

stroitelstvo. Bezopasnost sooruzheniy [Earthquake engineering. Constructions safety]. – 2013. – No 4. – P. 41–54.

18. Aizenberg Y. M. Seismic-insulating adaptive foundation systems – Soil Mechanics and Foundation Engineering. – 1992. – Vol. 29. – N_{2} 6. – P. 197–202.

19. Boriskina E. S., Deulina N. M. Proektirovanie konstruktsiy adaptivnogo fundamenta v seysmicheski opasnykh rayonakh [Design of an adaptive foundation structure in seismically hazardous areas]. X Vserossiyskiy festival nauki. – 2020. – P. 227–232.

20. Chen S. Seysmoizolirovannoe zdaniye so skolzyaschim ftoroplastnym poyasom [Seismically insulated building with sliding PTFE belt]: dissertatsiya na soisk. kvalif. "magistr tekhniki i tekhnologii" po napravleniyu "Stroitelstvo" / Sankt-Peter. gos. politekh. un-t. Saint-Petersburg, 2011, 86 p.

21. Kuznetsov V. D., Chen S. Skolzyaschiy poyas s ftoroplastom seysmostoykogo zdaniya [Sliding girt with fluoroplastic for earthquake-proof building]. Inzhenerno-stroitelny zhurnal [Magazine of civil engineering]. $-2011. - N_{2} 3. - P. 53-58.$

© П. А. Хазов, Н. М. Деулина, М. Л. Поздеев, Е. С. Борискина, 2022 Получено: 30.03.2022 г.

УДК 624.074.2+624.042.12

И. В. ШКОДА, аспирант¹, асс. кафедры теории сооружений и технической механики²; Б. Б. ЛАМПСИ², канд. физ.-мат. наук, доц. кафедры теории сооружений и технической механики; Е. П. ИСАЕВА², студент

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ ФЛАНЦЕВЫХ УЗЛОВ РЕБРИСТО-КОЛЬЦЕВОЙ КУПОЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

¹Институт 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: erof.vi@yandex.ru

²ΦГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет» Россия, 603950, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65. Тел.: (831) 430-54-96; эл. почта: ShkodaIrinaVasil@yandex.ru, boris-lampsi@yandex.ru, isvrina@yandex.ru *Ключевые слова:* фланцевый узел, ребристо-кольцевой купол, напряженно-деформированное состояние.

Приводится краткий обзор фланцевых соединений. Производится расчет фланцевых узлов в программе IDEA StatiCa: непрорезной и прорезной фланцевые узлы без ребер жесткости; непрорезной и прорезной фланцевые узлы с ребрами жесткости. Выполняется сравнение результатов расчета.

Фланцевое соединение представляет собой систему, которая состоит из совместно работающих пластин фланцев, болтов, сварных швов и соединяемых элементов в непосредственной близости от фланца либо между ними (рис. 1) [1]. В данном соединении внешние растягивающие усилия передаются через предварительно натянутые пакеты «фланец-болт», а сжимающие – через плотное касание фланца.





Рис. 1. Элементы фланцевого соединения

Фланцевые соединения обладают целым рядом преимуществ в сравнении с другими типами соединений, а именно:

 предоставляют возможность возведения каркаса здания при любых климатических условиях и возможность его демонтажа без нанесения дефектов несущим элементам;

обладают высокой надежностью;

отличаются наименьшей трудоемкостью;

 крайне удобны при ремонте, поскольку они позволяют быстро вычленить один элемент и заменить его другим.

В данный период времени изучение работы фланцевых соединений производится не столь активно, как в 80-х годах прошлого века. Одними из ключевых современных исследователей работы фланцевых соединений являются Шафрая С. Д., Шафрая С. А, Катюшина В. В., Бирюлева В. В., Каленова В. В. и др. [2–6]. Анализ публикаций в различных научных журналах дал понять, что центральной задачей нынешних исследователей стала разработка корректной расчетной модели с помощью различных программных комплексов [7–9]. За прошедшие 20 лет были разработаны доступные средства для составления расчетной модели из объемных конечных элементов с использованием программных комплексов. Данные методы исследования позволяют узнать напряженно-деформированное состояние фланца и болтов не только на поверхности, но и также рассмотреть внутренние напряжения, скрытые для отслеживания с помощью измерительных приборов.

Поскольку фланцевая пластина в растянутой зоне соединения работает по пространственной схеме, при ее расчете важно принимать во внимание следующие дополнительные факторы:

существование касательных напряжений в пластине;

 работа фланца как упруго-защемленной пластины из-за податливости болтов;

образование изгибных напряжений в теле болта.

Исходя из всего вышеперечисленного, можно сделать вывод, что расчет фланцевых соединений представляет собой довольно сложную задачу. Учесть данные факторы при расчете фланцевых узлов ручным методом довольно проблематично, поэтому чаще всего для экспрессного анализа напряженного состояния фланцевого соединения применяется компьютерное математическое моделирование [10, 11].

В программном комплексе SCAD была создана расчетная стержневая мо-



дель купола диаметром 36 м и высотой 8 м. Стержни заданы со всеми прочностно-жесткостными характеристиками. Сбор нагрузок осуществлен согласно СП 20.13330.2016. Выполнен подбор элементов сечений. Выбрано сечение из круглых труб (рис. 2).

Результатами расчета для конструкции купола из круглых труб являются следующие принятые сечения:

- 1. Несущие ребра купола: круглая труба по ГОСТ 32931-2015 Ø377,0×6 мм;
- 2. Кольца купола: круглая труба по ГОСТ 32931-2015 Ø244,5×6 мм;

3. Элементы раскосной решетки: круглая труба по ГОСТ 32931-2015 Ø177,8×6 мм;

- 4. Верхнее опорное кольцо: круглая труба по ГОСТ 32931-2015 Ø177,8×4 мм;
- 5. Нижнее опорное кольцо: круглая труба по ГОСТ 32931-2015 Ø219×4 мм;
- 6. Общая масса конструкции купола из круглых труб 32,98 т.



Рис. 2. Конструкция ребристо-кольцевого купола из круглых труб

Настоящая статья представляет собой продолжение исследования [12, 13], объектом которого выступает ребристо-кольцевой купол (рис. 2).

На рис. 3 представлен исследуемый монтажный узел ребристо-кольцевого купола, который соединяет ребра двух отправочных марок. Для упрощения сборки купола на строительной площадке исследуемый узел, соединяющий отправочные марки, принят фланцевым. Усилия, возникающие в элементах купола, полученные в расчетном комплексе *SCAD*, приложены к модели узла.



Рис. 3. Исследуемый узел ребристо-кольцевого купола

К СТАТЬЕ И. В. ШКОДА, Б. Б. ЛАМПСИ, Е. П. ИСАЕВОЙ «ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ ФЛАНЦЕВЫХ УЗЛОВ РЕБРИСТО-КОЛЬЦЕВОЙ КУПОЛЬНОЙ СИСТЕМЫ»



б а в

Рис. 1. Распределение напряжений в непрорезном фланцевом узле без ребер жесткости



Рис. 3. График зависимости напряжения в теле трубы от толщины пластины фланца



Рис. 5. График зависимости напряжения в сварном шве от толщины пластины фланца



Рис. 7. способности от толщины пластины фланца от толщины пластины фланца

Рис. 2. Распределение напряжений: *а* – в теле трубы; *б* – в пластине фланца; в – в сварном шве



Рис. 4. График зависимости напряжения в пластине фланца от его толщины



Рис. 6. График зависимости растягивающего усилия в болтах от толщины пластины фланца



График зависимости несущей Рис. 8. График зависимости материалоемкости



Рис. 9. Распределение напряжений В прорезном фланцевом узле без ребер жесткости



Рис. 11. График зависимости напряжения в теле трубы от толщины пластины фланца



Рис. 13. График зависимости напряжения в сварном шве от толщины пластины фланца



способности от толщины пластины фланца от толщины пластины фланца

Рис. 10. Распределение напряжений: а – в теле трубы; б – в пластине фланца; в – в сварном шве



Рис. 12. График зависимости напряжения в пластине фланца от его толщины



Рис. 14. График зависимости растягивающего усилия в болтах от толщины пластины фланца



Рис. 15. График зависимости несущей Рис. 16. График зависимости материалоемкости



Рис. 17. Распределение напряжений в непрорезном фланцевом узле с ребрами жесткости



Рис. 19. График зависимости напряжения в теле трубы от толщины пластины фланца



Рис. 21. График зависимости напряжения в ребре жесткости от толщины пластины фланца



Рис. 23. График зависимости растягивающего усилия в болтах от толщины пластины фланца Рис. 18. Распределение напряжений: *а* – в теле трубы; *б* – в пластине фланца; *в* – в сварном шве; *г* – в ребре



Рис. 20. График зависимости напряжения в пластине фланца от его толщины



Рис. 22. График зависимости напряжения в сварном шве от толщины пластины фланца



Рис. 24. График зависимости несущей способности от толщины пластины фланца





График Рис. 25. зависимости материалоемкости от толщины пластины фланца

26. Распределение напряжений Рис. в прорезном фланцевом узле с ребрами жесткости





Рис. 27. Распределение напряжений: а – в теле трубы; б – в пластине фланца; в – в сварном шве; г – в ребре жесткости

Рис. 28. График зависимости напряжения в теле трубы от толщины пластины фланца



370.7 370,7 370.7 350,0 \∐a 300,0 248,8 248,8 248,8 250,0 200 176.1 150,0 27 36 Толц в пластине ребра жесткости симальное эн Предел текучести стали трубы C255 Предел прочности стали трубы С255

Рис. 29. График зависимости напряжения в Рис. 30. График зависимости напряжения пластине фланца от его толщины

в ребре жесткости от толщины пластины фланца





Рис. 31. График зависимости напряжения в сварном шве от толщины пластины фланца

Рис. 32. График зависимости растягивающего усилия в болтах от толщины пластины фланца





Рис. 33. График зависимости несущей способности от толщины пластины фланца

Рис. 34. График зависимости материалоемкости от толщины пластины фланца

	370,7	370,7	370,7	370,7	370,7			
350.0								
JW ' 300,0								
WCII	249,0	249,0	249,0	249,0	249.0			
E 230,0	248,8	248,8	248,8	248,8	248,8			
Ha	201.5	202.0	202,7	203.7	204			
200,0	200,3	200,7	201,3	202,3	202,5			
		Толщина фланца, мм						
150.0	25	27	50	16	40			
 Певрорезной флануевый узел без ребер жесткости 	201,5	202,0	202,7	203,7	204,2			
Прорезной фланцизый узел без ребер жесткост	a 200,3	200,7	201,3	202,3	202,9			
 Непрорежной фланценала улеп с ребрами жестности 	249,0	249,0	249,0	249,0	249,0			
Прорезной фазицинай узел с ребрами нестнос	ти 249,0	249,0	249,0	249,0	249,0			
Предел техучести стали трубы С255	248,8	248,8	248,8	248,8	248,8			
	\$70.7	\$70.7	370.7	370.7	370.7			

	110,0	***,0	110,0		
450,0 #					
400,0 -					
a 350,0	297.6	297.6	297.6	207.6	297.6
300,0					
250,0	220 4	205.4			
₿ 200,0 	239,0		166.8		
S 150,0 -	129,0	134,1			
E. 100.0		And in case of the local division of the loc	103.7	77.7	
50.0	101,6	No.8		00,5	56.2
Η	Тол	щина фланца, м	4M 69,5	47,9	41,0
0,0 -	25	27	30	16	40
 Непререзной фланцевый узел без ребер анстиости 	159,6	194,1	103,7	66,3	56,2
 Прорезной фланцинай узлабез ребер жесткости 	239,6	206,4	165,8	109,5	92,7
 Непреренной фланцевый узел с ребраны жестности 	101,6	85,8	69,5	47,9	41,0
Прорелиой физицений узел с ребрани нестиости	121,9	107,5	89,2	60,1	55,4
 Предел текучести стали физица С345 	297,6	297,6	297.6	297,6	297.6
December of the second se	448.8	448.8	448.8	448.8	645.5

Рис. 35. График зависимости напряжения в теле трубы от толщины пластины фланца

Рис. 36. График зависимости напряжения в пластине фланца от его толщины



		243.0	242,3	241,5	240,5	240,1		
	240,0 4	241,2	240,7	240,2	239,6	239,4		
ella.	230,0							
C'all	220,0	215,6	215.6	215.6	215.6			
wei .	210,0	214.0	-211,7	208,8				
di di		210,5	207,9	205.2	204,8			
Ha	200,0				201,7	200,3		
		Толщина фланца, мм						
	190.0	25	27	30	36	4)		
 Непрорезний физицений узел без ребер жесткости 		241,2	240,7	240,2	239,6	239,4		
Прорежкй филиевый узенбез ребер жесткости		243,0	242,3	241,5	240,5	240,3		
 Непрорезной физительній узел с ребрами акстакости 		210,3	207,9	205,2	291,7	200,5		
Проредняй филисовай уред с ребрама на	214,0	211,7	208,8	294,8	203,0			
b	*****	22.4.4	114.6	227.4	215.4	714.4		

Рис. 37. График зависимости напряжения в ребре жесткости от толщины пластины фланца

Рис. 38. График зависимости напряжения в сварном шве от толщины пластины фланца

,	\						194.0	194.0	1010	193.8	
E 200	208,2					2 190.0					193,8
2 200		193.4				2	190,1	192,4			
8 180		1000				8 170,0					
8	165,1		174.3			ē					
5 160		152.3				ğ 150,0					
B			136,5 1	53,5	140,1	5 130.0					
g 140 T	128,3	121.7		120.0			112.0	113,8	115,9	118,8	120,1
H 120 -				120.9		5. 110,0	106.0		110.0		16,4
E	119,6	1110	113.9	105,3	13,3	°H		108,3 To	пцина фланца	, MM	~
Q 100 -			1001		103,4	90,0	25	27	30	36	40
P-		Толи	цина фланца, мм	96,2	92,0	Henpopessatt datastiesatt yiet des pedep mectionetti	112,0	113,8	115,9	118,8	120,1
80 -	23	27	33	35	40 -		106,0	108,3	110,9	114,6	116,4
Непрорезкий фланкскый узел без ребер жесткости	165,1	152,3	136,5	120,9	113,3	Непрорезний фландевый узел с ребрани жесткости	194,0	194,0	194,0	193,8	193,8
Прорезной фланцевый узел без ребер жесткости	208,2	193,4	174,3	153,5	146,1	Прорезной фланцений умя с реброня нестности	190,1	192,4	194,0	193,8	193,8
Неврорезки филосеки унстеребрана жестности	119,6	113.0	105,1	96,2	92,9						
The second descent of some sections are sections and the second s	128.3	121.7	113.9	106.3	103.2						

усилия в болтах от толщины пластины фланца

Рис. 39. График зависимости растягивающего Рис. 40. График зависимости несущей способности от толщины пластины фланца



Рис. 41. График зависимости материалоемкости от толщины пластины фланца



В *IDEA StatiCa* были рассчитаны 4 исполнения фланцевых узлов (непрорезной узел без ребер жесткости, прорезной узел с ребрами жесткости, непрорезной узел с ребрами жесткости) при следующих толщинах фланца: 25, 30, 27, 30, 40 мм. Рассмотрен характер напряжений в элементах каждого типа исполнения узла при толщине фланца 30 мм (рис. 1–2; 9–10; 17–18; 26–27 цв. вклейки). Для упрощения расчета материалоемкости длина труб принята 1 м.

1. Непрорезной фланцевый узел без ребер жесткости

Максимальные напряжения наблюдаются в сварном шве – 240,2 МПа. В местах сварки тела трубы и фланца наблюдается локальная концентрация напряжений.

Наибольшие напряжения в пластине фланца достигаются в месте контакта с болтами растянутой зоны – 103,7 МПа, что меньше предела текучести стали С345 на 65,2 %.

Максимальные напряжения в теле трубы – 202,7 МПа, что меньше предела текучести стали C255 на 18,5 %.

Напряжение в сварке представлено на рис. 2 цв. вклейки и равно 240,2 МПа.

Несущая способность узла с фланцем толщиной 30 мм – 15,9 %.

Зависимости напряжения в теле трубы, в пластине фланца, в ребрах жесткости, напряжения в сварном шве присоединения трубы к фланцу, несущей способности и материалоемкости узла от толщины пластины представлены на рис. 3–8 цв. вклейки.

При увеличении толщины фланца напряжения в теле трубы незначительно увеличиваются от 201,5 до 204,2 МПа.

Напряжения в пластине фланца с увеличением его толщины уменьшаются от 159,6 до 56,2 МПа.

Напряжения в сварном шве практически не изменяются с увеличением толщины фланца и находятся в диапазоне от 241,2 до 239,4 МПа.

Максимальные растягивающие усилия в болтах уменьшаются при увеличении толщины фланца от 165,1 до 113,3 кН.

При увеличении толщины фланца несущая способность узла увеличивается со 112 до 120,1 %.

Материалоемкость узла с увеличением толщины фланца возрастает от 189,8 до 232,4 кг.

2. Прорезной фланцевый узел без ребер жесткости

Наибольшие напряжения в пластине фланца достигаются в месте контакта с болтами растянутой зоны – 166,8 МПа, что меньше предела текучести стали С345 на 44 %.

Максимальные напряжения в теле трубы – 201,3 МПа, что меньше предела текучести стали C255 на 19,1 %.

Максимальные напряжения наблюдаются в сварном шве – 241,5 МПа. В местах сварки тела трубы и фланца наблюдается локальная концентрация напряжений.

Напряжение в сварке представлено на рис. 10 цв. вклейки и равно 241,5 МПа. Несущая способность узла с фланцем толщиной 30 мм – 110,9 %.

Зависимости напряжения в теле трубы, в пластине фланца, в ребрах жесткости, напряжения в сварном шве присоединения трубы к фланцу, несущей способности и материалоемкости узла от толщины пластины представлены на рис. 11–16 цв. вклейки.

При увеличении толщины фланца напряжения в теле трубы незначительно увеличиваются от 200,3 до 202,9 МПа.

Напряжения в пластине фланца с увеличением его толщины уменьшаются от 239,6 до 92,7 МПа.

Напряжения в сварном шве незначительно уменьшаются с увеличением толщины фланца от 243,0 до 240,1 МПа.

Максимальные растягивающие усилия в болтах уменьшаются при увеличении толщины фланца от 208,2 до 146,1 кН.

При увеличении толщины фланца несущая способность узла увеличивается со 106 до 116,4 %.

Материалоемкость узла с увеличением толщины фланца возрастает от 175,9 до 210,2 кг.

3. Непрорезной фланцевый узел с ребрами жесткости

Максимальные напряжения наблюдаются в теле трубы – 249,0 МПа. В местах приварки ребер жесткости к трубе наблюдается локальная концентрация напряжений.

Наибольшие напряжения в пластине фланца достигаются в месте контакта с болтами растянутой зоны – 69,5 МПа, что меньше предела текучести стали C345 на 80 %.

Максимальные напряжения в теле трубы – 249,0 МПа, что превышает предел текучести стали C255 на 0,8 % и компенсируется пластикой.

Напряжение в сварке представлено на рис. 18 цв. вклейки и равно 205,2 МПа. Несущая способность узла с фланцем толщиной 30 мм – 194 %.

Зависимости напряжения в теле трубы, в пластине фланца, в ребрах жесткости, напряжения в сварном шве присоединения трубы к фланцу, несущей способности и материалоемкости узла от толщины пластины представлены на рис. 19–25 цв. вклейки.

Напряжения в теле трубы не зависят от изменения толщины фланца.

Напряжения в пластине фланца с увеличением его толщины уменьшаются от 101,6 до 41,0 МПа.

Напряжения в ребрах жесткости незначительно уменьшаются с увеличением толщины фланца от 181,0 до 176,1 МПа.

Напряжения в сварном шве незначительно уменьшаются с увеличением толщины фланца от 210,3 до 200,3 МПа.

Максимальные растягивающие усилия в болтах уменьшаются при увеличении толщины фланца от 119,6 до 92,0 кН.

Несущая способность узла не зависит от изменения толщины фланца и равна 193,8–194 %.

Материалоемкость узла с увеличением толщины фланца возрастает от 194,7 до 236,6 кг.

4. Прорезной фланцевый узел с ребрами жесткости

Максимальные напряжения наблюдаются в теле трубы – 249,0 МПа. В местах приварки ребер жесткости к трубе наблюдается локальная концентрация напряжений.

Наибольшие напряжения в пластине фланца достигаются в месте контакта с болтами растянутой зоны – 89,2 МПа, что меньше предела текучести стали СЗ45 на 70 %.

Максимальные напряжения в теле трубы – 249,0 МПа, что превышает предел текучести стали C255 на 0,8 % и компенсируется пластикой.

Напряжение в сварке представлено на рис. 27 цв. вклейки и равно 208,8 МПа. Несущая способность узла с фланцем толщиной 30 мм – 194 %.

Зависимости напряжения в теле трубы, в пластине фланца, в ребрах жестко-

\$

сти, напряжения в сварном шве присоединения трубы к фланцу, несущей способности и материалоемкости узла от толщины пластины представлены на рис. 28–34 цв. вклейки.

Напряжения в теле трубы не зависят от изменения толщины фланца.

Напряжения в пластине фланца с увеличением его толщины уменьшаются от 121,9 до 55,4 МПа.

Напряжения в ребрах жесткости незначительно уменьшаются с увеличением толщины фланца от 181,0 до 176,1 МПа.

Напряжения в сварном шве незначительно уменьшаются с увеличением толщины фланца от 214,0 до 203,0 МПа.

Максимальные растягивающие усилия в болтах уменьшаются при увеличении толщины фланца от 128,3 до 103,2 кН.

При увеличении толщины фланца несущая способность узла увеличивается со 190,1 до 193,8 %.

Материалоемкость узла с увеличением толщины фланца возрастает от 180,8 до 214,4 кг.

Сравнение результатов расчета

Зависимости напряжения в пластине фланца, напряжения в трубе, напряжения в ребрах жесткости, напряжения в сварном шве присоединения трубы к фланцу, максимальные растягивающие усилия в болтах от толщины фланца представлены на рис. 35–41 цв. вклейки.

1) Напряжения в теле трубы

В местах приварки ребер жесткости наблюдается локальная концентрация напряжений в теле трубы. В узлах без ребер жесткости локальная концентрация в теле трубы наблюдается в месте стыка ее с пластиной фланца.

Напряжения в теле трубы не зависят от толщины фланца.

Наибольшие напряжения в трубе наблюдаются в непрорезном и прорезном узлах с ребрами жесткости 249,0 МПа, при этом максимальные напряжения превышают расчетные сопротивления стали. Это незначительные области, и они компенсируются пластикой. В прорезном и непрорезном узлах без ребер жесткости напряжения наименьшие 202,9 и 204,2 МПа соответственно.

2) Напряжения в пластине фланца

Напряжения в пластине фланца во всех типах исполнения узлов максимальны в местах контакта с болтами.

При больших толщинах фланца уровень напряжения в нем (при непрорезном исполнении) с ребрами жесткости и без них почти одинаковый, но при уменьшении толщины фланца напряжение в узле без ребер жесткости растет быстрее.

Максимальные напряжения наблюдаются в прорезном узле без ребер жесткости. Напряжения в прорезном узле с ребрами жесткости схожи с напряжениями непрорезных узлов.

3) Напряжения в ребрах жесткости

Напряжения в ребрах жесткости у прорезного и непрорезного узлов практически одинаковы и равны 177,9 и 176,1 МПа соответственно.

4) Напряжения в сварном шве

Наибольшие напряжения в сварном шве наблюдаются в прорезном узле без ребер жесткости – 240,1 МПа, далее в непрорезном узле без ребер жесткости – 239,4 МПа, затем в прорезном узле с ребрами жесткости – 203,0 МПа. В непрорезном узле с ребрами жесткости напряжения в сварке наименьшие – 200,3 МПа.

5) Растягивающие усилия в болтах



Наименьшие растягивающие усилия в болтах наблюдаются при максимальной толщине фланца 40 мм. В порядке убывания величин растягивающих усилий в болтах узлы идут в следующей последовательности: прорезной узел без ребер жесткости – 146,1 кН, далее в непрорезной узел без ребер жесткости – 113,3 кН, затем в прорезной узел с ребрами жесткости –103,2 кН. В непрорезном узле с ребрами жесткости растягивающие усилия в болтах наименьшие 92,0 кН.

6) Несущая способность

Наибольшей несущей способностью обладают непрорезной и прорезной фланцевые узлы с ребрами жесткости ≈194,0 %.

У непрорезного фланцевого узла без ребер жесткости несущая способность 112,0–120,1 %.

У прорезного узла без ребер жесткости несущая способность наименьшая 106,0-116,4 %.

7) Материалоемкость

Наиболее материалоемкий узел – непрорезной узел с ребрами жесткости 194,7–236,6 кг. Менее материалоемким является непрорезной фланцевый узел без ребер жесткости 189,8–232,4 кг. Далее прорезной узел с ребрами жесткости 180,8–214,4 кг. Наименее материалоемкий – прорезной узел без ребер жесткости 175,9–210,2 кг.

Площадь использования материала больше у прорезного узла без ребер жесткости, далее прорезного с ребрами жесткости, далее непрорезного без ребер жесткости, у непрорезного узла с ребрами жесткости площадь использования самая маленькая.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рекомендации по расчету, проектированию, изготовлению и монтажу фланцевых соединений стальных строительных конструкций / СО Стальмонтаж, Всесоюзный научноисследовательский и проектный институт «Промстальконструкция», Центральный Ордена Трудового Красного Знамени научно исследовательский и проектный институт строительных металлоконструкций имени Н. П. Мельникова. – Москва, 1988. – 83 с. – Текст : непосредственный.

2. Беляев, Б. Ф. Исследование напряженно-деформированного состояния монтажных узлов высотных сооружений в связи с оценкой их несущей способности и долговечности / Б. Ф. Беляев, В. В. Евдокимов, Б. В. Остроумов. – Текст : непосредственный // Научные испытания, инструментальные наблюдения и контроль строительный металлоконструкций при возведении и эксплуатации инженерных сооружений. – Москва, 1990. – С. 34–47.

3. Бирюлев, В. В. Стальные фермы с коробчатыми сечениями стержней, сваренных из уголков / В. В. Бирюлев, И. Н. Чернов. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1973. – № 4. – С. 8–14.

4. Вернер, Ф. Допустимые усилия в узлах решетчатых конструкций без элементов жесткости при примыкании раскосов к стенке поясов из прокатного профиля / Вернер Франк ; Московский инженерно-строительный институт имени В. В. Куйбышева. – Москва : [б. и.], 1978. – 19 с. – Текст : электронный // Библиотека диссертаций.. – URL: http://www. dslib.net.

5. Галатенко, В. А. Исследование металлических ферм из прямоугольных труб, сваренных из прокатных уголков : специальность 05.23.01 : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Галатенко Василий Алексеевич. – Новосибирск, 1982. – 21 с. – Текст : непосредственный.

6. Гарф, Э. Ф. Исследования конструктивной прочности сварных узлов и элементов из гнутых профилей замкнутого сечения : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.23.01 / Гарф Эдуард Феофилович. – Киев, 1970. –



19 с. – Текст : непосредственный.

7. Брудка, Я. Трубчатые стальные конструкции / Я. Брудка. – Москва : Стройиздат, 1975. – 209 с. – Текст : непосредственный.

8. Воронецкий, А. Е. Исследование кинетики напряженно-деформированного состояния узлов ферм из гнутосварных профилей / А. Е. Воронецкий, Б. Ф. Беляев. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1986. – № 5. – С. 32–46.

9. Перельмутер, А. В. Расчетные модели фланцевых соединений рамных узлов металлических конструкций и их программная реализация в «SCAD Office» / А. В. Перельмутер, Э. З. Крискунов, В. В. Юрченко. – Текст : непосредственный // CADMaster. – 2010. – № 3. – С. 110–115.

10. Шкода, И. В. Сравнительный анализ различных вариантов исполнений фланцевого узла / И. В. Шкода, Е. Н. Облетов. – Текст : непосредственный // Студенческий вестник. – 2020. – № 16 (114), часть 8. – С. 11–16.

11. Расчет узлов стальных конструкций компонентным методом конечных элементов. – URL: http://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=20749 (дата обращения: 23.08.2020). – Текст : электронный.

12. Анализ деформативно-прочностных характеристик монтажного узла ребристо-кольцевого купола из трубчатого профиля / П. А. Хазов, И. В. Шкода, Е. Н. Облетов, И. А. Самохвалов. – Текст : непосредственный // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2020. – № 3(55). – С. 28–34.

13. Ерофеев, В. И. Напряженно-деформированное состояние узла ребристо-кольцевого купола при различных вариантах сопряжения элементов / В. И. Ерофеев, П. А. Хазов, И. В. Шкода. – Текст : непосредственный // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2020. – № 4(56).– С. 42–48.

SHKODA Irina Vasilevna, postgraduate student¹, assistant of the chair of theory of structures and technical mechanics²; LAMPSI Boris Borisovich², candidate of physical and mathematical sciences, associate professor of the chair of theory of structures and technical mechanics; ISAEVA Ekaterina Pavlovna², student

NUMERICAL ANALYSIS OF VARIANTS OF FLANGE ASSEMBLIES OF A RIBBED-RING DOME SYSTEM

¹Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences – Branch of Federal Research Center "Institute of Applied Physics of the RAS"
85, Belinsky St., Nizhny Novgorod, 603024, Russia, Tel.: +7 (831) 432-05-76; e-mail: ShkodaIrinaVasil@yandex.ru
²Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering
65, Iljinskaya St., Russia, Nizhny Novgorod, 603950, Tel.: +7 (831) 430-54-96; e-mail: boris-lampsi@yandex.ru, isvrina@yandex.ru *Key words:* flange node, ribbed-ring dome, stress-strain state.

The article provides a brief overview of flange connections. The calculation of flange nodes in the IDEA Static software is performed: non-slotted and slotted flange nodes without stiffeners; non-slotted and slotted flange nodes with stiffeners. The calculation results are compared.

REFERENCES

1. Rekomendatsii po raschyotu, proektirovaniyu, izgotovleniyu i montazhu flantsevykh soedineniy stalnykh stroitelnykh konstruktsiy [Recommendations for the calculation, design, manufacture and installation of flange connections of steel building structures] / SO Stalmontazh,



Vsesoyuz. nauchno-issled. i proektny in-t Promstalkonstruktsiya, Tsentral. Ordena Trudov. Krasn. Znameni nauchno-issled. i proektny in-t stroit. metallokonstr. im. N. P. Melnikova. – Moscow, 1988, 83 p.

2. Belyaev B. F., Evdokimov V. V., Ostroumov B. V. Issledovanie napryazhyonnodeformirovannogo sostoyaniya montazhnykh uzlov vysotnykh sooruzheniy v svyazi s otsenkoy ikh nesuschey sposobnosti i dolgovechnosti [Investigation of the stress-strain state of the assembly units of high-rise structures in connection with the assessment of their bearing capacity and durability] / Nauchnye ispytaniya, instrumentalnye nablyudeniya i kontrol stroitelny metallokonstruktsiy pri vozvedenii i ekspluatatsii inzhenernykh sooruzheniy. – Moscow, 1990. – P. 34-47.

3. Biryulyov V. V., Chernov I. N. Stalnye fermy s korobchatymi secheniyami sterzhney, svarennykh iz ugolkov [Steel trusses with box-shaped cross-sections of rods welded of angles] / Izv. vuzov. Stroitelstvo i arkhitektura [News of higher educational institutions. Construction and architecture]. -1973. - N = 4. - P. 8-14.

4. Verner F. Dopustimye usiliya v uzlakh reshyotchatykh konstruktsiy bez elementov zhyostkosti pri primykanii raskosov k stenke poyasov iz prokatnogo profilya [Permissible forces in the nodes of lattice structures without rigidity elements when the braces are adjacent to the wall of the belts of rolled profile] // Moskov. inzhener.-stroit. in-t im. V. V. Kuybysheva. – Moscow, 1978. – 19 p. Biblioteka dissertatsiy. URL : http://www.dslib.net.

5. Galatenko V. A. Issledovanie metallicheskikh ferm iz pryamougolnykh trub, svarennykh iz prokatnykh ugolkov [Investigation of metal trusses made of rectangular pipes welded of rolled L-bars] : spetsialnost 05.23.01 : avtoref. dis. ... kand .tekh. nauk. – Novosibirsk, 1982, 21 p.

6. Garf E. F. Issledovaniya konstruktivnoy prochnosti svarnykh uzlov i elementov iz gnutykh profiley zamknutogo secheniya [Studies of the structural strength of welded assemblies and elements made of bent profiles of closed section] : avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk : 05.23.01. – Kiev, 1970, 19 p.

7. Brudka Ya. Trubchatye stalnye konstruktsii [Tubular steel structures]. - Moscow : Stroyizdat, 1975, 209 p.

8. Voronetsky A. E., Belyaev B. F. Issledovanie kinetiki napryazhyonno-deformirovannogo sostoyaniya uzlov ferm iz gnutosvarnykh profiley [Investigation of the kinetics of the stress-strain state of truss assemblies made of bent-welded profiles] / Izv. vuzov. Stroitelstvo i arkhitektura [News of higher educational institutions. Construction and architecture]. – 1986. – N_{2} 5. – P. 32–46.

9. Perelmuter A. V., Kriskunov E. Z., Yurchenko V. V. Raschyotnye modeli flantsevykh soedineniy ramnykh uzlov metallicheskikh konstruktsiy i ikh programmnaya realizatsiya v "SCAD Office" [Calculation models of flange connections of frame assemblies of metal structures and their software implementation in "SCAD Office"] / CADMaster. -2010. - N = 3. - P. 110-115.

10. Shkoda I. V., Oblyotov E. N. Sravnitelny analiz razlichnykh variantov ispolneniy flantsevogo uzla [Comparative analysis of various versions of a flange assembly] / Studencheskiy vestnik [Student bulletin]. – 2020. № 16(114). Chast 8. – P. 11–16.

11. Raschyot uzlov stalnykh konstruktsiy komponentnym metodom konechnykh elementov [Calculation of steel structure components by the component finite element method] – URL: http://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=20749 (data obrascheniya 23.08.2020).

12. Khazov P. A., Shkoda I. V., Oblyotov E. N., Samokhvalov I. A. Analiz deformativnoprochnostnykh kharakteristik montazhnogo uzla rebristo-koltsevogo kupola iz trubchatogo profilya [Analysis of deformation-strength characteristics of a sub-assembly of a ribbed-annular dome of a tubular profile] / Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal] / Nizhegorod. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. – Nizhny Novgorod, 2020. – $N \ge 3(55)$. – P. 28–34.

13. Erofeev V. I., Khazov P. A., Shkoda I. V. Napryazhyonno-deformirovannoe sostoyanie uzla rebristo-koltsevogo kupola pri razlichnykh variantakh sopryazheniya elementov [The stress-strain state of a ribbed-ring dome joint in various variants of element coupling] / Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal] / Nizhegorod. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. – Nizhny Novgorod, 2020. – № 4(56). – P. 42–48.

© И. В. Шкода, Б. Б. Лампси, Е. П. Исаева, 2022

Получено: 28.03.2022 г.