

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ НИЖНЕГО ПОЯСА ПОДКРАНОВО-ПОДСТРОПИЛЬНОЙ ФЕРМЫ ПРИ СТЕСНЕННОМ КРУЧЕНИИ

THE STRESSED STATE OF THE LOWER CHORD OF THE CRANE SECONDARY TRUSS WITH CONSTRAINED TORSION

В соответствии с рекомендациями по расчету подкраново-подстропильной фермы при кручении усилия в нижнем поясе определяются как в однопролетной балке. Включение элементов решетки в работу фермы не учитывается. Цель исследования — корректировка метода предварительного расчета нижнего пояса при кручении. Приведены недостатки действующего метода определения внутренних усилий в нижнем поясе фермы, предложены методы их определения с учетом подкрепляющего воздействия элементов решетки. Проведено сравнение усилий и напряжений, полученных аналитическими расчетами, численными исследованиями и натурным обследованием. Даны рекомендации по предварительному и поверочному расчету подкраново-подстропильной фермы.

Ключевые слова: расчетная схема, замкнутое сечение, упругая опора.

In accordance with the recommendations for the design of crane secondary trusses, torsion forces in the lower chord are determined as in a single-span beam. The inclusion of web elements in the truss is not taken into consideration. The purpose of the study is improvement of the method for preliminary calculation of the lower chord during torsion. The disadvantages of the current method of determining internal forces in the lower chord of the truss are given. Methods for determining the forces taking into consideration the reinforcing effect of the truss web elements are proposed. The forces and stresses obtained by analytical calculations, numerical studies and in-situ inspection are compared. Recommendations for the preliminary and verification calculation of the crane secondary truss are given.

Keywords: design scheme, closed section, elastic support.

Введение

Подкраново-подстропильная ферма (ППФ) выполняет функции подкрановой системы и поддерживает конструкции покрытия. Пояс, по которому перемещается кран, должен равноценно работать на стесненное кручение, вертикальный и горизонтальный изгиб [1]. Отдельно от остальной конструкции нижний пояс представляет собой призматическую складчатую систему, исследованию работы которой на основе теории тонкостенных стержней посвящены труды В. З. Власова, А. А. Уманского, Б. Б. Лампси и др. [2–4]. Методы анализа напряженно-деформированного состояния тонкостен-

ных стержней замкнутого профиля приведены в статьях [5–10]. Работа замкнутого профиля на кручение с учетом сдвиговых деформаций рассмотрена в статьях [11, 12].

Накопленные результаты наблюдений за техническим состоянием ППФ позволяют судить об эффективности принятых при проектировании инженерных решений. Выявленные повреждения и дефекты свидетельствуют о том, что особенности работы нижнего пояса не в полной мере учтены при расчете [13, 14]. В соответствии с рекомендациями по расчету ППФ¹ при кручении

¹ Руководство по проектированию стальных подкрановых конструкций. М.: ЦНИИпроектстальконструкция, 1976. 112 с.

усилия в нижнем поясе следует определять как в однопролетной балке, сечением эквивалентной поясу. Пролет балки принимается равным пролету ППФ, включение элементов решетки в работу ППФ на кручение не учитывается. Недостатки используемого метода расчета отмечены в работах [15, 16].

В данной статье предложены методы определения внутренних усилий в нижнем поясе ППФ с учетом подкрепляющего воздействия элементов решетки, проведено сравнение усилий и напряжений, полученных аналитическими расчетами, численными экспериментами и натурным обследованием, результаты которого опубликованы в монографии [14].

Методы

Для исследования выбрана ППФ конвертерного отделения кислородно-конвертерного цеха Магнитогорского металлургического комбината. Основной каркас собран по чертежам шифра 3-Ф1535.02 КМ1 ЦНИИпроектстальконструкции. Конструк-

ции каркаса изготовлены на Челябинском заводе металлоконструкций и собраны трестом «Уралстальконструкция». В конвертерном отделении установлен мостовой кран грузоподъемностью $Q = 450/100/20$ т, вес крана 615 т, режим работы 7К. Пролет ППФ составляет 36 м. Стойки и раскосы выполнены из сварных двутавров. В узлах сопряжения элементы ППФ соединяются при помощи высокопрочных болтов. Нижний пояс — балка коробчатого несимметричного сечения с консольными выступами (рис. 1).

Цель работы — корректировка метода предварительного расчета нижнего пояса ППФ на кручение. Для выявления наиболее точного аналитического метода усилия и напряжения в нижнем поясе определялись следующими методами:

1. Аналитическим в соответствии с рекомендациями¹ (рис. 2).
2. Аналитическим с определением внутренних усилий в нижнем поясе как в балке на угловых упругих опорах, имитирующих

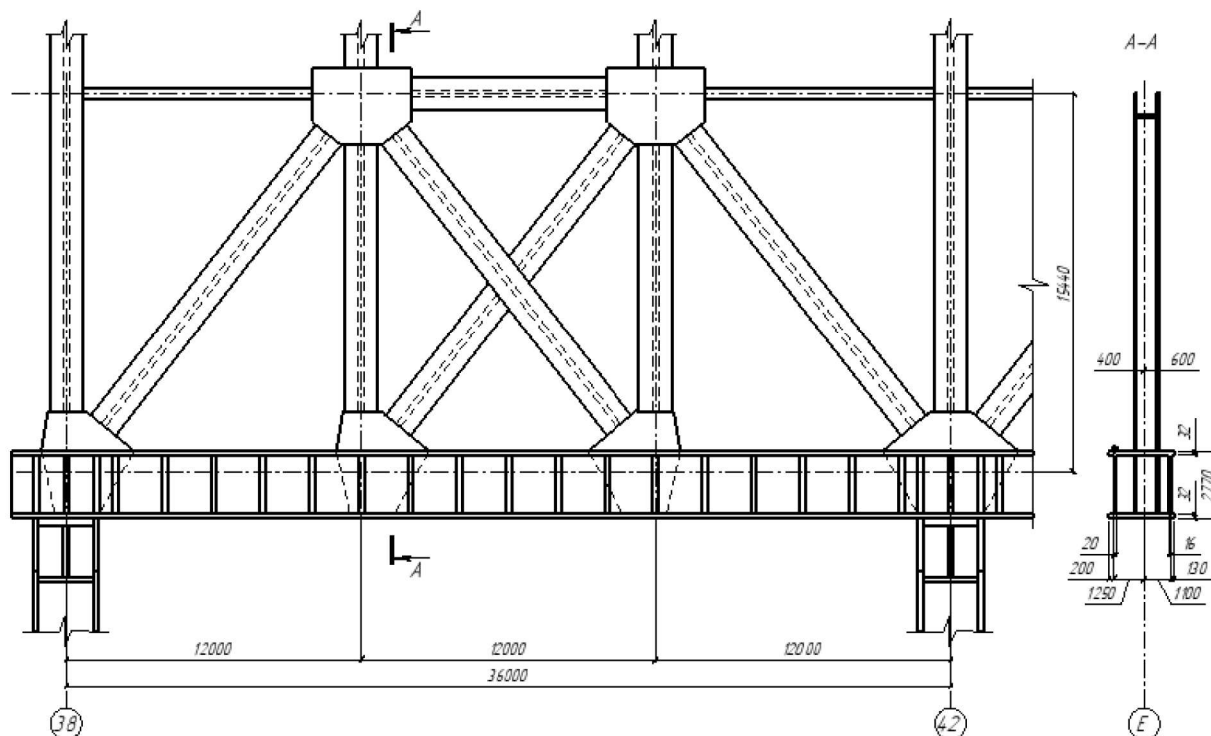


Рис. 1. ППФ пролетом 36 м, высотой 15,44 м

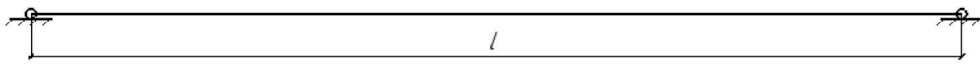


Рис. 2. Расчетная схема нижнего пояса для расчета по методу № 1 (l — пролет ППФ)

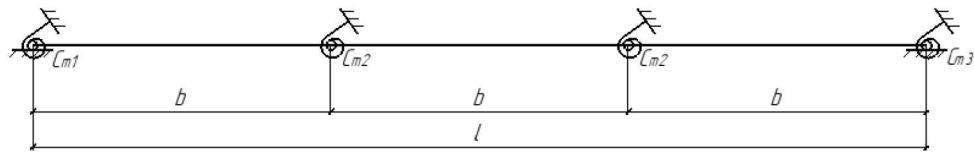


Рис. 3. Расчетная схема нижнего пояса для расчета по методу № 2 (b — длина панели ППФ)

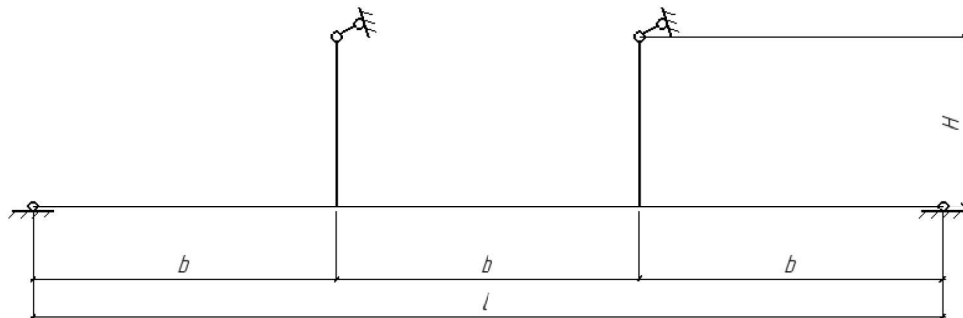


Рис. 4. Расчетная схема нижнего пояса для расчета по методу № 3

работу элементов решетки (рис. 3). Жесткость упругих опор определяется по формуле

$$C_{mi} = 4EI_{пр,yi} / H, \quad (1)$$

где H — высота ППФ по осям пояса; $I_{пр,yi}$ — приведенный момент инерции элементов решетки, определяемый как сумма проекций моментов инерции всех элементов решетки, сходящихся в i -м узле, на вертикальную ось:

$$I_{пр,yi} = \sum_{j=1}^{ki} I_{yj} \sin^2 \alpha_j, \quad (2)$$

где α_j — угол наклона j -го элемента решетки к вертикальной оси.

3. Аналитическим с определением внутренних усилий как в раме, стойки которой по жесткости эквивалентны решетке (рис. 4). Момент инерции вертикальных элементов рамы определяется по формуле (2).

4. Численным с использованием стержневой плоской расчетной схемы (РС) с учетом эксцентриситета крепления решетки [17] (рис. 5).

5. Численным с использованием стержневой плоской РС двух пролетов ППФ (рис. 6).

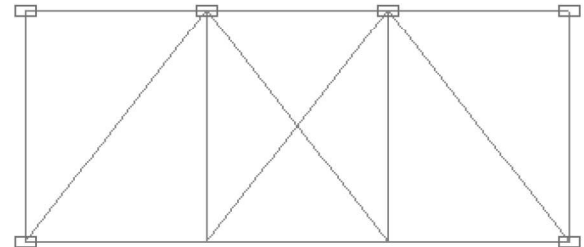


Рис. 5. Расчетная схема нижнего пояса для расчета по методу № 4

6. Численным с использованием пространственной РС из пластинчатых конечных элементов (рис. 7). Подкрепляющие элементы нижнего пояса и конструктивные решения узлов учтены в РС. Тип конечных элементов — 44, размер (для нижнего пояса) — 0,2 м [18]. В узлах опирания стропильных ферм на верхний пояс установлены связи, противодействующие смещению по направлению оси Y , в нижних узлах колонны — связи, противодействующие смещению и повороту по всем направлениям.

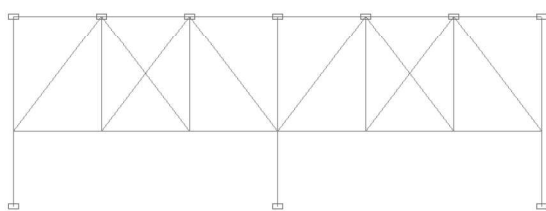


Рис. 6. Расчетная схема нижнего пояса для расчета по методу № 5

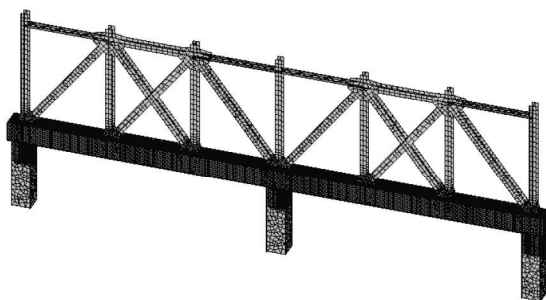


Рис. 7. Расчетная схема нижнего пояса для расчета по методу № 6

Расчеты выполнены на нагрузку от одного крана, расположенного в середине пролета с грузом 396 т. Приближение грузовой тележки — 2 м.

Геометрические характеристики сечения нижнего пояса определены по единой теории тонкостенных стержней [19].

Все численные расчеты произведены в ПК SCAD.

Результаты

Результаты вычисления внутренних усилий сведены в табл. 1, напряжений — в табл. 2 и на рис. 9. Сравнение результатов численного расчета с результатами натурного обследования сведено в табл. 3 и показано на рис. 11.

Обсуждение

В соответствии с рекомендациями¹ при расчете на изгиб в плоскости ППФ считается внешне и внутренне статически определимой. Для этого нижний пояс принимается

Таблица 1

Результаты вычисления внутренних усилий

Усилие	№ метода вычисления				
	1	2	3	4	5
M_K , тм	-768	8	9,37	8,39	17,43
M_Z , тм	0	0	407	491	250
Q_Y , т	0	0	0,18	0,39	3,41
N^* , т	208				
M_Y^* , тм	1047				
Q_Z^* , т	-1,83				

Примечание: усилия с * определены по методу № 5.

Таблица 2

Результаты вычисления напряжений

Точка определения напряжения (рис. 8)	№ метода вычисления					
	1	2	3	4	5	6
	σ_e , кгс/см ²					
1	1018	444	812	888	670	592...630
2	920	101	267	345	128	102...117
3	1121	646	290	216	428	352...401
4	1225	444	25	76	186	192...212
5	1147	101	530	620	366	335...356
6	1311	646	1076	1165	911	853...887
7	451	450	929	1128	744	556...578
8	744	450	418	412	431	305...334
9	451	450	64	167	142	176...195
10	653	652	173	74	358	350...367
11	881	652	684	690	672	505...532
12	653	652	1154	1257	960	789...801

разрезным на опорах и в узлах примыкания решетки, что приводит к искажению результатов. Данная работа посвящена исследованию кручения пояса; для исключения влияния прочих факторов для методов № 1–5 усилия M_y , N и Q_z определялись по методу № 5 (см. табл. 1).

Точность определения внутренних усилий снижается с каждым шагом упрощения метода расчета и РС. Коробчатый пояс, по которому перемещается кран, выполняется нераз-

резным, это позволяет придать ему большую жесткость и обеспечить плавность его оси при деформациях. Для упрощения расчета пояс считается разрезным на опорах. При переходе от метода № 5 к методу № 4, т. е. от неразрезного пояса к разрезному, результаты определения M_K и Q_y снижаются более чем в два раза, M_z возрастает почти в два раза.

При переходе от метода № 4 к методу № 3 точность определения усилий понижается в меньшей степени: M_K возрастает на 10 %, Q_y снижается на 53 %, M_z снижается на 17 %. Расчетная схема рамы, стойки которой по жесткости эквивалентны решетке, два раза внешне статически неопределима и пригодна для аналитического расчета. При кручении нижний пояс испытывает горизонтальный изгиб, его упругая ось превращается

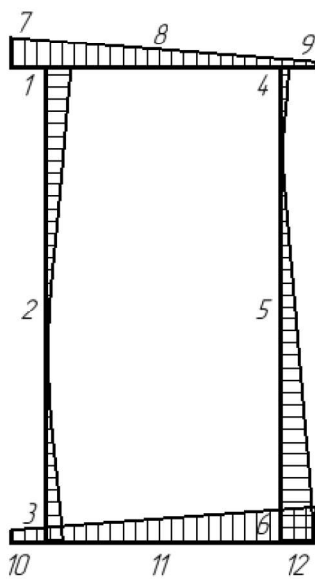


Рис. 8. К результатам вычисления напряжений

Таблица 3
Результаты определения напряжений
в узле «42-Е» (см. рис. 1)

Точка определения напряжения (рис. 10)	σ_e , кгс/см ²	
	Натурное обследование	Численный расчет
1	169	265...334
2	854	815...1004
3	1075	976...1140
4	1190	906...1016

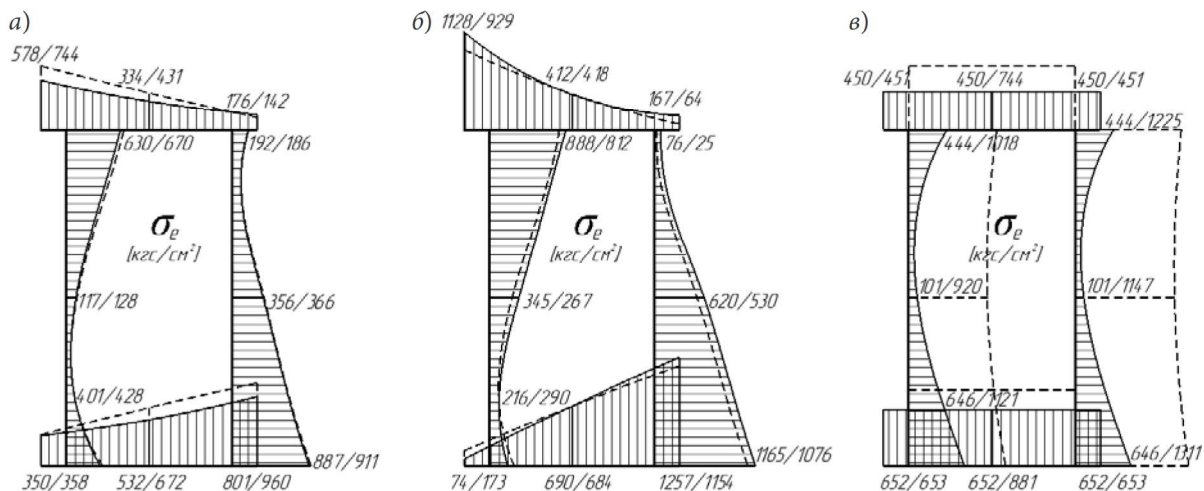


Рис. 9. Эпюры эквивалентных напряжений в нижнем поясе ППФ: а — метод № 6 / № 5; б — метод № 4 / № 3; в — метод № 2 / № 1

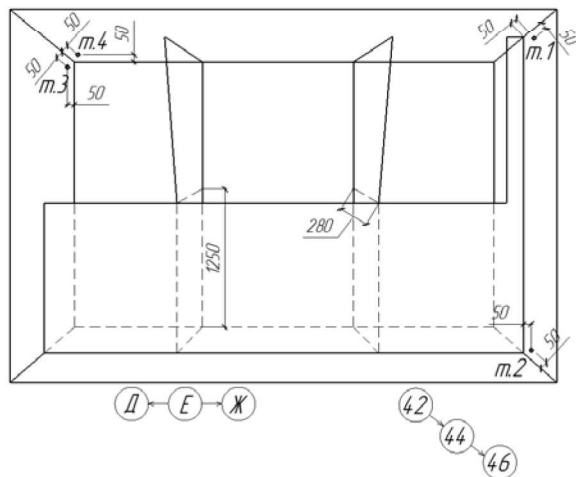


Рис. 10. Схема привязки точек определения напряжений в узле «42-Е» ППФ ККЦ ММК (см. рис. 1)

в кривую с различными знаками кривизны на разных участках, а следовательно, с различными углами закручивания (рис. 12). Метод № 3, в отличие от других рассмотренных аналитических методов № 1 и 2, позволяет учесть это и получить значения изгибающих моментов из плоскости ППФ в нижнем поясе и элементах решетки.

Метод № 2, рассматривающий пояс как неразрезную балку на упруго поворачивающихся опорах, имеет наименьшее расхождение с методом № 4 в определении M_K — 5 %, но не позволяет получить усилия M_Z и Q_Y , вызываемые горизонтальным изгибом пояса, сопровождающим его закручивание. Усилия, полученные методом № 1, значительно разнятся с результатами других методов. Это вызвано тем, что РС балки не соответствует работе пояса при кручении. Сечение балки поворачивается вокруг нейтральной оси без смещения, сечение пояса поворачивается и смещается относительно нейтральной оси, вызывая дополнительный поворот сечения пояса.

Результаты аналитического определения напряжений методом № 5 в большинстве точек выше результатов численного эксперимента № 6, но сопоставимы с ними, формы эпюр идентичны. Точность определения на-

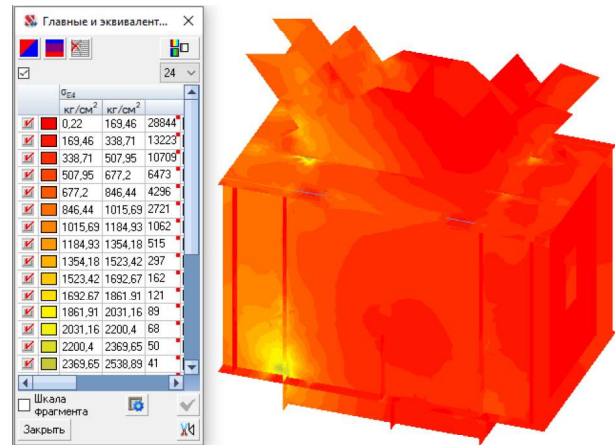


Рис. 11. Поля напряжений σ_x в узле «42-Е» ППФ ККЦ ММК

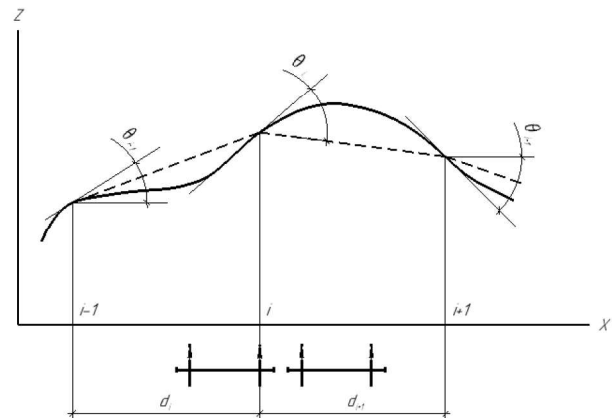


Рис. 12. Общая схема деформаций ездового пояса вблизи узла i (d_i — длина i -й панели; θ_i — угол поворота узла i в горизонтальной плоскости)

пряжений снижается с упрощением метода расчета в меньшей степени, чем точность определения внутренних усилий. Это связано с тем, что больший вклад в картину напряжений вносят усилия, вызванные вертикальным изгибом нижнего пояса, определяемые для методов № 1–5 по методу № 5. Эпюры напряжений, полученные методами № 1 и 2, имеют искаженную форму относительно результатов численного исследования № 6.

Результаты натурного обследования напряженно-деформированного состояния, полученные методом тензометрии [14], сопоставимы с результатами численного эксперимента.

Выводы

Из рассмотренных аналитических методов определения внутренних усилий в ездовом поясе при кручении наиболее применимым для предварительного расчета является метод № 3. Он позволяет значительно уменьшить погрешность в определении напряжений относительно результатов численного эксперимента № 6 в сравнении с принятым методом расчета № 1.

Выполнить точный расчет ППФ аналитическим методом не представляется возможным в связи со сложностью конструкции и особенностями ее функционирования [15–18]. Поверочный анализ ППФ следует проводить численным методом конечных элементов с применением пластинчатых элементов. Рекомендуются выполнять расчет ППФ в составе полного каркаса или части сооружения [18].

Библиографический список

1. Бриккель Д. М. Анализ НДС подкраново-подстропильной фермы (ППФ) на стадии роста усталостной трещины // Наука сегодня: задачи и пути их решения: материалы междунар. науч.-практ. конф. Вологда, 31 мая 2017 г. Вологда: Маркер, 2017. С. 10–11.
2. Власов В. З. Тонкостенные упругие стержни. М.: Физматгиз, 1959. 568 с.
3. Уманский А. А. Кручение и изгиб тонкостенных авиаконструкций. М.; Л.: Оборонгиз, 1939. 109 с.
4. Лампси Б. Б. Прочность тонкостенных металлических конструкций. М.: Стройиздат, 1987. 278 с.
5. Doostfateme A., Hematiyan M. R., Arghavan S. Closed-form approximate formulas for torsional analysis of hollow tubes with straight and circular edges // Journal of Mechanics. 2009. Vol. 25, no. 4. Pp. 401–409.
6. Srinivasan V., Purushothaman T., Chatterjee S. Stress analysis of thin-walled circular and rectangular tubes subjected to torsion // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 2017. Vol. 8, no. 8. Pp. 1580–1587.
7. Omidvari A., Hematiyan M. R. Approximate closed-form formulae for buckling analysis of rectangular tubes under torsion // International Journal of Engineering. 2015. Vol. 28, no. 8. Pp. 1226–1232.
8. Chiskis A., Parnes R. On torsion of closed thin-wall members with arbitrary stress-strain laws: a general criterion for cross sections exhibiting no warping // Journal of Applied Mechanics. 2000. Vol. 67, no. 3. Pp. 460–464.

9. Li L-Y., Easterbrook D. Free torsion of thin-walled structural members of open- and closed-sections // Applied Mathematics and Mechanics. 2014. Vol. 35, no. 1. Pp. 25–32.

10. Musat S. D., Epureanu B. I. Study of warping torsion of thin-walled beams with closed cross-section using macro-elements // Communications in Numerical Methods in Engineering. 1996. Vol. 12, no. 12. Pp. 873–884.

11. Mentrasti L. Torsion of closed cross-section thin-walled beams: the influence of shearing strain // Thin-Walled Structures. 1987. Vol. 5, no. 4. Pp. 277–305.

12. Mentrasti L. Distortion (and torsion) of rectangular thin-walled beams // Thin-Walled Structures. 1990. Vol. 10, no. 3. Pp. 175–193.

13. Туснина О. А., Такки В. Ф., Егоров И. Ф. Опыт замены нижнего пояса находящейся под нагрузкой подкраново-подстропильной фермы // Промышленное и гражданское строительство. 2023. № 4. С. 21–28. DOI 10.33622/0869-7019.2023.04.21-28.

14. Еремин К. И. Предотвращение разрушений строительных металлических конструкций. Магнитогорск: МГТУ им. Г. И. Носова, 2004. 235 с.

15. Лампси Б. Б. Расчет подкраново-подстропильных ферм. Горький: ГГУ, 1978. 52 с.

16. Лампси Б. Б., Маркина Ю. Д., Хазов П. А. Влияние высоты подкраново-подстропильной фермы (ППФ) на податливость ездового пояса // Приволжский научный журнал. 2023. № 1. С. 28–34.

17. Лампси Б. Б., Хазов П. А., Маркина Ю. Д., Бриккель Д. М. Влияние жесткости элементов решетки на податливость ездового пояса подкраново-подстропильной фермы (ППФ) // Приволжский научный журнал. 2022. № 2 (62). С. 29–36.

18. Tushnina O. A. Finite element analysis of crane secondary truss // Инженерно-строительный журнал. 2018. № 1 (77). С. 68–89. DOI 10.18720/MCE.77.7.

19. Бейлин Е. А. Вариант единой теории кручения тонкостенных стержней открытого, замкнутого и частично замкнутого профилей // Исследования по механике строительных конструкций и материалов: межвуз. темат. сб. тр. Л.: ЛИСИ, 1991. С. 57–74.

References

1. Brikkel' D. M. Analiz NDS podkranovo-podstropil'noy fermy (PPF) na stadii rosta ustalostnoy treshchiny [Analysis of the SSS of crane secondary truss (CST) at the stage of fatigue crack growth]. Trudy mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Vologda, 31 maya 2017 g. «Nauka segodnya: zadachi i puti ikh resheniya» [Proceedings of the Int. sci. conf. Vologda, 31 May 2017 "Science today: tasks and ways of their solution"]. Vologda, Marker Publ., 2017, pp. 10–11.

2. Vlasov V. Z. *Tonkostennyye uprugie sterzhni* [Thin-walled elastic rods]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1959, 568 p.
3. Umanskiy A. A. *Kruchenie i izgib tonkostennykh aviakonstruktsiy* [Torsion and bending of thin-walled aircraft structures]. Moscow; Leningrad, Oborongiz Publ., 1939, 109 p.
4. Lamps B. B. *Prochnost' tonkostennykh metallicheskih konstruktsiy* [Strength of thin-walled metal structures]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1987, 278 p.
5. Doostfatemeh A., Hematiyan M. R., Arghavan S. Closed-form approximate formulas for torsion analysis of hollow tubes with straight and circular edges. *Journal of Mechanics*, 2009, vol. 25, no. 4, pp. 401–409.
6. Srinivasan V., Purushothaman T., Chatterjee S. Stress analysis of thin-walled circular and rectangular tubes subjected to torsion. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 2017, vol. 8, no. 8, pp. 1580–1587.
7. Omidvari A., Hematiyan M. R. Approximate closed-form formulae for buckling analysis of rectangular tubes under torsion. *International Journal of Engineering*, 2015, vol. 28, no. 8, pp. 1226–1232.
8. Chiskis A., Parnes R. On torsion of closed thin-wall members with arbitrary stress-strain laws: a general criterion for cross sections exhibiting no warping. *Journal of Applied Mechanics*, 2000, vol. 67, no. 3, pp. 460–464.
9. Li L-Y., Easterbrook D. Free torsion of thin-walled structural members of open- and closed-sections. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2014, vol. 35, no. 1, pp. 25–32.
10. Musat S. D., Epureanu B. I. Study of warping torsion of thin-walled beams with closed cross-section using macro-elements. *Communications in Numerical Methods in Engineering*, 1996, vol. 12, no. 12, pp. 873–884.
11. Mentrasti L. Torsion of closed cross-section thin-walled beams: the influence of shearing strain. *Thin-Walled Structures*, 1987, vol. 5, no. 4, pp. 277–305.
12. Mentrasti L. Distortion (and torsion) of rectangular thin-walled beams. *Thin-Walled Structures*, 1990, vol. 10, no. 3, pp. 175–193.
13. Tusnina O. A., Takki V. F., Egorov I. F. *Opyt zameny nizhnego poyasa nakhodyashchey pod nagruzkoy podkranovo-podstropil'noy fermy* [Experience of replacement of the bottom chord of a crane-substructure truss under load]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo – Industrial and Civil Engineering*, 2023, no. 4, pp. 21–28. DOI 10.33622/0869-7019.2023.04.21-28.
14. Eremin K. I. *Predotvrashchenie razrusheniy stroitel'nykh metallicheskih konstruktsiy* [Prevention of the fracture of building metal structures]. Magnitogorsk, MGTO im. G. I. Nosova Publ., 2004, 235 p.
15. Lamps B. B. *Raschet podkranovo-podstropil'nykh ferm* [Calculation of crane secondary trusses]. Gor'kiy, GGU Publ., 1978, 52 p.
16. Lamps B. B., Markina Yu. D., Khazov P. A. *Vliyaniye vysoty podkranovo-podstropil'noy fermy (PPF) na podatlivost' ezdogogo poyasa* [Influence of the height of a crane truss on the pliability of a riding belt]. *Privolzhskiy nauchniy zhurnal – Volga Region Scientific Journal*, 2023, no. 1, pp. 28–34.
17. Lamps B. B., Khazov P. A., Markina Yu. D., Brikkel' D. M. *Vliyaniye zhestkosti elementov reshetki na podatlivost' ezdogogo poyasa podkranovo-podstropil'noy fermy (PPF)* [Impact of stiffness of lattice elements on pliability of a travelling belt of a crane-post truss (CPT)]. *Privolzhskiy nauchniy zhurnal – Volga Region Scientific Journal*, 2022, no. 2 (62), pp. 29–36.
18. Tusnina O. A. Finite element analysis of crane secondary truss. *Inzhenerno-stroitel'niy zhurnal – Engineering and Construction Journal*, 2018, no. 1 (77), pp. 68–89. DOI 10.18720/MCE.77.7.
19. Beylin E. A. *Variants edinoi teorii krucheniya tonkostennykh sterzhney otkrytogo, zamknutogo i chastichno zamknutogo profilya* [Variant of the unified theory of torsion of thin-walled rods of open, closed and partially closed profiles]. *Mezhvuz. temat. sb. tr. «Issledovaniya po mekhanike stroitel'nykh konstruktsiy i materialov»* [Coll. of inter-higher school conf. sci. articles "Investigations on mechanics of building structures and materials"]. Leningrad, LISI Publ., 1991, pp. 57–74.