

УДК 624.014:624.042

В. В. ПРОНИН, доц. кафедры строительных конструкций

## АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ ФЛАНЦЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ РАСТЯНУТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ РАВНОБОКИХ УГОЛКОВ

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»  
Россия, 603952, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65. Тел.: (831) 430-54-80;  
эл. почта: rrv-1947@mail.ru

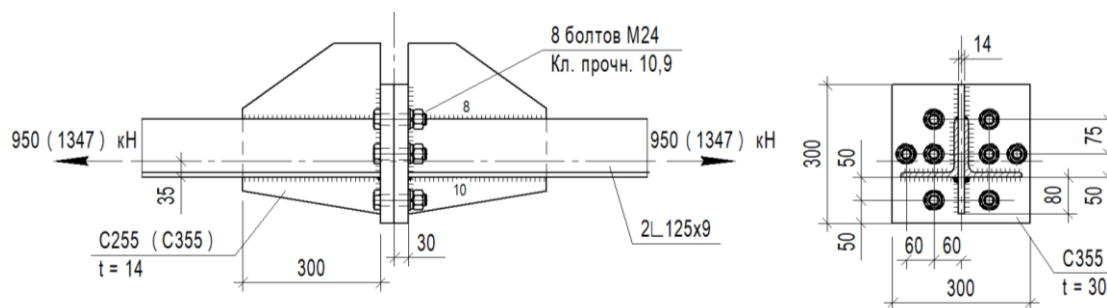
*Ключевые слова:* фланцевые узлы, расчет узлов, болты с контролируемым натяжением, сварные швы, напряженно-деформированное состояние.

*Произведены расчеты типовых фланцевых узлов растянутых элементов из парных уголков. Сравниваются результаты узлов с типовыми и измененными параметрами, полученными с помощью расчетного комплекса IDEA StatiCa 21.1. Приведена таблица узлов с уменьшенными значениями толщин фланцев и диаметров болтов.*

Широкое применение болтов с контролируемым натяжением (ранее называемых высокопрочными) позволяет в качестве монтажных узлов ферм с элементами из парных уголков принимать фланцевые соединения, которые по сравнению с традиционными решениями на накладках легче и проще в использовании.

Типовые решения фланцевых узлов [1, 2] приведены в Рекомендациях [1] и сериях [2, 3]. В этих узлах рекомендуется применять высокопрочные болты диаметром  $d = 24$  и  $27$  мм из стали 40Х «селект». Количество болтов в узле изменяется от 4 до 12 в зависимости от воспринимаемого усилия, а толщина фланцев – от 20 до 40 мм. Фланцы изготавливаются из стали 14Г2АФ-15 (ТУ 14-105-465-82) или 09Г2С-15 (ГОСТ 19282-73). На рисунке показана конструкция одного из узлов (схема 3).

Представляет интерес численное исследование фланцевых узлов с помощью современных расчетных комплексов с целью выявления резервов несущей способности и разработки предложений по уменьшению их металлоемкости и трудоемкости изготовления и монтажа.



Конструкция фланцевого узла по схеме 3



Одним из современных расчетных комплексов является *IDEA StatiCa Connection* [4]. В основе комплекса – компонентный метод конечных элементов (КМКЭ), позволяющий решить следующие задачи:

- создание 3D-модели узла с последующей проверкой корректности назначенных параметров (соотношений толщин, катетов сварных швов, минимальных расстояний между болтами и др.);
- расчет узла с учетом деформативности и физической нелинейности работы всех элементов;
- учет наличия в узле сварных швов, болтов (обычных и с контролируемым натяжением);
- изображение узла в деформированном виде с изополями приведенных напряжений, зонами пластических деформаций и зонами возможного контакта элементов в результате их деформаций;
- определение критических элементов узла с максимальными зонами пластичности;
- расчет предельной несущей способности узла;
- расчет жесткости узла.

В настоящее время *IDEA StatiCa Connection* является единственным в России программным продуктом для автоматизированного расчета узлов КМКЭ. Программа полностью переведена на русский язык, локализована и имеет сертификат соответствия. Благодаря обширной библиотеке встроенных шаблонов, а также интуитивно понятному и профессионально проработанному интерфейсу создание, расчет и проверка узла по нормам занимают всего несколько минут. Наличие прямого взаимодействия с другими CAD- и FEA-программами для проектирования и расчетов, такими как *Tekla*, *Advance Steel*, *Revit*, *SAP2000*, *ETABS*, *Robot* позволяет встроить *IDEA StatiCa* в рабочий BIM-процесс. Программа значительно упрощает работу инженеров-конструкторов, делает ее более эффективной и продуктивной, а также обеспечивает высокое качество и надежность получаемых результатов [5].

В Рекомендациях [1] приведены 6 вариантов узлов с элементами из уголков начиная с 100×7 до 180×12. Эти узлы нагружаются максимальными растягивающими усилиями, возможными для данного сечения исходя из применения стали повышенной прочности (09Г2С-12, 09Г2С-15 по ГОСТ 19282-73, 09Г2С-12-1 по ТУ 14-1-3023-80).

Произведем моделирование и расчет каждого из этих узлов в расчетном комплексе *IDEA StatiCa Connection* в двух вариантах материала для элементов ферм – малоуглеродистая сталь С245 и сталь повышенной прочности С345.

Усилия растяжения определим по несущей способности двух уголков

$$N = 2 A_{y2} R_y \gamma_c,$$

где  $A_{y2}$  – площадь сечения одного уголка (ГОСТ 8509-93);  $R_y$  – расчетное сопротивление стали по пределу текучести (табл. В.5 [6]);  $\gamma_c = 0,9$  – коэффициент условий работы конструкции (табл. 1 [6], п. 5).

Результаты вычислений приведены в табл. 1.

В соответствии с [7] фланцы изготавливаются из сталей С355 и С390 с гарантированными механическими свойствами в направлении толщины проката.



В данном случае применяется сталь С355, примерно соответствующая стали 09Г2С.

Таблица 1

## Расчетные усилия в узлах

Номер схемы узла	Сечение	$A_{уз.}(см^2)$	$R_y (Н/мм^2)$		Усилие $N$ (кН) для стали	
			С245	С345	С245	С345
1, 1-1 <sup>х)</sup>	2L 100×7	13,75	240	340	594	842
2, 2-1 <sup>х)</sup>	2L 100×8	15,6			674	955
	2L 110×8	17,20			743	1053
3, 3-1 <sup>х)</sup>	2L 125×8	19,7			851	1206
	2L 125×9	22,0			950	1346
4, 4-1 <sup>х)</sup>	2L 140×9	24,7			1067	1512
	2L 140×10	27,33		1181	1673	
5, 5-1 <sup>х)</sup>	2L 160×10	31,4		320	1356	1809
	2L 160×11	34,4			1486	1981
	2L 160×12	37,39			1615	2154
6, 6-1 <sup>х)</sup>	2L 180×11	38,8		1676	2235	
	2L 180×12	42,19		1823	2430	

<sup>х)</sup> сталь С345

Болты из стали 40Х «селект» соответствуют болтам класса прочности 10.9. Менее прочные болты в данном случае применять не рекомендуется [7].

Для ребер жесткости узлов применяется та же сталь, что и для стержней фермы (С245, С345 или С355).

Все расчеты производятся без учетов допускаемых дефектов изготовления и монтажа узлов (отклонение фрезерованной поверхности фланцев от проектной плоскости, смещение фланца от проектного положения, наличие просветов между фланцами). Предельные значения этих дефектов приведены в п. 12.3.14 и 12.3.17 [7].

В каждом из расчетов узлов с рекомендованными в [1] параметрами оценивается напряженно-деформированное состояние всех элементов, включая болты и сварные швы, и делается вывод о возможности оптимизации узла путем уменьшения толщины фланцев, а также диаметра и количества болтов.

В последующих расчетах эти параметры постепенно снижаются до состояния, когда один из элементов узла теряет свою несущую способность. В итоге получаем конструкцию узла с измененными и, как правило, уменьшенными параметрами.

Результаты расчетов приведены в табл. 2, которая состоит из двух частей.

В первой части показаны некоторые результаты расчетов узлов с параметрами, принятыми в Рекомендациях [1]. При этом расчетные усилия даже для элементов из стали С345 несколько меньше принятых в [1]. Объясняется это,

**К СТАТЬЕ В. В. ПРОНИНА  
«АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ ФЛАНЦЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ  
РАСТЯНУТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ РАВНОБОКИХ УГОЛКОВ»**

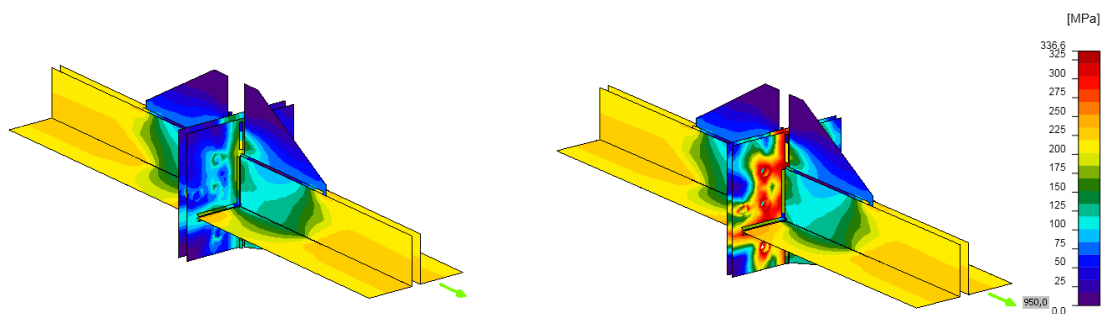


Рис. 1. Напряженное состояние узла по схеме 3 при толщинах фланца 30 и 22 мм

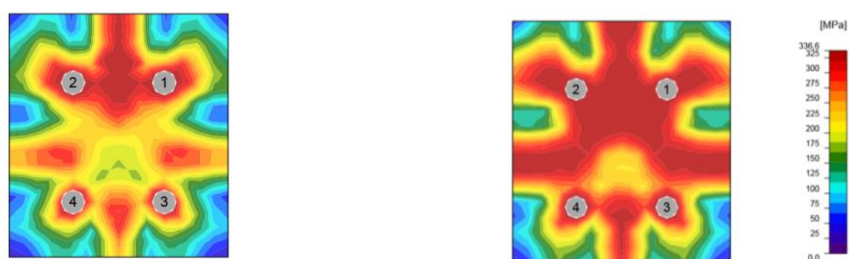


Рис. 2. Схема 1-1. Приведенные напряжения во фланце толщиной 20 мм и 18 мм

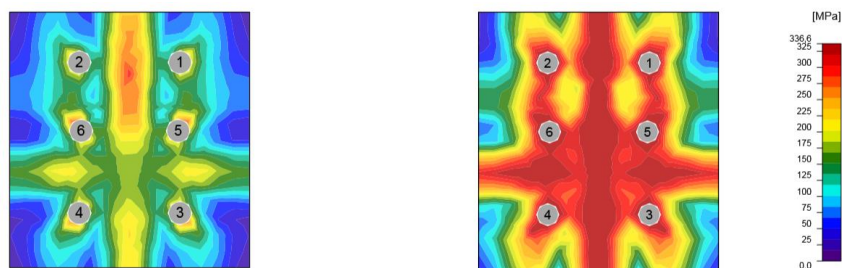


Рис. 3. Схема 2-1. Приведенные напряжения во фланце толщиной 25 мм и 18 мм

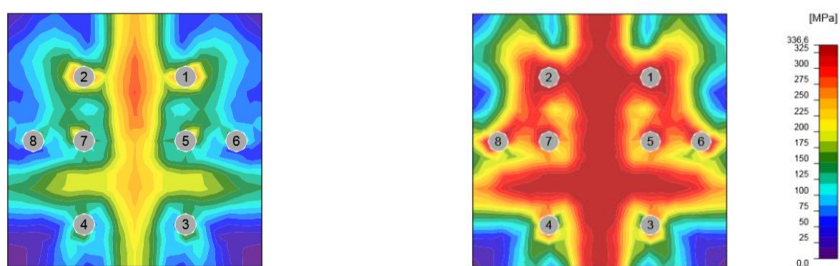


Рис. 4. Схема 3-1. Приведенные напряжения во фланце толщиной 30 мм и 22 мм

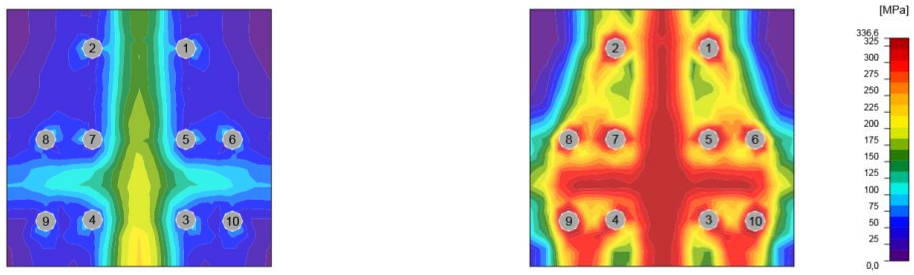


Рис. 5. Схема 4-1. Приведенные напряжения во фланце толщиной 40 мм и 22 мм

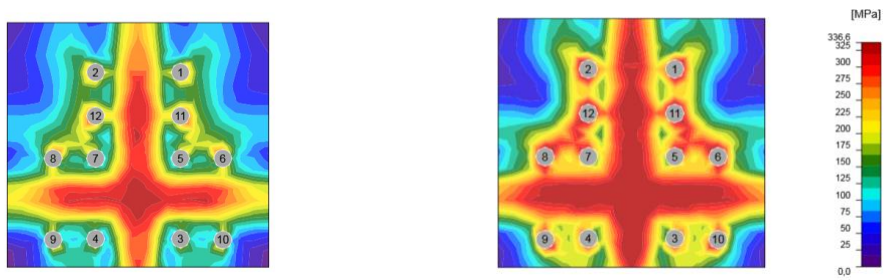


Рис. 6. Схема 5-1. Приведенные напряжения во фланце толщиной 30 мм и 25 мм

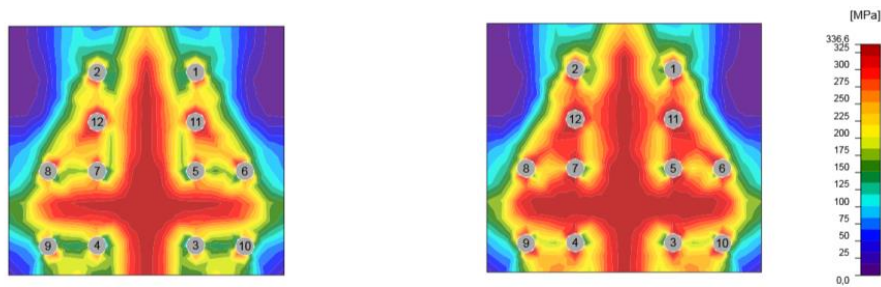


Рис. 7. Схема 6-1. Приведенные напряжения во фланце толщиной 30 мм и 28 мм



в первую очередь, учетом коэффициента условий работы  $\gamma_c = 0,9$ , принятого согласно табл. 1 [6] (п. 5 – расчет на прочность при растяжении по неослабленному сечению).

Расчеты показали, что наиболее слабым элементом почти во всех узлах являются вертикальные сварные швы крепления фасонки к фланцам на участках вне габаритов уголков. В графе 12 табл. 2 приведены коэффициенты использования сварных швов. Швы заданной величины проходят лишь в 4 случаях из 12. В остальных случаях приходится пользоваться добавкой 2 мм к катету шва при расчетах по металлу шва. Эта добавка учитывает глубину проварки корня шва (см. [8], с. 201) и может быть применена вручную путем увеличения катета шва в расчетах, выполняемых расчетным комплексом. Такие результаты помечены <sup>x)</sup>.

С другой стороны, расчеты показали недогруженность фланцев (отсутствие пластики в 8 случаях из 12), но и в остальных случаях максимальная относительная пластическая деформация составляет лишь 0,281 % (графа 5 табл. 2). Известно, что для изгибаемых элементов из сталей с  $R_{tm}/R_{ym} = 1,5-1,7$  можно учитывать развитие неупругих деформаций до значений  $\varepsilon = 4-5$  % [7].

Для стали С355 ( $t = 16-40$  мм)  $R_{tm}/R_{ym} = 490/345 = 1,42 \approx 1,5$ .

Недогруженными являются и болты: коэффициент использования их несущей способности изменяется от 0,57 до 0,94.

Таким образом, произведенные расчеты показали возможность во всех случаях уменьшения толщин фланцев и диаметров болтов при том же их количестве.

Во второй части таблицы (окончание табл. 2) показаны результаты крайних расчетов при условии обеспечения несущей способности всех элементов узлов. Критерием остановки расчета является исчерпание несущей способности фланцев, болтов или сварных швов.

При назначении толщины фланцев за минимальную величину конструктивно примем  $t_{\phi} = 18$  мм, а максимальную величину относительных пластических деформаций  $\varepsilon_{nl} = 0,6$  %, что значительно меньше предельной величины  $\varepsilon_{nl} = 5$  %, принятой в расчетном комплексе. Это значит, что области распространения пластических деформаций существенно ограничены. Уменьшение толщины фланцев составило от 7 до 55 % (графа 22).

Диаметр болтов уменьшен в 9 случаях из 12 до величины 20, 22 и 24 мм.

Размеры сварных швов остаются прежними, а коэффициент использования их несущей способности изменился незначительно.

Для иллюстрации работы расчетного комплекса *IDEA StatiCa Connection* показаны конструкция и напряженно-деформированное состояние узла по схеме 3 до и после его изменения (рис. 1-7 цв. вклейки).



Таблица 2

## Результаты расчетов узлов

Схема узла	N (кН)	Сечение элементов	Параметры узла по Рекомендациям [3]									
			Фланец			Болты				Св. швы		
			$t_\phi$ (мм)	$\sigma_{np}$ (МПа)	$\varepsilon_{нп}$ (%)	$d_b$ (мм)	$n$ (шт.)	$N_{b,max}$ (кН)	$N_{bu}$ (кН)	$k_\gamma$ (мм)	Кэф. ИСП.	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	594	2 L 100×7	20	304,2	0,015		4	162,5			0,84 <sup>х)</sup>	
1-1	842			336,8	0,116			229,8			0,82 <sup>х)</sup>	
2	743	2 L 110×8	25	212,8	0		6	147,7		10	0,9	
2-1	1053			301	0			209			0,83 <sup>х)</sup>	
3	950	2 L 125×9	30	202,1	0	24	8	162,2	257		0,85 <sup>х)</sup>	
3-1	1347			295,9	0			230			0,94 <sup>х)</sup>	
4	1181	2 L 140×10	40	133,3	0		10	172			0,97	
4-1	1673			224,3	0			234,1		12	0,86 <sup>х)</sup>	
5	1486	2 L 160×11	30	252,4	0		12	205			1	
5-1	1981			336,7	0,041			235,8			1	
6	1823	2 L 180×12	30	295	0	27	12	284,7	334,2	14	0,91 <sup>х)</sup>	
6-1	2430			337,2	0,281			315,8			0,92 <sup>х)</sup>	

х) с учетом добавки 2 мм к катету шва согласно [8]



Окончание табл. 2

**Результаты расчетов узлов**

Схема узла	N (кН)	Сечение элементов	Параметры узла по результатам расчетов													Св. швы	Кэф. исп.	ε (%)		
			Фланец			Болты				N <sub>бу</sub> (кН)		k <sub>г</sub> (мм)								
			t <sub>ф</sub> (мм)	σ <sub>пр</sub> (МПа)	ε <sub>пл</sub> (%)	d <sub>б</sub> (мм)	n (шт.)	N <sub>б, max</sub> (кН)	N <sub>бу</sub> (кН)											
1	2	3	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	22							
1	594	2 L 100×7	336,7		0,07	20	4	161	178,4										0,84 <sup>х)</sup>	10
1-1	842		337,7		0,543	22		218,6	220,6										0,82 <sup>х)</sup>	10
2	743	2 L 110×8	18	336,7		0,052	20	6	158,6	178,4									0,97	28
2-1	1053			337,3		0,352	22		208,9	220,6										1
3	950	2 L 125×9	22	336,9		0,134	20	8	163,8	178,4									0,85 <sup>х)</sup>	40
3-1	1347			337,2		0,312	22		218,4	220,6										0,89 <sup>х)</sup>
4	1181	2 L 140×10	18	337		0,182	20	10	172,9	178,4									1	55
4-1	1673			337,5		0,461	24		253,2	257										0,87 <sup>х)</sup>
5	1486	2 L 160×11	18	377,7		0,589	20	12	172,8	178,4									1	40
5-1	1981			337		0,224	24		240,9	257										0,88 <sup>х)</sup>
6	1823	2 L 180×12	20	337,6		0,497	24	12	249	257									0,91 <sup>х)</sup>	33
6-1	2430			337,6		0,512	27		321,2	334,2										0,92 <sup>х)</sup>

Принятые обозначения:

σ<sub>пр</sub> – приведенные напряжения по Мизесу;

ε<sub>пл</sub> – максимальная величина относительных пластических деформаций;

N<sub>б, max</sub> – максимальное усилие растяжения в болте;

N<sub>бу</sub> – несущая способность болта на растяжение;

K-г исп. – коэффициент использования несущей способности шва.

<sup>х)</sup> с учетом добавки 2 мм к катету шва согласно [8].



**Выводы:**

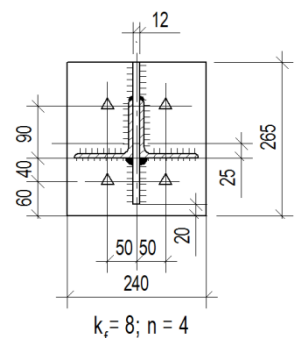
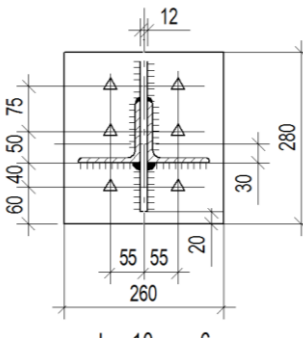
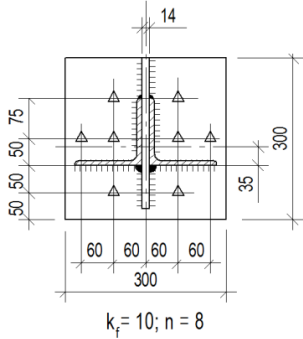
1. Расчеты показывают, что все шесть схем фланцевых узлов по Рекомендациям [1] имеют запасы по несущей способности, особенно при выполнении элементов пояса из стали С245.

2. Введение изменений в узлы приведет к экономии стали для фланцев и уменьшит диаметр болтов с контролируемым натяжением, что снизит трудоемкость изготовления и монтажа узлов в целом.

3. Ниже приведена табл. 3 параметров фланцевых узлов с учетом рекомендуемых изменений.

Таблица 3

**Параметры фланцевых узлов с учетом результатов расчетов**

Но- мер схем ы	Схема соединения, катет шва $k_f$ , мм, кол-во болтов $n$	Сечение элемента	Максимальное усилие, кН	Толщина фланца, мм	Диаметр болтов, мм
1	 $k_f = 8; n = 4$	2L 100×7	594 (842) <sup>x)</sup>	18	20 22 <sup>x)</sup>
2	 $k_f = 10; n = 6$	2L 100×8 2L 110×8	674 (955) <sup>x)</sup> 743 (1053) <sup>x)</sup>	18	20 22 <sup>x)</sup>
3	 $k_f = 10; n = 8$	2L 125×8 2L 125×9	851 (1206) <sup>x)</sup> 950 (1347) <sup>x)</sup>	18 (22) <sup>x)</sup>	20 22 <sup>x)</sup>



Окончание табл. 3

Но- мер схе- мы	Схема соединения, катет шва $k_f$ , мм, кол-во болтов $n$	Сечение элемента	Максимальное усилие, кН	Толщина фланца, мм	Диаметр болтов, мм
4	<p><math>k_f = 12; n = 10</math></p>	<p>2L 140×9 2L 140×10</p>	<p>1067 (1512)<sup>x)</sup> 1181 (1673)<sup>x)</sup></p>	<p>18 (22)<sup>x)</sup></p>	<p>20 24<sup>x)</sup></p>
5	<p><math>k_f = 12; n = 12</math></p>	<p>2L 160×10 2L 160×112 L 160×12</p>	<p>1356 (1809)<sup>x)</sup> 1486 (1981)<sup>x)</sup> 1615 (2154)<sup>x)</sup></p>	<p>18 (25)<sup>x)</sup></p>	<p>20 24<sup>x)</sup></p>
6	<p><math>k_f = 14; n = 12</math> (M27)</p>	<p>2L 180×11 2L 180×12</p>	<p>1676 (2235)<sup>x)</sup> 1823 (2430)<sup>x)</sup></p>	<p>20 (28)<sup>x)</sup></p>	<p>24 27<sup>x)</sup></p>

<sup>x)</sup> для поясов из стали С345



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рекомендации по расчету, проектированию, изготовлению и монтажу фланцевых соединений стальных строительных конструкций. – Москва : ЦБНТИ Минмонтажспецстроя СССР, 1989. – 53 с.
2. Серия 1.460.2-10/88. Стальные конструкции покрытий одноэтажных производственных зданий с фермами из парных уголков. Выпуск 1. Покрытия пролетами 18, 24, 30 и 36 м с применением железобетонных плит и стального профилированного настила. Чертежи КМ. – Москва : ЦИТП Госстроя СССР, 1988. – Часть 1, книга 2. – С. 67–133.
3. Серия 1.460.2-10/88. Стальные конструкции покрытий одноэтажных производственных зданий с фермами из парных уголков. Выпуск 2. Покрытия пролетами 18 и 24 м с фермами высотой 2,25 м. Чертежи КМ. – Москва : ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – Часть 2. – С. 92–159.
4. IDEA StatiCa Connection : вводное пособие. – Санкт-Петербург : НИП-Информатика, 2021.
5. Бароев, Р. Расчет узлов стальных конструкций компонентным методом конечных элементов /Р. Бароев // Архитектура и строительство. – 2019. – № 3. – С. 95–101.
6. СП 16.13330.2017. Стальные конструкции : свод правил : издание официальное : Утвержден Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 27 февраля 2017 г. N 126/пр : актуализированная редакция СНиП II-23-81\* : дата введения 28 августа 2017 года. – URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_90914/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_90914/) (дата обращения: 26.04.2024). – Текст : электронный.
7. СП 294.1325800.2017. Конструкции стальные. Правила проектирования. свод правил : издание официальное : Утвержден Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 31 мая 2017 г. N 828/пр : дата введения 1 декабря 2017 года. – URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_90914/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_90914/) (дата обращения: 26.04.2024). – Текст : электронный.
8. Металлические конструкции : в 3-х томах. Том 1 : общая часть. / Под общей редакцией В. В. Кузнецова. – Москва : АСВ, 1998. – 576 с. : ил. – (Справочник проектировщика). – ISBN 5-87829-057-X.

**PRONIN Vladislav Valerevich, associate professor of the chair of building structures**

### **ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF FLANGE CONNECTIONS OF STRETCHED ELEMENTS OF EQUILATERAL ANGLE BARS**

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering  
65, Pjinskaya St., Nizhny Novgorod, 603952, Russia. Tel.: + 7 (831) 430-54-80;  
e-mail: pvv-1947@mail.ru .

*Key words:* flange assemblies, calculation of assemblies, bolts with controlled tension, welds, stress-strain state.

---

*Calculations of typical flange assemblies of stretched elements of paired angle bars have been performed. The results of assemblies with standard and modified parameters obtained using the IDEASTatiCa 21.1 calculation complex are compared. A table of assemblies with reduced values of flange thicknesses and bolt diameters is presented.*



## REFERENCES

1. Rekomendatsii po raschyotu, proektirovaniyu, izgotovleniyu i montazhu flantsevykh soedineniy stalnykh stroitelnykh konstruksiy [Recommendations for the calculation, design, manufacture and installation of flange connections of steel building structures]. – Moscow : TsBNTI Minmontazhspestroya SSSR, 1989. – 53 p.
2. Series 1.460.2-10/88. Stalnye konstruksii pokrytiy odnoetazhnykh proizvodstvennykh zdaniy s fermami iz parnykh ugolkov. Vypusk 1. Pokrytiya prolyotami 18, 24, 30 i 36 m s primeneniem zhelezobetonnykh plit i stalnogo profilirovannogo nastila [Steel structures of roofing of single-storey industrial buildings with trusses of paired angle bars. Issue 1. Roofing with spans of 18, 24, 30 and 36 m using reinforced concrete slabs and profiled steel sheets]. Chertezhi KM. – Moscow : TsITP Gosstroya SSSR, 1988. – Chast 1, kniga 2. – P. 67–133.
3. Series 1.460.2-10/88. Stalnye konstruksii pokrytiy odnoetazhnykh proizvodstvennykh zdaniy s fermami iz parnykh ugolkov. Vypusk 2. Pokrytiya prolyotami 18 i 24 m s fermami vysotoy 2.25 m. Steel structures covering single-storey industrial buildings with farms from paired corners. Issue 2. Roofing with spans of 18 and 24 m with trusses of a height of 2.25 m]. Chertezhi KM. – Moscow : TsITP Gosstroya SSSR, 1989. – Chast 2. – P. 92–159.
4. IDEA Static Connection : vvodnoe posobie. – Saint-Petersburg : NIP-Informatika, 2021.
5. Baroev R. Raschyot uzlov stalnykh konstruksiy komponentnym metodom konechnykh elementov [Calculation of subassemblies of steel structures by the component finite element method]. Arkhitektura i stroitelstvo [Architecture and Construction]. 2019. № 3. P. 95–101.
6. SP 16.13330.2017. Stalnye konstruksii [Steel structures] : svod pravil : utverzhdyon Prikazom Min-va stroit. i zhilishchno-kommunal. khoz-va RF ot 27 fevralya 2017 g. N 126/pr : aktualizir. red. SNiP II-23-81\* : data vved. 28 avgusta 2017 goda. – URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_90914/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_90914/) (data obrashcheniya: 26.04.2024).
7. SP 294.1325800.2017. Stalnye konstruksii [Steel structures] : svod pravil : utverzhdyon Prikazom Min-va stroit. i zhilishchno-kommunal. khoz-va RF ot 31 maya 2017 g. N 828/pr : data vved. 1 dekabrya 2017 goda. – URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_90914/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_90914/) (data obrashcheniya: 26.04.2024).
8. Metallicheskie konstruksii [Metal structures]. V 3-kh tomakh. Vol. 1 : obshchaya chast. / Pod obshchey red. V. V. Kuznetsova. Moscow : ASV, 1998. – 576 p. : il. – (Spravochnik proektirovshchika). – ISBN 5-87829-057-X.

© В. В. Пронин, 2024

Получено: 26.02.2024 г.