
ПРОМЫШЛЕННОЕ И ГРАЖДАНСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО И ЭКОНОМИКА

DOI 10.15826/rjcsst.2023.1.001

УДК 69.07

*О. С. Бурухина*¹, *М. Ю. Ананьин*²

^{1,2} Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, Россия

e-mail: ¹olgaburuhina@mail.ru, ²m.y.ananin@urfu.ru

Влияние раскладки профилированного настила на прогонах на перераспределение усилий в фермах

Аннотация. Статья посвящена анализу влияния расположения профилированного настила с учетом его неразрезной работы на перераспределение усилий в фермах. В качестве объекта исследования приняты фермы типа «Молодечно» пролетом 30 м из гнутосварных профилей коробчатого сечения. В зависимости от конфигурации кровли сформированы 7 расчетных случаев. В каждом случае сначала производится подбор сечений элементов фермы без учета работы профилированного листа, а затем – проверка с учетом расположения профилированного настила на прогонах. Выполнено сравнение результатов численных экспериментов, в частности узловые нагрузки и коэффициенты использования сечений. Приведенные данные обосновывают вывод о необходимости учета работы профилированного настила при расчете элементов покрытия.

Ключевые слова: стальная ферма, проектирование стальных ферм, профилированный настил, кровля по стальному настилу, метод конечных элементов.

*O. S. Burukhina*¹, *M. Yu. Ananin*²

^{1,2} Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

e-mail: ¹olgaburuhina@mail.ru, ²m.y.ananin@urfu.ru

The influence of profiled sheeting layout on purlin on redistribution of truss elements forces

Abstract. The article is devoted to the analysis of the influence of profiled sheeting layout, taking into account its continuous behaviour on redistribution of truss elements forces. Trusses of the Molodechno type with a span of 30 m from bent-welded box-section profiles were taken as an object of study. Depending on the roof configuration, 7 design cases were formed. In each case, the sections of the truss elements are first selected without taking into account the operation of the profiled sheet, and then a check is made taking into account the location of the profiled sheeting on the purlin. Comparison of numerical experiments' results, in particular nodal loads and section utilization factors, was performed. The above mention data allow to conclude necessity of taking into account the operation of profiled sheeting when calculating the elements of the coating.

Key words: steel truss, steel truss design, profiled sheeting, roofing over steel sheeting, finite element method.

1. Введение

Покрытия зданий представляют собой конструкции, состоящие из несущих и ограждающих элементов, по которым сверху устраиваются тепло- и гидроизоляционные слои кровли. В качестве несущих конструкций покрытия в каркасах зданий различного назначения при больших пролетах обычно применяются фермы [1-6]. С течением времени и развитием научно-технического прогресса повышается точность, комплексность и вариативность расчета, совершенствуются расчетные комплексы, накапливается опыт проектирования и эксплуатации конструкций, повышается их надежность, функциональность, экономичность. При этом, как и для любых других конструкций, в целях обеспечения всех вышеперечисленных показателей при проектировании ферм большое значение имеет качество расчетной модели и ее соответствие действительным условиям работы конструкций [7-9].

В настоящий момент совместно с металлическими стропильными конструкциями промышленных зданий наиболее часто применяются пироги покрытия с основанием из профилированного настила (по прогонам или без них) либо из ребристых железобетонных плит. Во всех этих случаях нагрузка передается в узлы фермы, что соответствует рациональной схеме работы ферм и расчетным предпосылкам [7-8]. При этом ширина грузовой площади для узлов фермы принимается равной шагу узлов фермы по верхнему поясу, и из внимания упускаются особенности характера работы конструкций покрытия по разрезной (с применением крупнопанельных плит или профилированного листа по прогонам) или неразрезной схеме (с применением профилированного листа).

В рамках данной работы авторами с целью повышения надежности и эффективности применения стальных конструкций была поставлена задача ис-

следования влияния реальной работы профилированного листа, входящего в состав пирога покрытия, на распределение усилий в элементах фермы с учетом его неразрезности. При этом была выдвинута гипотеза, что схема раскладки профилированного листа в значительной мере влияет на перераспределение усилий в элементах ферм. Авторами статьи была поставлена задача выяснить величину этого влияния. Для этого были проведены численные исследования ферм с различной схемой опирания профилированного листа на прогоны.

2. Исследование

В современной нормативной, научно-технической литературе и в практике проектирования и строительства принято учитывать в расчете стальных ферм равномерно распределенную нагрузку от собственного веса пирога покрытия и равномерно или неравномерно распределенную нагрузку от веса снегового покрова [1, 9-17]. При этом расчет стального профилированного листа требуется производить с учетом схемы его опирания на нижележащие конструкции. Однако результаты теоретических и экспериментальных исследований по вопросам влияния раскладки профнастила на перераспределение усилий в фермах, а также рекомендации по его учету авторами не выявлены.

Объектом исследования является ферма типа «Молодечно» пролетом 30 м из гнutosварных профилей коробчатого (прямоугольного и квадратного) сечения с опиранием прогонов по верхнему поясу. Общий вид фермы представлен на рис. 1. Сечения элементов фермы приняты из квадратных и прямоугольных гнutosварных труб, элементы решетки жестко крепятся к поясам, при конструировании и расчете фермы учитывается расцентровка элементов решетки; пояса фермы неразрезные. В соответствии с типовым решением принимается, что крайний прогон опирается на надколонник, соответственно,

нагрузка от него не принимается в расчет.

В рамках данной работы исследованы особенности работы ферм в зависимости от конфигурации кровли. Всего рассмотрено 7 расчетных схем кровли, соответствующие схемы загрузки приведены в табл. 1. Схемы 1 и 2 – кровля выполняется с карнизом выносом 600 и 800 мм; схемы 3-6 – кровля выполняется с парапетом высотой 600, 800, 1000, 1200 мм; схема 7 – кровля выполняется с перепадом высоты 2000 мм от соседнего пролета.

Принимаем, что кровля здания неэксплуатируемая традиционного типа по стальному профилированному листу с битумно-полимерным кровельным ковром. Тогда общая расчетная нагрузка от собственного веса пирога покрытия составляет 0,5 кПа, расчетная снеговая нагрузка на 1 м² горизонтальной поверхности составляет 2,1 кПа. Шаг ферм составляет 6 м. В схемах 1-3 в расчет принимается только равномерно распределенная постоянная и снеговая нагрузка. Неравномерность распределения снеговой нагрузки («снеговой мешок») учитывается только в схемах 4-7 согласно [18]. В соответствии с [18] в схемах 4-6 влияние парапета на характер повышенных снеговых нагрузок необходимо учитывать как для покрытия с парапетом, так и для покрытия с перепадом высот и при-

нимать в расчет наиболее неблагоприятную схему.

Наиболее распространенные схемы расположения профилированных настилов на опорах – однопролетная, двухпролетная, трехпролетная. При этом следует учитывать как несущую способность профнастила, которая повышается с увеличением степени статической неопределимости, так и длину профилей в соответствии с условиями их изготовления, транспортировки и монтажа. Схемы расположения профнастила на прогонах в рассматриваемом примере приведены на рис. 2. Схемы отличаются разными сочетаниями расположения врезных и примыкающих шарниров.

Для проверки выдвинутой гипотезы проведен расчет нагрузок, прикладываемых в узлы фермы (см. рис. 3), в зависимости от раскладки профнастила. Результаты расчета приведены в табл. 2. Затем произведен подбор сечений всех элементов с высокой степенью унификации при шарнирном опирании профнастила (см. рис. 2а) в программном комплексе Лира САПР. Результаты подбора сечений по группам элементов представлены в табл. 3. Далее проведена проверка фермы с подобранными сечениями на действие нагрузок от неразрезного расположения профнастила на прогонах.

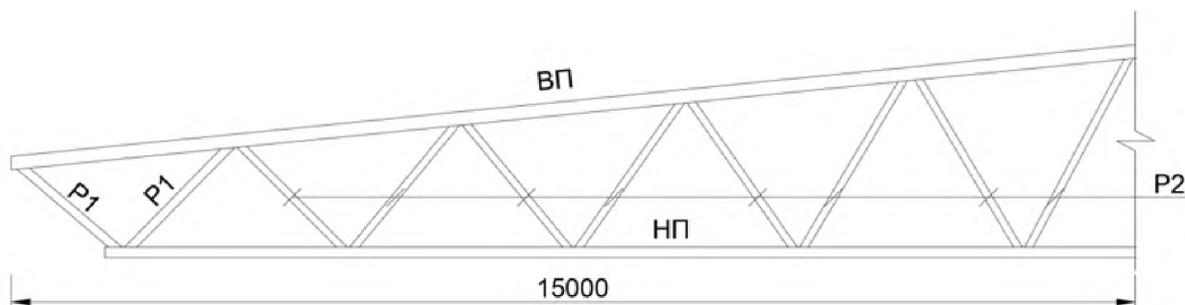
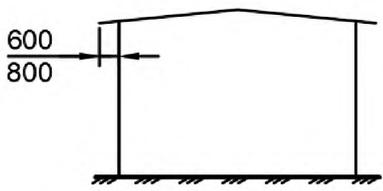
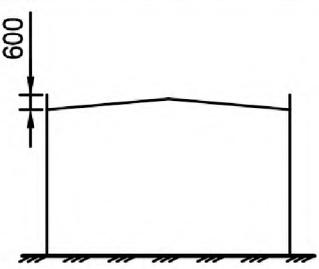
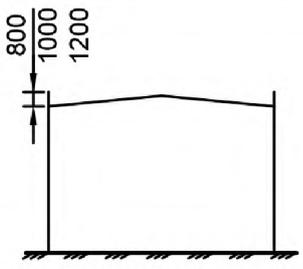
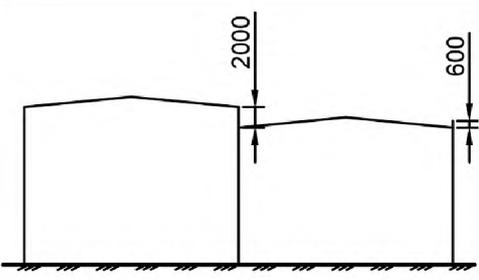


Рис. 1. Схема полуфермы: ВП – верхний пояс, НП – нижний пояс, P1, P2 – раскосы

Таблица 1

Схемы загрузки фермы различными видами нагрузок

№ схемы	Вид схемы	Схема нагружения	Примечание
1-2		Постоянная, снеговая 	Нагрузка равномерно распределенная
3			
4-6		Постоянная, снеговая 	Нагрузка равномерно распределенная
		Снеговая 	Нагрузка неравномерно распределенная с учетом повышенных снегоотложений в зоне парапета
7		Постоянная, снеговая 	Нагрузка равномерно распределенная
		Снеговая 	Нагрузка неравномерно распределенная с учетом повышенных снегоотложений в зоне перепада высот

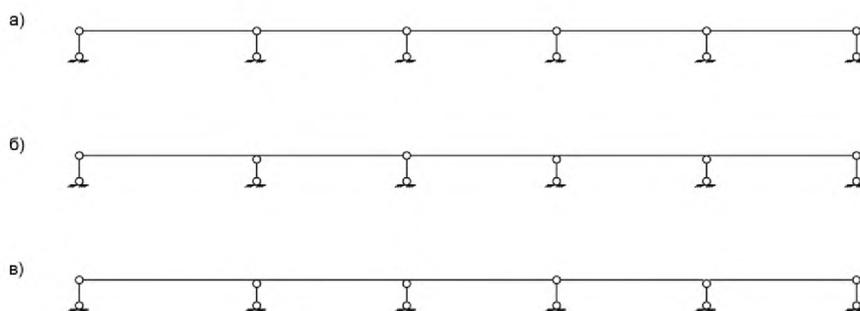


Рис. 2. Схема расположения профнастила на прогонах:
а) шарнирная; б) двух- и трехпролетная, в) трех- и двухпролетная

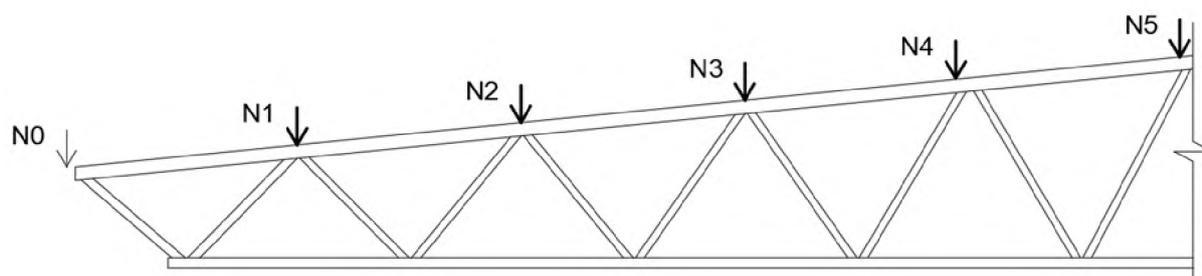


Рис. 3. Схема приложения узловых нагрузок на ферму (усилие N0 не принимается в расчет, поскольку крайний прогон опирается на надколонник)

Таблица 2

Усилия в элементах фермы в зависимости от схемы расположения профнастила на прогонах

Схема	Загружение	Схема (по рис. 2)	N1, кН	N2, кН	N3, кН	N4, кН	N5, кН	Максимальные отклонения, %
1	Постоянная	а)	8,06	8,32	8,09	8,11	4,66	-
		б)	9,93	6,58	8,87	8,9	3,87	23,20
		в)	8,69	9,26	6,21	10,1	3,68	24,54
	Снеговая равномерно-распределенная	а)	36,9	38	37	37,1	21,3	-
		б)	45,4	30,2	40,6	40,7	17,7	23,04
		в)	39,7	42,5	28,4	46,3	16,8	24,80
2	Постоянная	а)	7,86	8,32	8,09	8,11	4,66	-
		б)	9,63	6,64	8,87	8,9	3,87	22,52
		в)	8,37	9,34	6,2	10,1	3,68	24,54
	Снеговая равномерно-распределенная	а)	36	38,1	37	37,1	21,3	-
		б)	44	30,4	40,6	40,7	17,7	22,22
		в)	38,3	42,7	28,4	46,3	16,8	24,80
3	Постоянная	а)	8,48	8,32	8,09	8,11	4,66	-
		б)	10,6	6,6	8,87	8,9	3,87	25,00
		в)	9,37	9,29	6,21	10,1	3,68	24,54
	Снеговая равномерно-распределенная	а)	38,8	38,1	37	37,1	21,3	-
		б)	48,4	30,2	40,6	40,7	17,7	24,74
		в)	42,9	42,4	28,4	46,3	16,8	24,80
4	Постоянная	а)	8,48	8,32	8,09	8,11	4,66	-
		б)	10,6	6,6	8,87	8,9	3,87	25,00
		в)	9,37	9,29	6,21	10,1	3,68	24,54
	Снеговая равномерно-распределенная	а)	38,8	38,1	37	37,1	21,3	-
		б)	48,4	30,2	40,6	40,7	17,7	24,74
		в)	42,9	42,4	28,4	46,3	16,8	24,80
	Снеговой мешок от перепада высот	а)	39	37,7	36,7	36,8	21,1	
		б)	48,7	29,3	40,2	40,3	17,5	24,87
		в)	43,3	41	28,3	45,9	16,7	24,73
	Снеговой мешок от парапета	а)	38,8	38,1	37	37,1	21,3	
		б)	48,4	29,6	40,6	40,7	17,7	24,74

Схема	Загружение	Схема (по рис. 2)	N1, кН	N2, кН	N3, кН	N4, кН	N5, кН	Максимальные отклонения, %
		в)	42,9	41,5	28,4	46,3	16,8	24,80
5	Постоянная	а)	8,48	8,32	8,09	8,11	4,66	
		б)	10,6	6,6	8,87	8,9	3,87	25,00
		в)	9,37	9,29	6,21	10,1	3,68	24,54
	Снеговая равномерно-распределенная	а)	38,8	38,1	37	37,1	21,3	
		б)	48,4	30,2	40,6	40,7	17,7	24,74
		в)	42,9	42,4	38,4	46,3	16,8	24,80
	Снеговой мешок от перепада высот	а)	42,1	37	35,8	35,9	20,6	
		б)	52,6	28,2	39,3	39,4	17,1	24,94
		в)	47,5	39,5	27,8	44,8	16,3	24,79
	Снеговой мешок от парапета	а)	39,3	38,1	37	37,1	21,3	
		б)	49,1	30,2	40,6	40,7	17,7	24,94
		в)	43,6	41,4	28,6	46,3	16,8	24,80
6	Постоянная	а)	8,48	8,32	8,09	8,11	4,66	
		б)	10,6	6,6	8,87	8,9	3,87	25,00
		в)	9,37	9,29	6,21	10,1	3,68	24,54
	Снеговая равномерно-распределенная	а)	38,8	38,1	37	37,1	21,3	
		б)	48,4	30,2	40,6	40,7	17,7	24,74
		в)	42,9	42,4	38,4	46,3	16,8	24,80
	Снеговой мешок от перепада высот	а)	47,2	36,7	34,4	34,5	19,8	
		б)	58,9	27,4	37,7	37,8	16,4	24,79
		в)	54	38,3	26,7	43	15,6	24,64
	Снеговой мешок от парапета	а)	40,2	38,1	37	37,1	21,3	
		б)	50,4	29,3	40,6	40,7	17,7	25,37
		в)	45,1	41	28,7	46,3	16,8	24,80
7	Постоянная	а)	8,48	8,32	8,09	8,11	4,66	
		б)	10,6	6,6	8,87	8,9	3,87	25,00
		в)	9,37	9,29	6,21	10,1	3,68	24,54
	Снеговая равномерно-распределенная	а)	38,8	38,1	37	37,1	21,3	
		б)	48,4	30,2	40,6	40,7	17,7	24,74
		в)	42,9	42,4	38,4	46,3	16,8	24,80
	Снеговой мешок от перепада высот	а)	70,6	41	15,2	7,42	4,24	
		б)	88,1	30,1	18,8	6,23	3,82	24,79
		в)	83,6	38,9	11,2	9,27	3,34	24,93

Таблица 3

Результаты подбора элементов сечений фермы

№	ВП	НП	P1	P2
1-6	□180x140x5	□140x5	□120x4	□100x3
7	□180x140x5,5	□140x5,5	□120x4	□100x3

Примечание: обозначение элементов согласно рис. 1.

3. Результаты исследования

Результаты проверки элементов ферм по первой группе предельных состояний в виде максимальных коэффициентов использования, а также по второй группе в виде прогибов от постоянных и снеговых нагрузок с понижающим коэффициентом 0,5 приведены в табл. 4.

Результаты численного эксперимента подтверждают возможность подбора элементов ферм исходя из шарнирной схемы опирания профнастила на прогоны, а значит, и равенства грузовых площадей. При этом следует отметить, что за счет множественной статической неопределимости фермы типа

«Молодечно» происходит перераспределение усилий в элементах фермы. Так, при значительном изменении узловой нагрузки (порядка 25 %) разница значений коэффициентов использования сечений фермы близка к погрешности расчета и при грамотном проектировании с рациональными коэффициентами запаса не приведет к исчерпанию ресурса сечений по прочности и последующему разрушению фермы. Однако такое изменение нагрузки может существенно сказываться на работе прогонов, что может привести к перенапряжению элементов вплоть до потери несущей способности и возникновению аварийной ситуации.

Таблица 4.

Коэффициенты использования сечений элементов фермы для разных групп предельных состояний (ПС)

Результат численного эксперимента	Схема расположения профнастила	Схема						
		1	2	3	4	5	6	7
1 группа ПС (коэффициент использования, %)	а)	97,8	97,6	98,2	98,2	98,3	98,4	90,4
	б)	99,5	99,4	100,1	100,1	100,2	100,1	93
	в)	100,6	100,5	101,2	101,2	101,2	101,2	93,2
	Максимальные отклонение, %	2,9	3,0	3,0	3,0	3,0	2,8	3,1
2 группа ПС (прогиб)	а)	58,03	57,92	58,32	58,32	58,49	58,45	53,95
	б)	58,35	58,21	58,78	58,78	58,84	58,80	54,36
	в)	58,35	58,21	58,79	58,79	58,79	58,82	54,37
	Максимальные отклонение, %	0,55	0,5	0,8	0,8	0,61	0,63	0,8

4. Выводы

1. В типовых конструкциях покрытия влияние раскладки профнастила с учетом множественной статической неопределимости фермы типа «Молодечно» и, соответственно, перераспределения усилий в ее элементах незначительное. Приращение усилий в элементах фермы соизмеримо с погрешностью расчета (3 %), но может негативно сказаться на надежности работы конструкций, элементы которых подобраны без запасов прочности.

2. Схему раскладки профнастила на опоры необходимо учитывать при

проектировании прогонов покрытия, поскольку разница значений узловой нагрузки при различных схемах достигает 25 %, что может в значительной степени повлиять на напряженно-деформированное состояние прогона.

Список используемых источников

1. Кудишин Ю. И., Дробот Д. Ю. Живучесть конструкций в аварийных ситуациях. Часть 1 // Металлические здания. – 2008. – №. 4. – С. 20-22.
2. Кудишин Ю. И., Дробот Д. Ю. Живучесть конструкций в аварийных ситуациях. Часть 2 // Металлические здания. – 2008. – №. 5. – С. 21-23.
3. Малышкин А. П., Еситов А. В. Экспериментально-теоретические исследования стальных ферм покрытия легкоатлетического манежа в г.

- Тюмени // Construction and Geotechnics. – 2015. – № 2. – С. 105-115.
4. Краснощечков Ю. В., Украинцев М. П. Особенности взаимодействия стальных ферм с железобетонным ребристым настилом в покрытиях зданий // Строительная механика и расчет сооружений. – 2011. – № 4. – С. 55-58.
5. *Żółtowski K., Siwowski T.* Recent steel structures in Poland—the selected projects //13th International Conference on Metal Structures ICMS. – 2016. – С. 40-52.
6. *Chichulina K. V., Chichulin V. P.* European experience in designing resource-saving metal constructions //engineering sciences: development prospects in countries of europe at the beginning of the third millennium. – С. 448-458.
7. СП 16.13330. 2017.Свод правил. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*. – М.: ФГБУ "РСТ", 2022.
8. Перельмутер А. В., Сливкер В. И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. – М.: Склад Софт. – 2017.
9. Зернов В. В., Зайцев М. Б., Валякин В. А. Влияние габаритов узловых фасонок на несущую способность ферм из условия общей формы потери устойчивости //Современные научные исследования и инновации. – 2015. – № 4-1. – С. 91-93.
10. Казаков С. И. Проектирование сварных конструкций. – 2012.
11. Гринёва Ю. И. Анализ статических схем стальной стропильной фермы // Шаг в науку. – 2020. – № 1. – С. 15-19.
12. Беляева З. В., Кудрявцев С. В. Расчет и проектирование элементов металлических конструкций: учебно-методическое пособие. – 2019.
13. Туснин А. Р. и др. Проектирование металлических конструкций. – 2020.
14. Бергер М. П. Устойчивость поврежденной большепролетной фермы в составе пространственного каркаса // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – 2018. – № 2. – С. 27-33.
15. Колесов А. И., Байков Д. А., Маслов Д. С. Численные исследования действительной работы узлов фермы из квадратных труб, соединенных в узлах на ребро // Приволжский научный журнал. – 2012. – № 4. – С. 36-40.
16. *Radić I., Markulak D., Mikolin M.* Design and FEM modelling of steel truss girder joints // Strojarsstvo: časopis za teoriju i praksu u strojarstvu. – 2010. – Т. 52. – № 2. – С. 125-135.
17. *Sangeetha P., Kumar P. N., Senthil R.* Finite element analysis of space truss using matlab //ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2015. – Т. 10. – № 8. – С. 3812-3816.
18. СП 20.13330. 2016.Свод правил. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*. – М.: ФГБУ "РСТ", 2022.
2. *Kudishin Yu. I., Drobot D. Yu.* Stability of structures in emergency situations. Part 2 //Steel buildings. – 2008. – № 5. – P. 21-23.
3. *Malyszhkin A. P., Esipov A. V.* Experimental and theoretical studies of steel roof trusses of the athletic arena in tyumen //Construction and Geotechnics. – 2015. – № 2. – P. 105-115.
4. *Krasnoshchekov Yu. V., Ukraintsev M. P.* Features of the interaction of steel girders with reinforced concrete ribbed flooring in building coverings // Structural mechanics and structural analysis. – 2011. – № 4. – P. 55-58.
5. *Żółtowski K., Siwowski T.* Recent steel structures in Poland—the selected projects // 13th International Conference on Metal Structures ICMS. – 2016. – P. 40-52.
6. *Chichulina K. V., Chichulin V. P.* European experience in designing resource-saving metal constructions // Engineering sciences: development prospects in countries of Europe at the beginning of the third millennium. – P. 448-458.
7. SP 16.13330. 2017. Set of Rules. Steel structures. Actualized edition of SNiP II-23-81* - 2017.
8. *Perelmuter A.V., Slivker V.I.* Calculation models of structures and the possibility of their analysis. – 2017.
9. *Zernov V., Zaytsev M., Walakin V.* The influence of the size of nodal gussets on the carrying capacity of farms from the condition of the overall buckling // Modern scientific research and innovation. – 2015. – № 4-1. – P. 91-93.
10. *Kazakov S. I.* Design of welding construction. – 2012.
11. *Grineva Yu. I.* Analysis of static schemes of a steel truss // Step into science. – 2020. – № 1. – P. 15-19.
12. *Belyaeva Z. V., Kudryavtsev S. V.* Calculation and design of elements of steel structure: tutorial. – 2019.
13. *Tusnin A. R. et al.* Design of metal structures. – 2020.
14. *Berger M. P.* Stability of a damaged large-span truss as part of a spatial frame // Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G Shukhov. – 2018. – № 2. - P. 27-33.
15. *Kolesov A., Baikov D., Maslov D.* The numerical studies of real work of junctions of farms of rectangular section, set on edge // Privolzhsky Scientific Journal – 2012. – № 4. – P. 36-40.
16. *Radić I., Markulak D., Mikolin M.* Design and FEM modelling of steel truss girder joints // Strojarsstvo: časopis za teoriju i praksu u strojarstvu. – 2010. – Т. 52. – № 2. – P. 125-135.
17. *Sangeetha P., Kumar P. N., Senthil R.* Finite element analysis of space truss using matlab //ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2015. – Т. 10. – № 8. – P. 3812-3816.
18. SP 20.13330. 2016. Set of rules. Loads and actions. Updated edition of SNiP 2.01.07-85*. – 2016.

References

1. *Kudishin Yu. I., Drobot D. Yu.* Stability of structures in emergency situations. Part 1 //Steel buildings. – 2008. – № 4. – P. 20-22.