, parameters, structural nodes, power factors, operational load.

References

1. Boslovyak P.V., Zueva E.P. Analiz vliyaniya konstruktivnykh i rezhimnykh parametrov statsionarnykh konveyerov s podvesnoy lentoy na rezultaty optimalnogo proektirovaniya ikh metallkonstruktsii [Analysis of influence of constructive and regime parameters stationary conveyor with hanging ribbon for their optimum design of steel structures], *Nauchno-tehnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015, No.2, pp. 23-30.
2. Boslovyak P.V. Optimalnoe proektirovanie metallkonstruktsiy statsionarnykh konveyerov s podvesnoy lentoy: dic. ... cand. of tech. science (05.05.04) [Optimal design of steel structures fixed conveyors with hanging belt], Moscow, 2015. 160 p.
3. Boslovyak P.V., Zueva E.P. Universalnaya metodika optimalnogo proektirovaniya osnovnykh konstruktivnykh uzlov metallkonstruktsiy konveyerov s podvesnoy lentoy [Universal method for optimal design main structural assemblies of steel structures stationary conveyor with hanging ribbon], *Nauchno-tehnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015, No.1, pp. 32-42.
4. Vershinckii A.V., Lagerev I.A., Shubin A.N., Lagerev A.V. *Chislennyy analiz metallicheskih konstruktivnykh podyemno-transportnykh mashin* [Numerical analysis of metal constructions of lifting-transport machines]. Bryansk, Bryanskiy Gosudarstvennyy Universitet, 2014. 186 p.
5. Lagerev A.V., Dunaev V.P. Conveyors with suspension carrying belt – new type of continuous transport machines, *Inzhenernyy zhurnal. Spravochnik*, 2009, No.10, pp.9-14.
6. 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.
7. Lagerev A.V., Boslovyak P.V. Optimalnoe proektirovanie uzlov metallkonstruktsii konveyera s podvesnoy lentoy v programmnom komplekse NX [Optimal design of joints of steel structures conveyor with hanging belt in the software package NX], *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2014, No.2, pp. 38-44.
8. Lagerev A.V., Boslovyak P.V. Optimalnoe proektirovanie metallkonstruktsiy statsionarnykh konveyerov s podvesnoy lentoy na osnove razrabotannoy bazy konstruktivnykh skhem [Optimal design of steel structures fixed conveyors with hanging belt designed on the basis of database design schemes], *Vestnik razvitiya nauki i obrazovaniya*, 2014, No.3, pp. 63-67.
9. Lagerev I.A., Lagerev A.V. *Optimalnoe proektirovanie podyemno-transportnykh mashin* [Optimal design of lifting-transport machines]. Bryansk, Bryanskiy Gosudarstvennyy Tekhnicheskiiy Universitet, 2013. 228 p.

Authors' information

Pavel V. Boslovyak – assistant at Bryansk State Technical University, boslovyak89@mail.ru.

Elena P. Zueva - Candidate of Technical Sciences, associate professor at Bryansk State Technical University.