

Б. Б. ЛАМПСИ¹, канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой теории сооружений и технической механики; П. А. ХАЗОВ¹, канд. техн. наук, доц. кафедры теории сооружений и технической механики; Ю. Д. МАРКИНА¹, асс. кафедры теории сооружения и технической механики; Д. М. БРИККЕЛЬ², аспирант

ВЛИЯНИЕ ЖЕСТКОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ РЕШЕТКИ НА ПОДАТЛИВОСТЬ ЕЗДОВОГО ПОЯСА ПОДКРАНОВО-ПОДСТРОПИЛЬНОЙ ФЕРМЫ (ППФ)

¹ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет» Россия, 603950, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65. Тел.: (831) 430-54-96; эл. почта: tstm@nngasu.ru, lampsi@yandex.ru, khazov.nngasu@mail.ru, poluektoff@bk.ru ²Институт проблем машиностроения РАН – филиал ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»

Россия, 603024, г. Н. Новгород, ул. Белинского, д. 85. Тел.: (831) 432-05-76; эл. почта: archive.94@mail.ru

Ключевые слова: подкраново-подстропильная ферма (ППФ), упругие опоры, угловая податливость, линейная податливость, жесткость, ездовой пояс, жесткость упругих опор.

Представлены результаты анализа влияния на угловую и линейную податливость ездового пояса ППФ соотношений жесткостей элементов решетки и ППФ. Определены погрешности перемещений и внутренних усилий балки на упругих опорах в сравнении с ездовым поясом ППФ в зависимости от жесткости решетки при действии нагрузки в плоскости фермы.

Введение

Подкраново-подстропильная ферма (ППФ) совмещает в себе функции подкрановой и подстропильной конструкции. Ее основные отличия от классических ферм заключаются в больших габаритах и развитом ездовом поясе коробчатого сечения, способном равноценно работать на изгиб в двух плоскостях и сопротивляться деформациям закручивания. Применение ППФ целесообразно при значительных пролетах и нагрузках на конструкцию, тяжелом режиме работы кранового оборудования. С увеличением пролета и нагрузок на подкрановую систему или кровлю эффективность применения ППФ возрастает. В этом случае совмещение в одной конструкции функций подкрановой балки и подстропильной системы в сочетании с использованием сталей повышенной и высокой прочности дает значительный экономический эффект в сравнении с раздельными конструкциями. В то же время область применения ППФ ограничивается повышенной сложностью их изготовления, наибольшую трудность создают сварные монтажные стыки ездового пояса.

Особую сложность представляет и расчет ППФ. Ездовой пояс находится в сложном напряженном состоянии, в том числе испытывает стесненное кручение, вызванное возможной односторонней крановой нагрузкой и силами поперечного торможения кранов. При этом само сечение пояса в виде призматического тонкостенного стержня закрытого профиля часто оказывается несимметричным, имеет консоли (выпуски поясных листов за пределы стенок) и усиливается диафрагмами, ребрами жесткости и другими подкрепляющими элементами. Рекомендации по расчету ППФ приведены в [1], их основные недостатки указаны в [2–5].

В данной статье представлены промежуточные результаты анализа влияния элементов решетки на податливость ездового пояса ППФ, окончательной целью которого является увеличение точности и упрощение методики расчета ППФ.

Методы исследования

Первым этапом исследования является выбор расчетной схемы.

Объектом исследования служит продольная ППФ пролетом 36 м (рис. 1), расположенная в литейном цехе металлургического предприятия. При расчете задается нагрузка от двух двухбалочных мостовых кранов 180+63/20–33,5–36–3–220 режима работы 7К, выполняющих функцию заливки и разливки жидкой стали в изложницы, нагрузка от собственного веса ППФ и веса поддерживаемых ею элементов сооружения, технологические и климатические нагрузки в соответствии с [6].

С помощью программно-вычислительного комплекса SCAD проанализировано 14 вариантов расчетных схем. За эталонную расчетную схему принята полная пространственная модель с пластинчатыми элементами поясов, решетки, ребрами жесткости и фасонками. Для дальнейшего исследования выбрана плоская расчетная схема с жестким соединением стержней в узлах и учетом эксцентриситета крепления решетки, т. к. она дает минимальную погрешность 11 % при определении перемещений по сравнению с полностью пространственной моделью и является значительно менее трудоемкой в построении. Погрешность 11 % входит в диапазон погрешностей 10–15 %, присутствующей при переходе от пространственной к плоской модели для большинства систем.



Рис. 1. Схема ППФ пролетом 36 м

После выбора расчетной схемы произведен анализ влияния на угловую и линейную податливость ездового пояса ППФ соотношений жесткостей элементов решетки и ППФ.

Объектами исследования являются 4 ППФ с характеристиками:

1. Пролет 36 м, высота 6,5 м, ездовой пояс 3×2 м, элементы решетки $0,64 \times 0,96 \times 0,03$ м (рис. 2a);

2. Пролет 36 м, высота 15,44 м, ездовой пояс 2,35×2,7 м, элементы решетки 0,96×0,96×0,02 м (рис. 2*б*);

3. Пролет 48 м, высота 13 м, ездовой пояс 2,75×2,7 м, элементы решетки 0,75×0,03×0,63×0,02 м (рис. 2в);

4. Пролет 9 м, высота 3,3 м, ездовой пояс 0,9×0,7 м, элементы решетки 0,12×0,18×0,006 м (рис. 2г).

Для каждой ППФ последовательно в 6 этапов изменялась жесткость элементов решетки. В каждом случае в исследуемый узел прикладывалась единичная нагрузка для получения перемещения. Рассмотрены варианты приложения нагрузки



в трех направлениях: линейная в плоскости, линейная из плоскости, крутящий момент. По итогу изучено по 18 расчетных схем для каждой из 4 ППФ. Также для вычленения жесткости решетки из общей жесткости ППФ определены перемещения от единичных нагрузок в трех направлениях четырех балок сечением и пролетами, идентичными ездовым поясам соответствующих ППФ.



Рис. 2. ППФ: *а* – пролетом 36 м, высотой 6,5 м; *б* – пролетом 36 м, высотой 15,44 м; *в* – пролетом 48 м, высотой 13 м; *г* – пролетом 9 м, высотой 3,3 м

Жесткость решетки определена по формуле (1):

$$C_{p} = \frac{1}{\delta_{\Pi\Pi\Phi}} - \frac{1}{\delta_{6}} \quad , \tag{1}$$

где $\delta_{\Pi\Pi\Phi}$ – податливость ППФ, м (рис. 3*a*); δ_6 – податливость эквивалентной балки, м (рис. 3*б*).



Рис. 3. Расчетные схемы для определения податливости: $a - \Pi \Pi \Phi$; δ – балки сечением эквивалентной ездовому поясу $\Pi \Pi \Phi$

К СТАТЬЕ Б. Б. ЛАМПСИ, П. А. ХАЗОВА, Ю. Д. МАРКИНОЙ, Д. М. БРИККЕЛЯ «ВЛИЯНИЕ ЖЕСТКОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ РЕШЕТКИ НА ПОДАТЛИВОСТЬ ЕЗДОВОГО ПОЯСА ПОДКРАНОВО-ПОДСТРОПИЛЬНОЙ ФЕРМЫ (ППФ)»



Рис. 1. Влияние жесткости решетки на линейную податливость ездового пояса в плоскости $\Pi\Pi\Phi$



Рис. 2. Влияние жесткости решетки на угловую податливость ездового пояса



Рис. 3. Влияние жесткости решетки на линейную податливость ездового пояса из плоскости $\Pi\Pi\Phi$



Рис. 4. Процентный рост жесткости решетки









Рис. 5. Влияние жесткости решетки на угол поворота ездового пояса ППФ при кручении: a – для ППФ №1–3 и эквивалентных их ездовым поясам балок № 1–3; б – для ППФ № 4 и эквивалентной ее ездовому поясу балке № 4





в

Рис. 6: a – влияние жесткости решетки на изгибающий момент Му ездового пояса ППФ; δ – влияние жесткости решетки на прогиб ездового пояса ППФ; e – оценка точности замены решетки ППФ упругими опорами

После вычисления жесткостей решетки для ППФ пролетом 36 м высотой 6,5 м (рис. 1*a*) построены модели балок на упругих опорах с соответствующими жесткостями (рис. 4). Определена погрешность перемещений и внутренних усилий данных расчетных схем в сравнении с моделями ППФ в зависимости от жесткости решетки при действии нагрузки в плоскости фермы.

Рис. 4. Расчетная схема балки на упругих опорах

Результаты

Результаты подбора расчетной схемы приведены на рис. 5 и в табл. 1.

Рис. 5. Изменение максимального прогиба ППФ в зависимости от типа расчетной схемы

Таблица 1

Результаты подбора расчетной схемы

Но- мер типа РС	Тип расчетной схемы (РС)	Макси- мальный прогиб, мм	Измене- ние макси- мального прогиба, %
1	Плоская многопролетная балка	3,52	-918
2	Пространственная с жестким соединением стержней в узлах и пластинчатым ездовым поясом с ребрами жесткости и фасонками, шаг сетки конечных элементов (КЭ) 0,5 м (рис. 66)	5,6	-540
3	Пространственная с жестким соединением стержней в узлах и пластинчатым ездовым поясом с ребрами жесткости и фасонками, шаг сетки КЭ 0,25 м	5,97	-500
4	Полная пространственная с ребрами жесткости и фасонками (рис. 6 <i>a</i>)		0
5	Плоская с жесткими узлами с учетом эксцентриситета крепления решетки		11
6	Плоская с шарнирными узлами с учетом эксцентриситета крепления решетки		12
7	Плоская с жесткими узлами без учета эксцентриситета крепления решетки		15
8	Плоская с шарнирными узлами без учета эксцентриситета крепления решетки	42,57	16

Окончание табл. 1

Но- мер типа РС	Тип расчетной схемы (РС)	Макси- мальный прогиб, мм	Измене- ние макси- мального прогиба, %
9	Пространственная с шарнирным креплением стержневой решетки и пластинчатым ездовым поясом с ребрами жесткости и фасонка- ми, шаг сетки КЭ 0,5 м (рис. 6 <i>a</i>)	126,99	72
10	Пространственная с шарнирным креплением стержневой решетки и пластинчатым ездовым поясом с ребрами жесткости и фасонка- ми, шаг сетки КЭ 0,25 м	158	77
11	Пространственная без ребер жесткости и фасонок		80
12	Пространственная с шарнирным креплением стержневой решетки и пластинчатым ездовым поясом без ребер жесткости и фасонок		82
13	Пластинчатый ездовой пояс без ребер жесткости и фасонок	214,95	83
14	Плоская балка пролетом 36 м	384,22	91

Рис. 6. Расчетные схемы ППФ

Результаты анализа влияния на линейную податливость ездового пояса в плоскости и из плоскости ППФ соотношений жесткостей элементов решетки и ППФ приведены на рис. 1, 3, 4 цв. вклейки. Результаты анализа влияния на угловую податливость ездового пояса ППФ соотношений изгибной жесткости решетки и крутильной жесткости ездового пояса приведены в табл. 2 и на рис. 2, 5 цв. вклейки.

Результаты определения погрешностей перемещений и внутренних усилий балки на упругих опорах в сравнении с моделью ППФ приведены на рис. 6 цв. вклейки.

Таблица 2

Результаты анализа влияния на угловую податливость ездового пояса ППФ соотношений изгибной жесткости решетки и крутильной жесткости ездового пояса

CJOBOLO HONCA								
Соотношение жесткостей решетки и ез- дового пояса <i>Elz/GI</i> кр	Угол поворота узла ездового пояса ППФ, рад*10-5	Угол пово- рота узла эквивалент- ной балки, рад*10 ⁻⁵	Соотношение жесткостей решетки и ез- дового пояса <i>EIz/GI</i> кр	Угол поворота узла ездового пояса ППФ, рад*10 ⁻⁵	Угол пово- рота узла эквивалент- ной балки, рад*10 ⁻⁵			
ППФ № 1			ППФ № 2					
0,001	29,18		0,002	53,4				
0,004	10,31		0,007	14,6				
0,013	4,72	5,71	0,020	6	4,01			
0,026	3,05		0,040	4,3				
0,075	1,8		0,065	2,86				
ППФ № 3			ППФ № 4					
0,003	39,1		0,00006	1,73				
0,006	18,12		0,00020	0,38				
0,009	12,2	2,51	0,00068	0,11	0,0057			
0,012	8,5		0,00144	0,06				
0,032	4,2		0,00269	0,03				

Выводы:

1. Плоские расчетные схемы дают более точный результат в сравнении с моделями с пластинчатым поясом и стержневой решеткой. Все плоские схемы с жестким и шарнирным креплением решетки, с учетом и без учета эксцентриситета дают погрешность в пределах 15 %. Наименьшее отклонение 11 % у плоской расчетной схемы с жестким креплением узлов и учетом эксцентриситета крепления решетки.

Модели с пластинчатым ездовым поясом и стержневой решеткой не допустимы в применении, т. к. при жестком креплении элементов решетки работа конструкции уподобляется многопролетной балке, а при шарнирном креплении элементов – однопролетной балке длиной, соответствующей пролету ППФ.

При использовании полностью пространственной расчетной схемы необходимо учитывать подкрепляющие и соединительные элементы, отсутствие их в модели дает погрешность 83 %.

2. Линейная податливость узлов ездового пояса в плоскости ППФ находится в обратно пропорциональной линейной зависимости от соотношения продольной жесткости решетки и изгибной жесткости ездового пояса.

Учет сопротивления элементов решетки при работе ездового пояса из плоскости ППФ снижает в нем уровень напряжений. Линейная податливость узлов ездового пояса из плоскости ППФ находится в обратно пропорциональной линейной зависимости от соотношения изгибной жесткости решетки и изгибной жесткости ездового пояса.

Угловая податливость ездового пояса в большой степени зависит от соотношения изгибной жесткости решетки и крутильной жесткости ездового пояса. Учет элементов решетки в работе пояса на кручение может не только разгрузить, но и увеличить нагрузку на него в зависимости от конфигурации ППФ и соотношения жесткостей элементов решетки и нижнего пояса. При соотношении изгибной жесткости решетки и крутильной жесткости ездового пояса $EF/EIZ < 0,02/m^2$ решетка оказывает значительное отрицательное влияние на сопротивляемость ездового пояса кручению.

3. Простая замена элементов решетки упругими опорами эквивалентной жесткости не обеспечивает необходимую точность решения. С ростом соотношения продольной жесткости решетки и приведенной изгибной жесткости ППФ погрешность в определении прогиба ездового пояса уменьшается, в определении изгибающего момента – увеличивается.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Руководство по проектированию стальных подкрановых конструкций. – Москва : ЦНИИПроектстальконструкция, 1976. – 112 с. – Текст : непосредственный.

2. Лампси, Б. Б. Оценка влияния особенностей конструкции и нагрузки на напряженное состояние и прочность ездовых поясов систем типа подкраново-подстропильных ферм : 05.23.01, 01.02.03 : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Лампси Борис Борисович ; Горьковский ордена трудового красного знамени инженерностроительный институт имени В. П. Чкалова. – Горький, 1983. – 220 с.

3. Особенности эксплуатации металлических конструкций промышленных зданий : монография / К. И. Еремин, А. Н. Шувалов, Г. А. Павлова [и др.] ; под редакцией К. И. Еремина ; Московский государственный строительный университет. – Москва : МИСИ ; МГСУ, 2012. – 248 с. – Текст : непосредственный.

4. Романов, М. В. Напряженно-деформированное состояние опорных частей подкраново-подстропильных ферм : 05.23.01 : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Романов Михаил Викторович. – Магнитогорск, 2002. –166 с. – Текст : непосредственный.

5. Шульга, С. Н. Остаточный ресурс подкраново-подстропильных ферм с неразрезным нижним поясом на стадии роста усталостной трещины : 05.23.01 : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Шульга Степан Николаевич. – Москва, 2015. –133 с. – Текст : непосредственный.

6. СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*. – Москва : Минстрой России, 2016. – 80 с. – Текст : непосредственный.

LAMPSI Boris Borisovich¹, candidate of technical sciences, associate professor, holder of the chair of theory of structures and technical mechanics; KHAZOV Pavel Alekseevich¹, candidate of technical sciences, associate professor of the chair of theory of structures and technical mechanics; MARKINA Yulia Dmitrievna¹, assistant of the chair of theory of structures and technical mechanics; BRIKKEL Dmitry Maksimovich², postgraduate student

THE EFFECT OF THE RIGIDITY OF THE GRID ELEMENTS ON THE PLIABILITY OF THE CRANE-SUB-TRUSS RIDING BELT (PPF)

¹Nizhnv Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering 65, Iljinskaya St., Nizhny Novgorod, 603950, Russia. Tel.: +7 (831) 430-54-96; e-mail: tstm@nngasu.ru, lampsi@yandex.ru, khazov.nngasu@mail.ru, poluektoff@bk.ru ²Institute of Mechanical Engineering Problems of the Russian Academy of Sciences 85, Belinsky St., Nizhny Novgorod, 603024, Russia. Tel.: +7 (831) 432-05-76; e-mail: Archive.94@mail.ru Key words: crane-sub-truss (PPF), elastic supports, angular compliance, linear compliance, stiffness, riding belt, stiffness of elastic supports.

The article present the results of the analysis of the influence of the ratio of the stiffness of the lattice elements and the PPF on the angular and linear compliance of the PPF riding belt. The error of displacements and internal forces of the beam on elastic supports is determined in comparison with the PPF riding belt, depending on the rigidity of the lattice under the action of a load in the plane of the truss.

REFERENCES

1. Rukovodstvo po proektirovaniyu stalnykh podkranovykh konstruktsiy [Guidelines for the design of steel crane structures]. Moscow : TsNIIProektstalkonstruktsiya. 1976. – 112 p.

2. Lampsi B. B. Otsenka vliyaniya osobennostey konstruktsii i nagruzki na napryazhyonnoe sostoyanie i prochnost ezdovykh poyasov sistem tipa podkranovo-podstropilnykh ferm [Assessment of the influence of design features and load on the stress state and strength of the riding belts of the systems such as crane-sub-trusses]: 05.23.01. 01.02.03 : dis. ... kand. tekh. nauk / Gorkov. ordena trudovogo krasnogo znameni inzhenerno-stroit. institut im. V.P. Chkalova. Gorky, 1983. – 220 p.

3. Eryomin K. I., Shuvalov A. N., Pavlova G. A., et al. Osobennosti ekspluatatsii metallicheskikh konstruktsiy promyshlennykh zdaniy [Features of operation of metal structures of industrial buildings]: monografiya / pod red. K. I. Eryomina; Moskov. gos. stroit. un-t. – Moscow: MISI – MGSU, 2012. – 248 p. – (Biblioteka nauchnykh razrabotok i proektov MGSU). – ISBN 978-5-7264-0651-0.

4. Romanov M. V. Napryazhyonno-deformirovannoe sostoyanie opornykh chastey podkranovo-podstropilnykh ferm [The stress-strain state of the supporting parts of crane-sub-trusses]: 05.23.01 : dis. ... kand. tekh. nauk. – Magnitogorsk. 2002. – 166 p.

5. Shulga S. N. Ostatochny resurs podkranovo-podstropilnykh ferm s nerazreznym nizhnim poyasom na stadii rosta ustalostnoy treschiny [Residual resource of crane-sub-trusses with an uncut lower belt at the stage of fatigue crack growth]: 05.23.01: dis. ... kand. tekh. nauk. – Moscow, 2015. - 133 p.

6. SP 20.13330.2016 Nagruzki i vozdeystviya [Nagruzki i vozdeystviya]. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.01.07-85*. – Moscow: Minstroy Rossii, 2016. – 80 p.

© Б. Б. Лампси, П. А. Хазов, Ю. Д. Маркина, Д. М. Бриккель, 2022 Получено: 30.03.2022 г.