



УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
НЕФТЯНОЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

# ОПТИМИЗАЦИЯ УЗЛОВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ОПОРНЫХ МАЧТ

Выпускная квалификационная работа  
(магистерская диссертация)  
по направлению подготовки 08.04.01 «Строительство»,  
магистерская программа «Промышленное и гражданское строительство»

Студент группы МПГ01-18-01    И. В. Корокозов

Научный руководитель  
проф., канд. техн. наук, доц.    А. А. Семенов

Уфа, 2020 г.



## АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ:

- На сегодняшний день напряженно-деформированное состояние узлов изучено недостаточно. Наиболее надежным методом исследования является конечно-элементное моделирование на ЭВМ. Отдельной проблемой является учет фактической жесткости соединений при расчете конструкции в целом.

## ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

- Исследование напряженно-деформированного состояния узлов опорной мачты с помощью методов конечно-элементного моделирования.

## РЕШАЕМЫЕ ЗАДАЧИ:

- Разработка конечно-элементных моделей расчетных схем соединений элементов мачты, из оболочечных элементов, позволяющих учесть физическую нелинейность материала в расчетных комплексах IDEA statica и SCAD;
- Сравнение результатов конечно-элементного расчета соединения с результатами «ручного» (инженерного) расчета;
- Разработка эффективных решений узлов по сравнению с первоначальным вариантом;
- Разработка конечно-элементной модели сооружения, учитывающей фактическую жесткость соединений;
- Сравнение результатов расчета модели мачты, учитывающей податливость, с результатами, полученными при расчете сооружения с использованием классических абстракций шарниров и жестких заделок.

### НОВИЗНА РАБОТЫ:

- Предложено новое решение узла фланцевого стыка элементов металлоконструкций из труб круглого сечения.

### ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ:

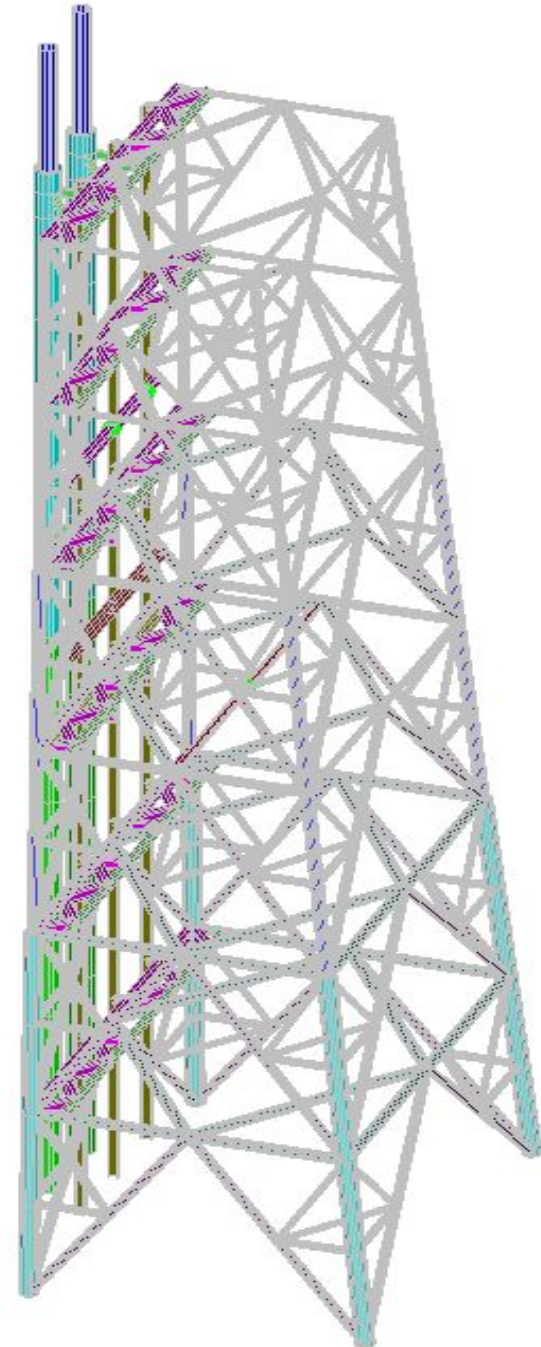
- Практическая значимость работы заключается в разработке улучшенных решений узлов металлоконструкций из труб круглого сечения и методов конечно-элементного моделирования пространственных стержневых конструкций.

### ПУБЛИКАЦИИ:

- Корокозов И.В., Семенов А.А. // Оптимизация раскрыя фланцев для соединения металлических конструкций из труб круглого сечения. // Проблемы строительного комплекса России : материалы XXIX Всерос. науч.-техн. конф., посвящ. 75-летию победы в ВОВ, г. Уфа, 31 марта 2020 г. / УГНТУ. - Уфа, 2020 - С. 225-227.
- Корокозов И.В. // Сравнение расчета фланцевого соединения металлических конструкций из труб круглого сечения. // В кн.: XIII Междандродная конференция молодых ученых "Актуальные проблемы науки и техники - 2020": материалы. Уфа: Уфим. гос. нефт. техн. университет, 2020. (в печати <https://trello.com/c/IMXJGQzv/770-s4-0-23-корокозов-игорь-владимирович>)

## Краткая характеристика объекта исследования

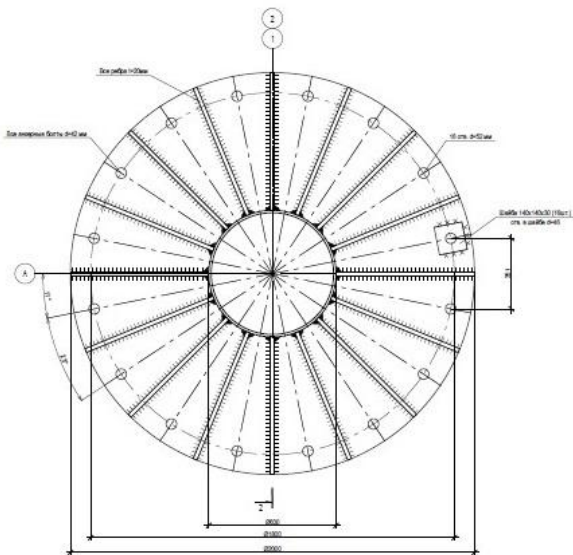
- В качестве объекта исследования была выбрана решетчатая опора башенного типа со стволом квадратного сечения высотой 45 250 мм, несущая факельные стволы для сжигания попутного газа.
- Предполагаемый район строительства – Амурская область.
- Предусматриваются 2 факельных ствола диаметром 920 мм.
- Основные загрузки: ветер, температурное технологическое воздействие, сейсмическое воздействие.
- Все элементы, за исключением поясов по несущей стороне, из труб круглого сечения, пояса – двутавр 40Ш1.



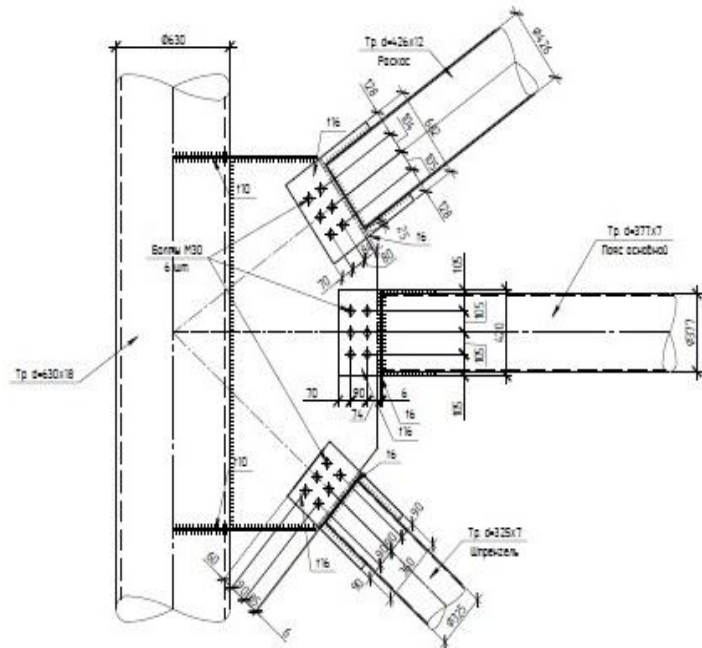
# 5

## Первоначальная конструкция узлов

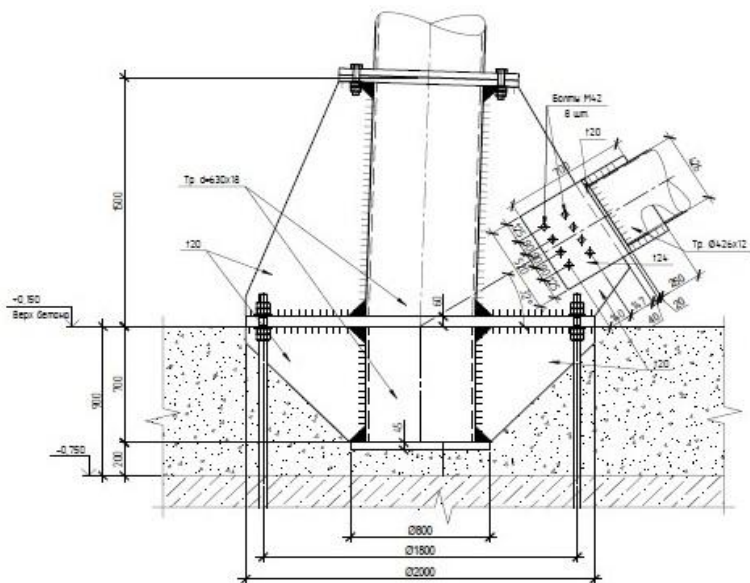
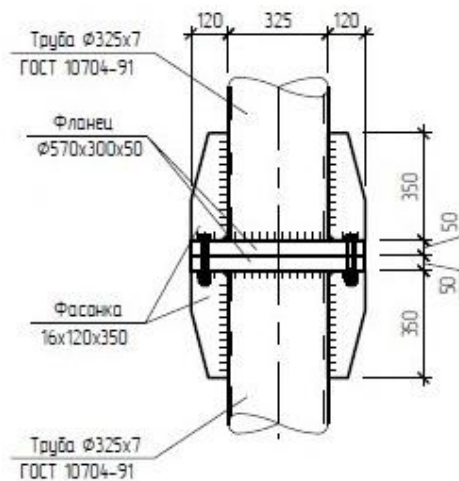
1)



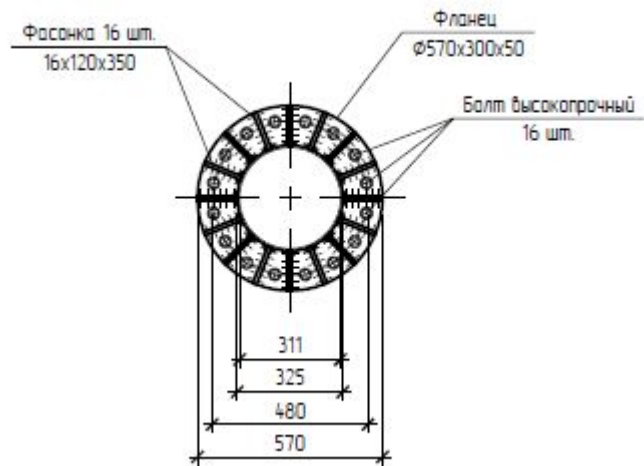
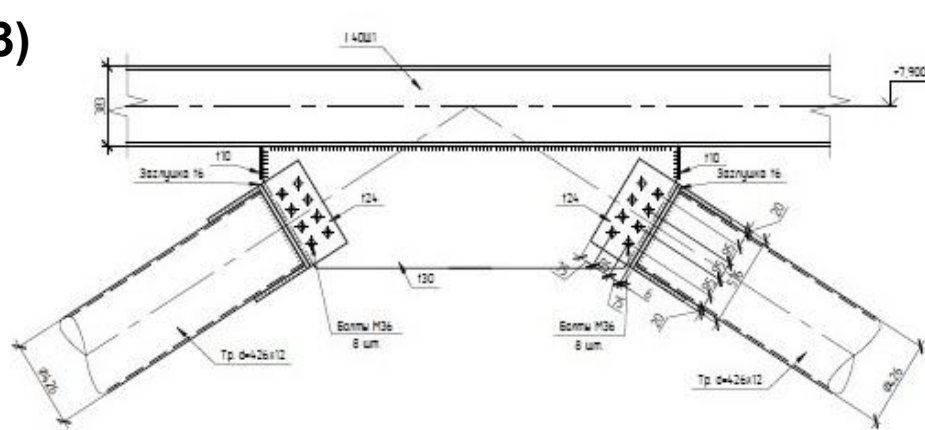
2)



4)

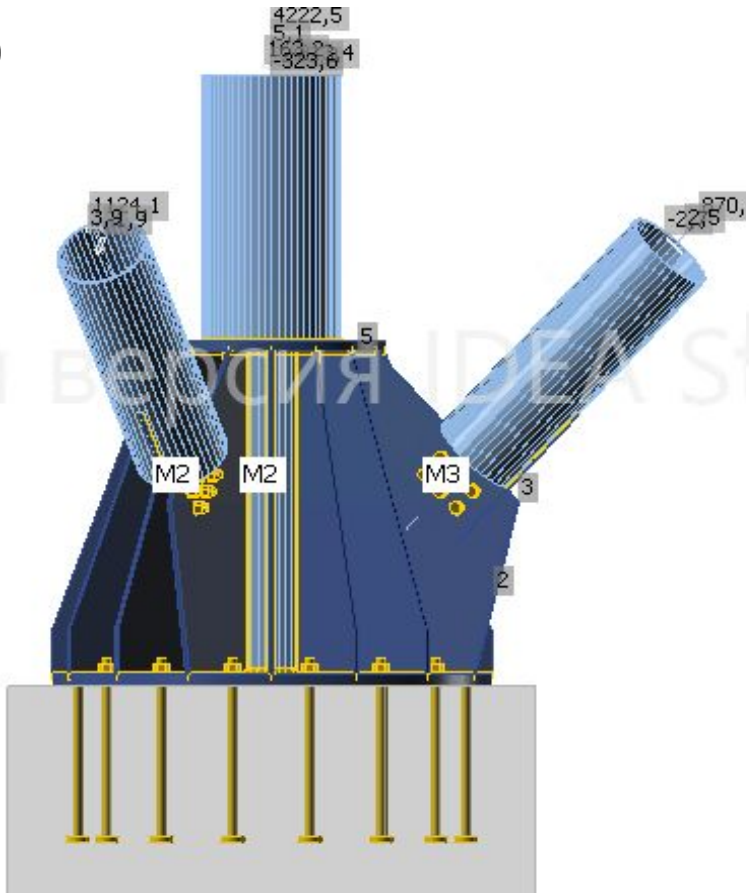


3)

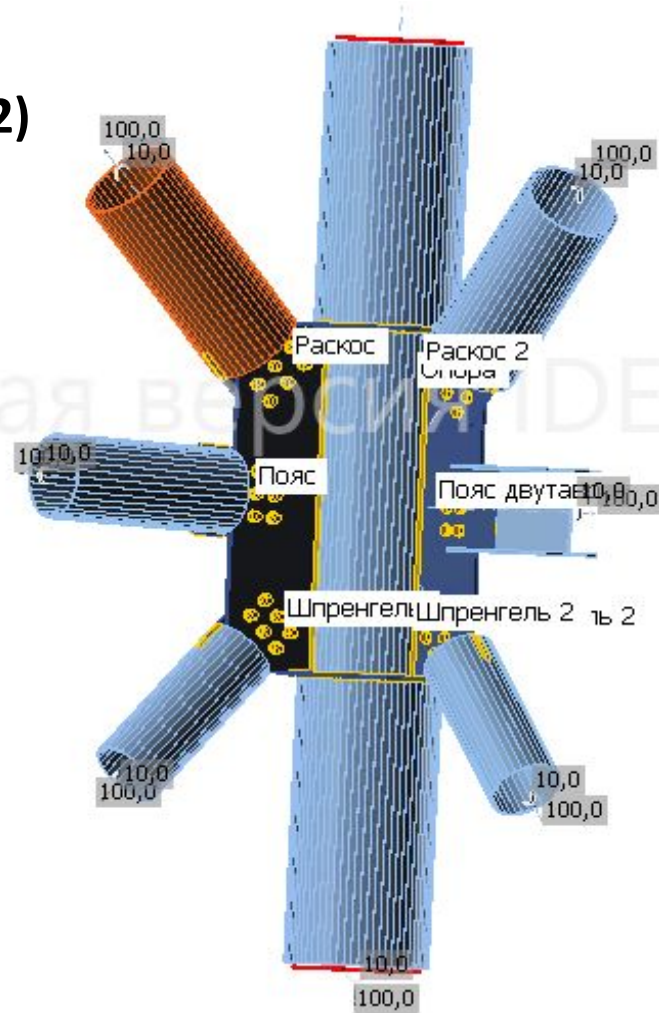


# Конечно-элементные модели узлов

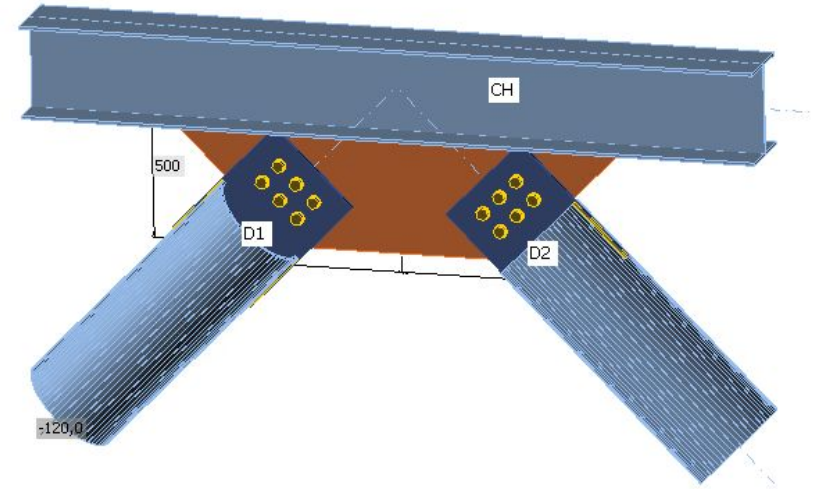
1)



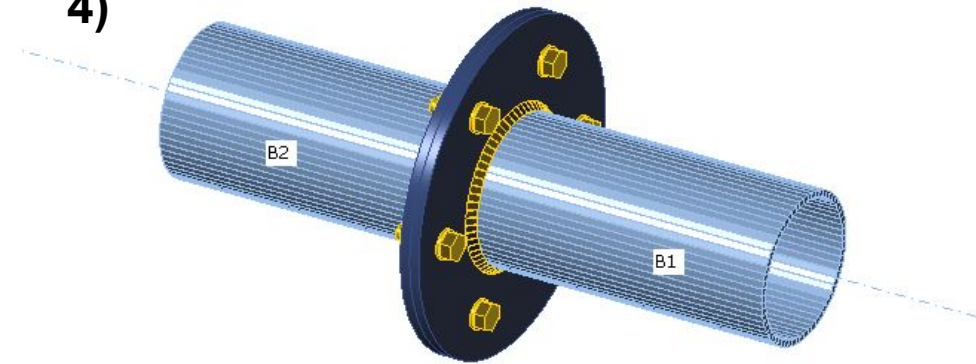
2)



3)



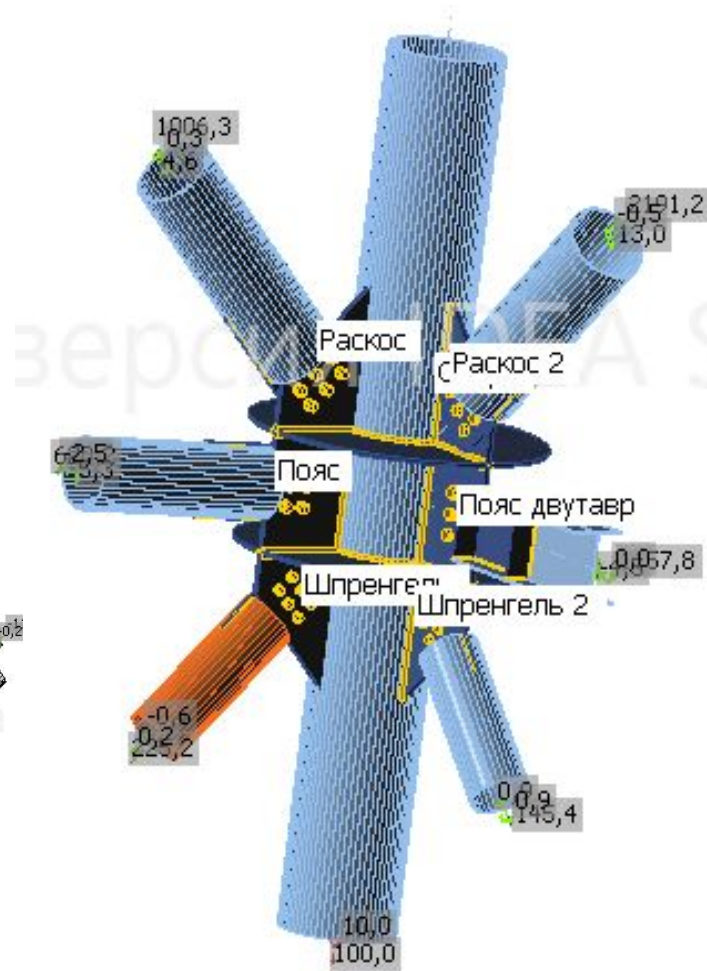
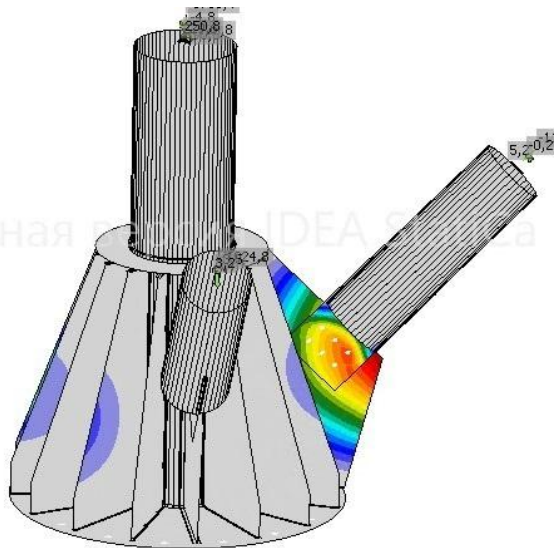
4)



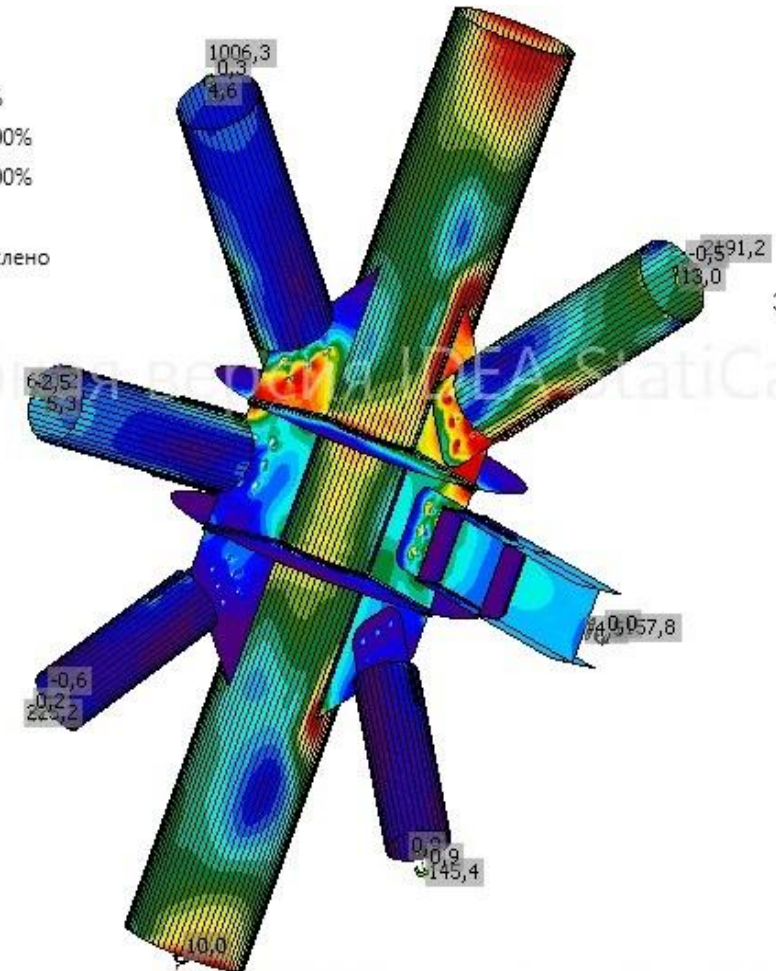
# Результаты расчета

Местная потеря устойчивости узла

	Нагрузки	Форма	Коэффициент
	LE4	1	11,24
		2	11,51
>		3	11,77
		4	11,82
		5	11,96
		6	12,63



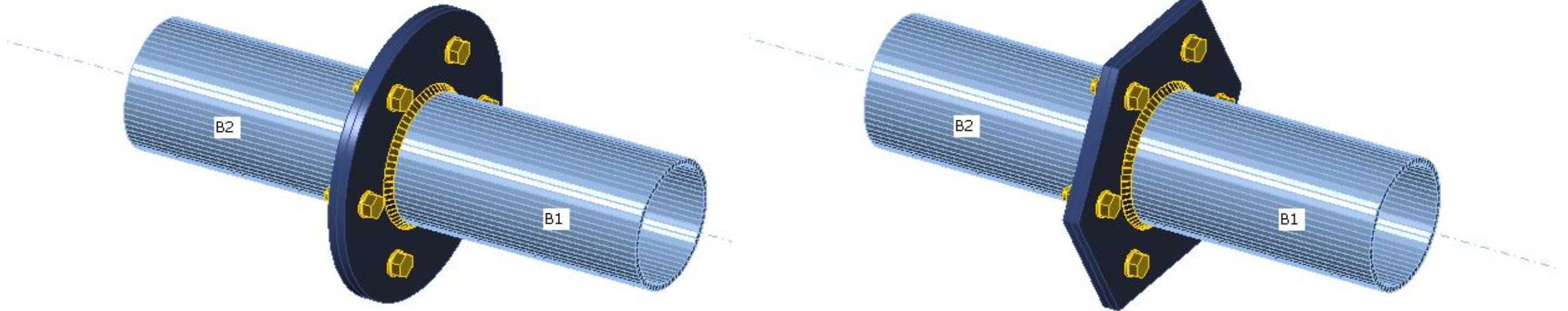
Расчёт	✓	100,0%
Пластины	✓	1,3 < 5%
Болты	✓	99,9 < 100%
Сварные швы	✓	99,6 < 100%
Устойчивость		4,73
GMNA		Не вычислено



## Оптимизация фланцевого стыка

В третьей главе была произведена оптимизация узла стыка элементов опоры. Вместо традиционной круглой формы фланцев для решения узла на шести болтах была предложена шестиугольная форма.

Произведен анализ раскроя стального листа для изготовления фланцев для двух вариантов конструкции.

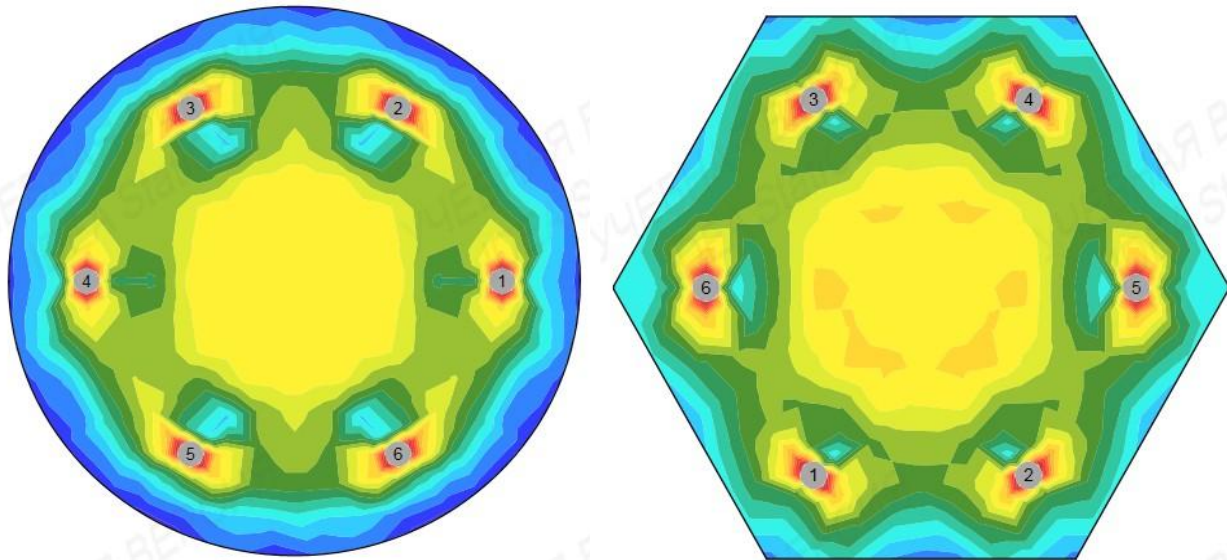




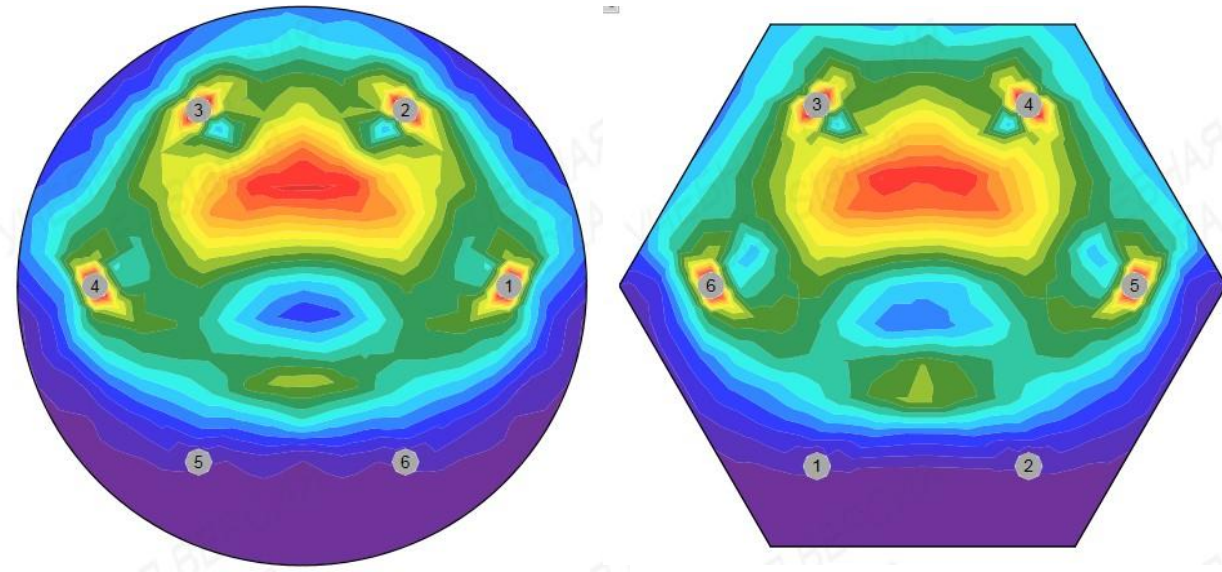
# Сравнение напряжений во фланцах

- Уменьшение расчетной несущей способности при действии продольной силы находится в пределах 1%, при сопутствующем действии изгибающего момента – в пределах 3%. Увеличение усилий в болтах по сравнению с типовыми решениями составляет до 5%, напряжения от изгиба фланцев и напряжения в сварных швах практически не изменились.
- Разница в расходе материала на один фланец составила 10 %.

Сравнение эквивалентных напряжений во фланце для растягивающего усилия



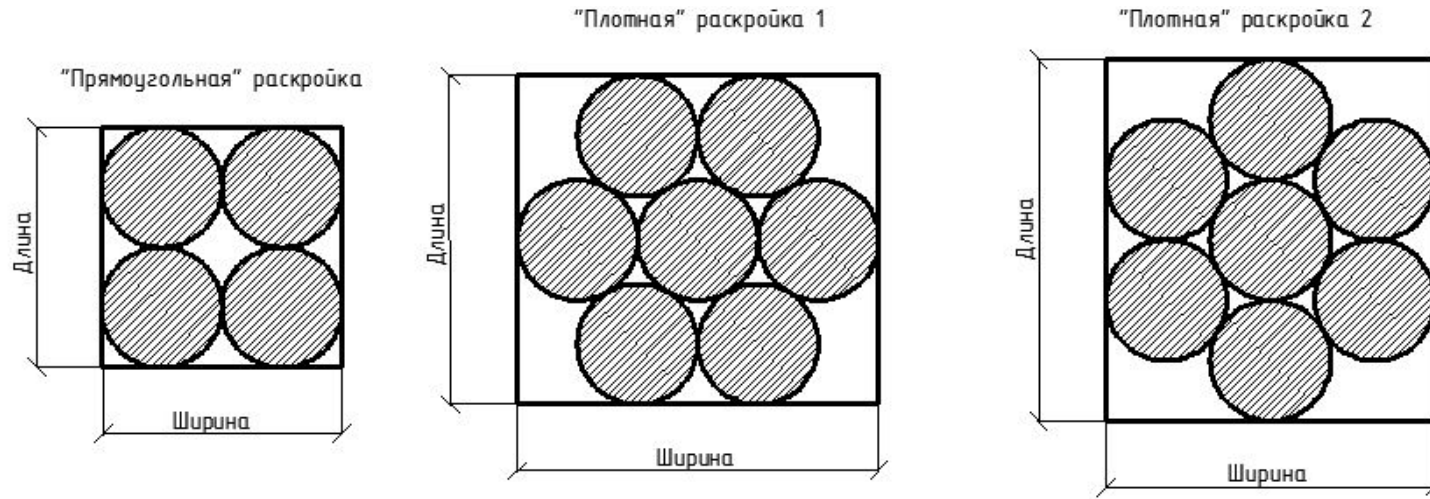
Сравнение эквивалентных напряжений во фланце для изгибающего усилия



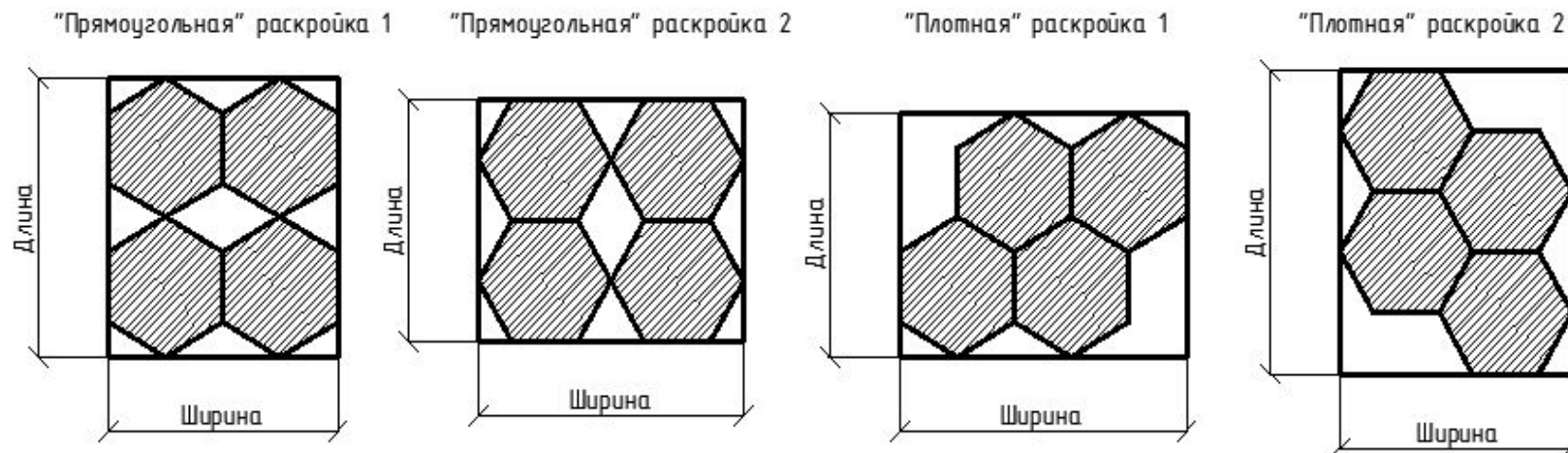


# Методы раскроя

Методы раскроя для круглых фланцев:

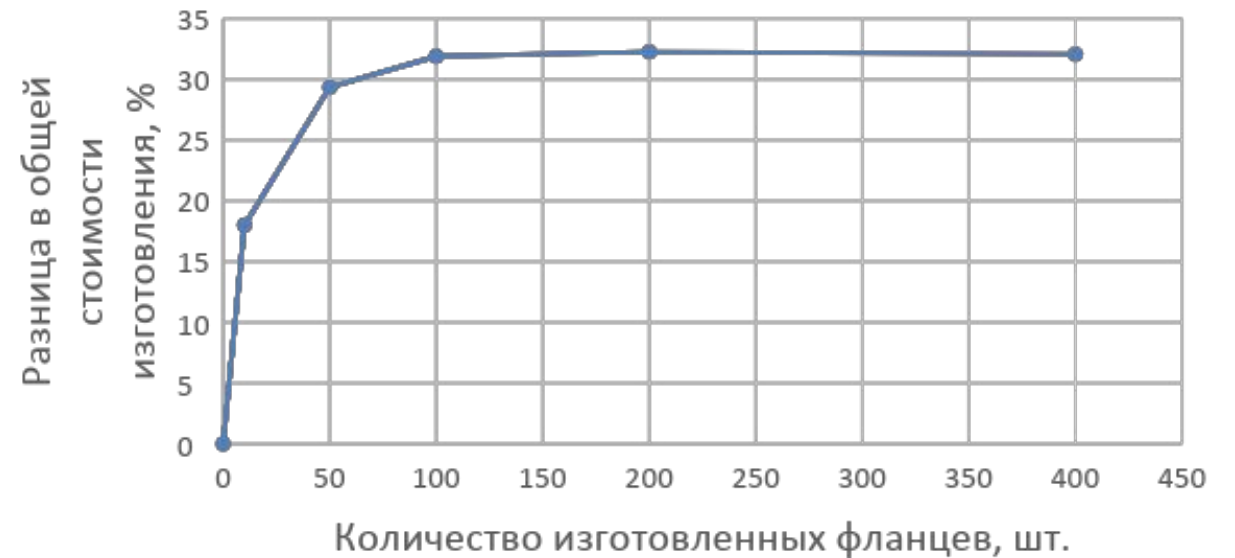
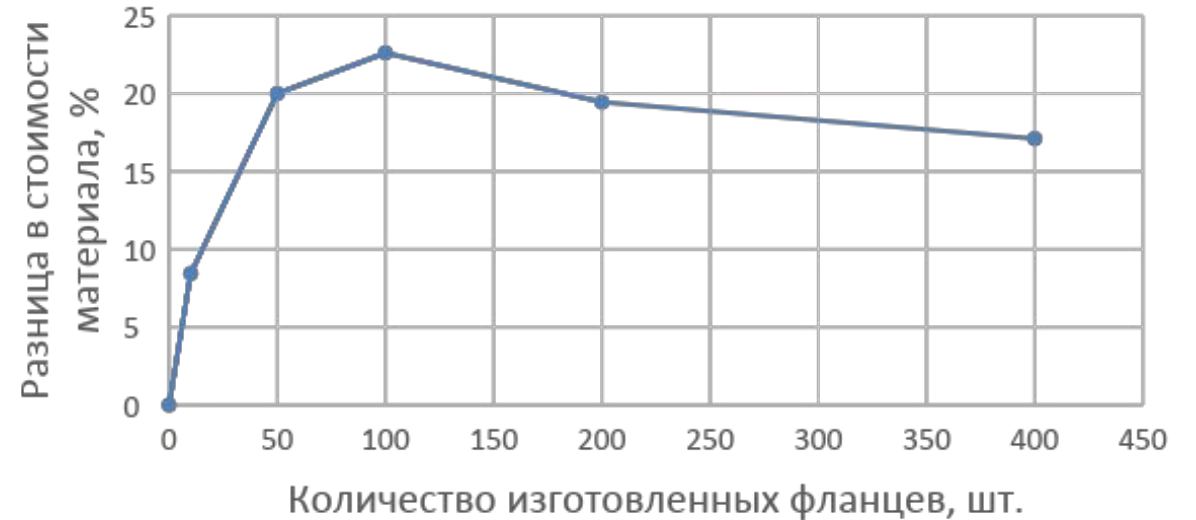
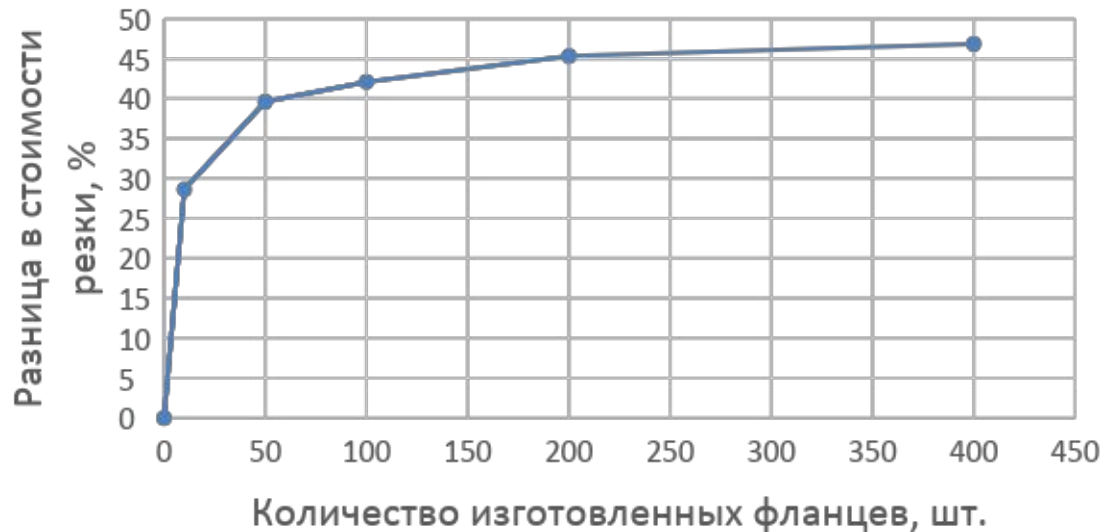


Методы раскроя листа для шестиугольных фланцев:



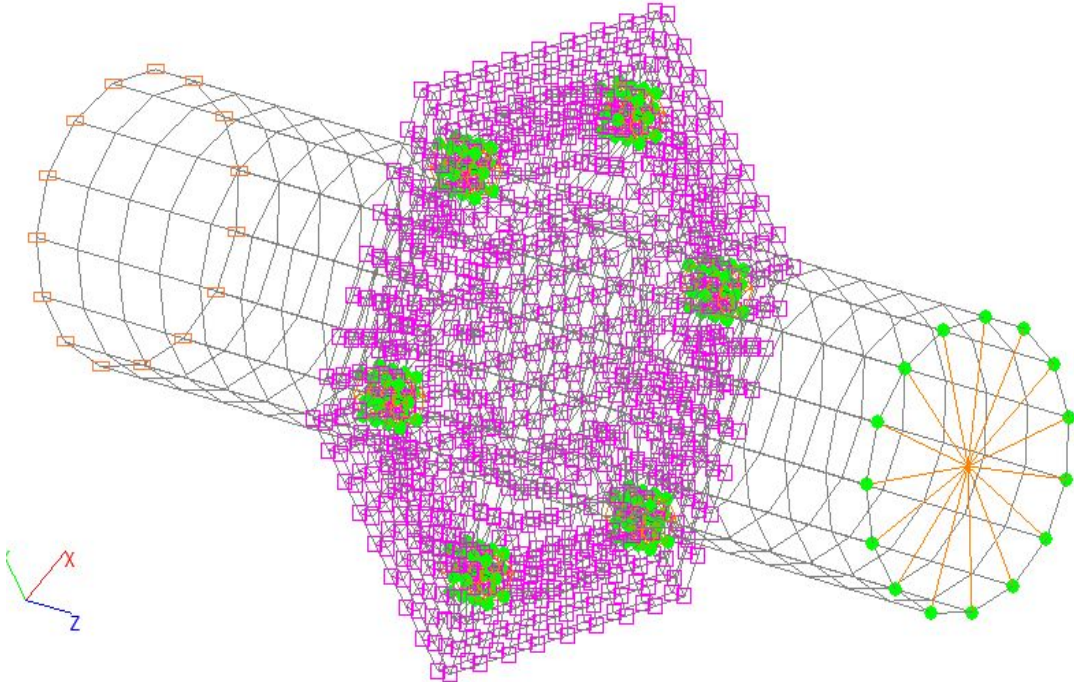
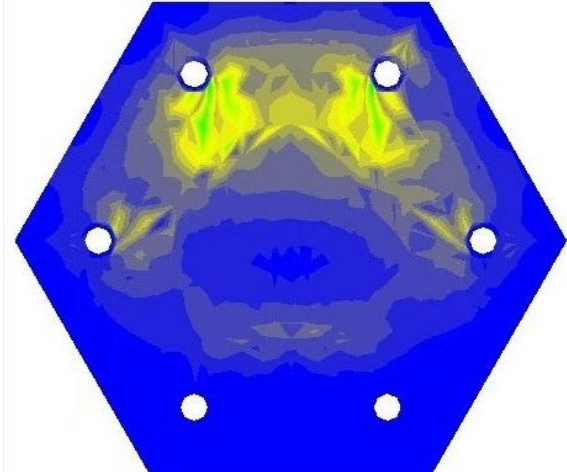
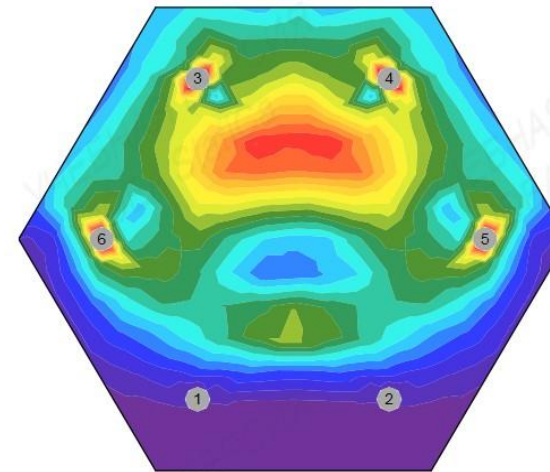
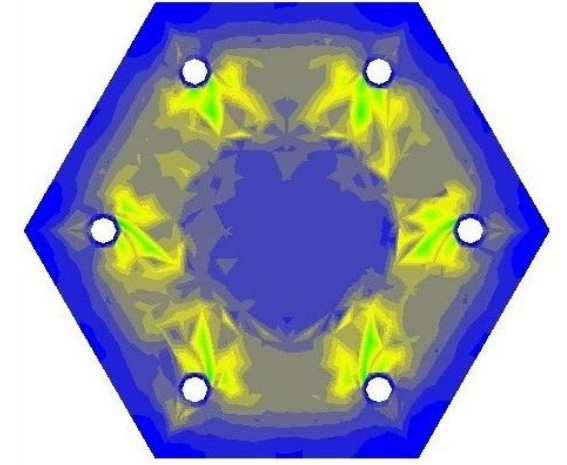
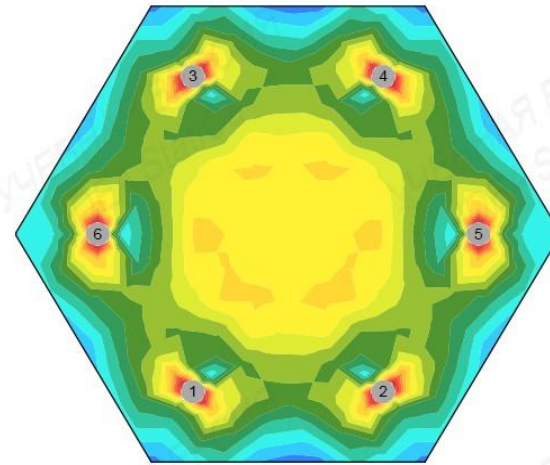
# Сравнение расходов на изготовление

Использование шестиугольных фланцев для варианта фланцевого соединения на шести болтах позволило сократить затраты на материал на **22 %**, затраты на резку металла – до **46 %**, общие затраты на производство - на **32 %**, по сравнению с традиционным круглым вариантом фланца (использовались средние цены второй четверти 2020 года).



# Сравнение расчетных моделей

- Для сравнения двух вариантов расчетных программ была создана модель соединения в программном комплексе SCAD из оболочечных конечных элементов с учетом физической нелинейности материала.
- Разница в результатах расчета фланцевого соединения в двух разных программах оказалось в пределах 10%.



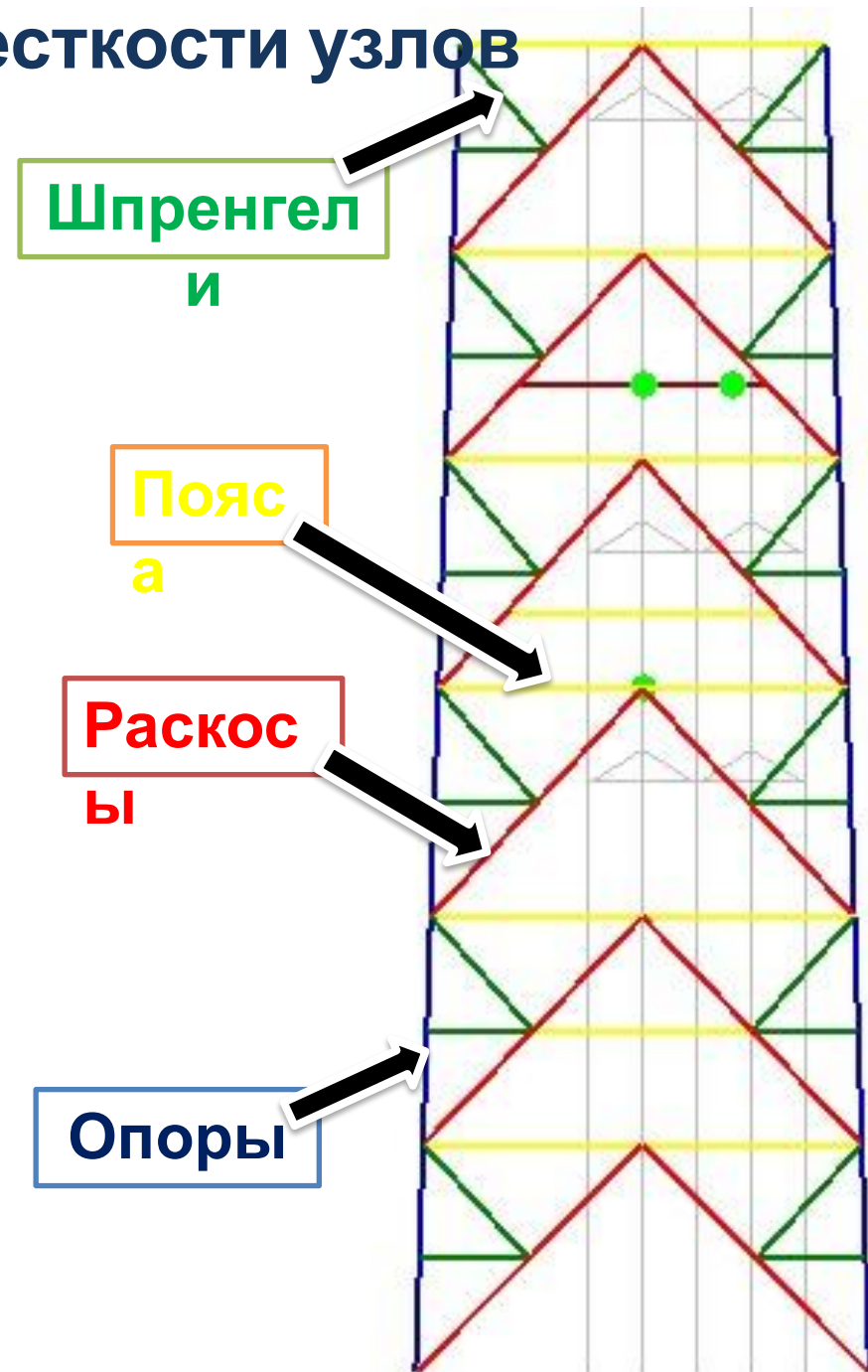
# 14 Расчет с учетом фактической жесткости узлов

В четвертой главе произведено сравнение двух расчетных схем мачты: изначальной схемы, использующей классические методы строительной механики: шарниры и жесткие заделки; и новой схемы, в которой учтена фактическая жесткость соединений.

Расчет произведен шагово-итерационным методом постепенного уточнения жесткостных характеристик узлов.

Рассматриваются следующие группы узлов:

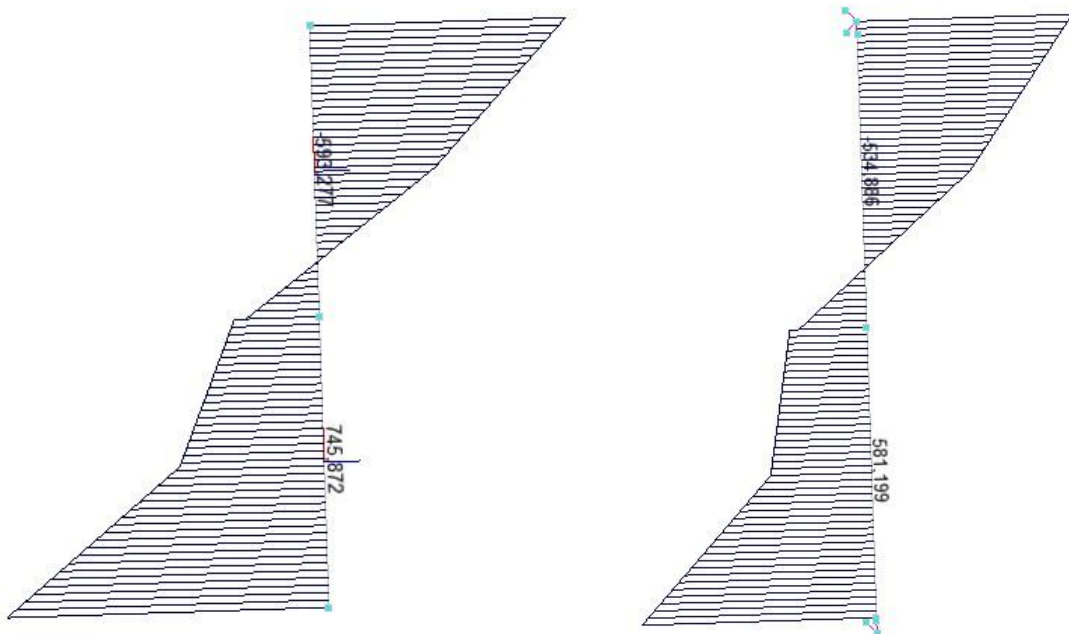
- Узел базы опоры;
- Примыкание раскосов к базам опор;
- Примыкание раскосов к опорам для нижней, средней и верхней секций;
- Примыкание раскосов к поясам для нижней, средней и верхней секций;
- Примыкание поясов к опорам для нижней, средней и верхней секций;
- Примыкание шпренгелей к опорам.



# Сравнение эпюр изгибающих моментов

По результатам расчета только 3 из 13 рассчитанных типов узлов можно в полном смысле назвать шарнирными в соответствии с требованиями Eurocode.

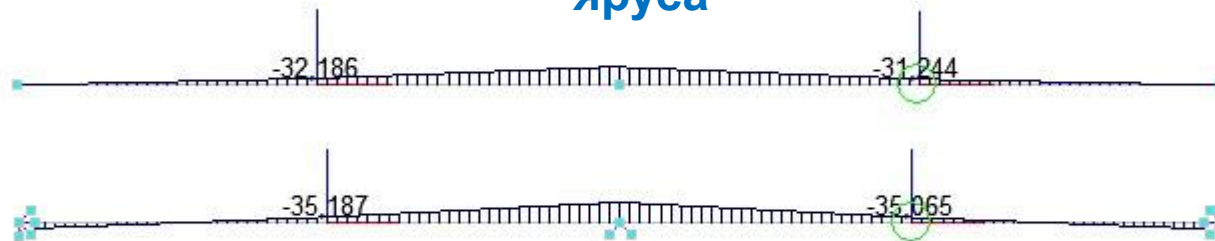
## Изменение изгибающего момента в нижней части опоры



## Изменение изгибающего момента в раскосах нижнего яруса



## Изменение изгибающего момента в поясе нижнего яруса



## факторам

- В среднем величина изменений критических факторов лежит в пределах 5 %.
- Для ряда элементов коэффициент использования по основному критическому фактору стал меньше (например, для опор, рис. , с 0,97 до 0,91).
- Для некоторых элементов (например, для раскосов 426x12) увеличение пролетного момента не привело к значительным изменениям основного критического фактора.
- Для раскосов верхней половины мачты произошли значительные изменения, в том числе и в сторону увеличения значения критического фактора (например, для раскосов 273x7 мм, с 0,84 до 0,95).

Группа элементов	Основной критический фактор	Шарнирная схема	Податливая схема	Разница
Опоры	Устойчивость при сжатии с изгибом в двух плоскостях	0,97	0,91	-0,06
Раскос 426x12		0,77	0,77	0
Раскос 325x7		0,89	0,82	-0,07
Раскос 273x7		0,84	0,95	0,11
Шпренгели		0,74	0,74	0
Пояс круглый 377x7		0,44	0,4	-0,04
Пояс круглый 273x7		0,76	0,75	-0,01
Пояс круглый 219x7		0,65	0,65	0
Пояс двутавр	Предельная гибкость свеса полки из условия местной устойчивости	0,91	0,92	0,01
Среднее				-0,01



## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

- Предложено новое решение фланцевого стыка элементов опор по длине, отличающееся от стандартного решения шестиугольной формой фланцев. Достигнуто уменьшение массы фланца на 10 %, уменьшение расходов на материалы – до 22 %, расходов на резку металла – до 47 %, общих расходов на изготовление фланца – до 32 % (использованы средние цены второй четверти 2020 г.).
- Разработана конечно-элементная модель расчетной схемы сооружения, учитывающая ограниченную угловую податливость узлов элементов мачты;
- Сравнение результатов расчета двух вариантов моделей мачты показало, что для ряда элементов значение основного критического фактора первоначально было недооценено на величину 11 % от критического значения. Таким образом, сделан вывод о необходимости учета угловой податливости узлов при расчете уникальных сооружений с большим уровнем ответственности.

**4** Краткая характеристика объекта исследования

В качестве объекта исследования была выбрана решетчатая опора башенного типа со стволом квадратного сечения высотой 45 250 мм, несущая фланцевые столбы для сжигания попутного газа.

Объект исследования – Амурская область.

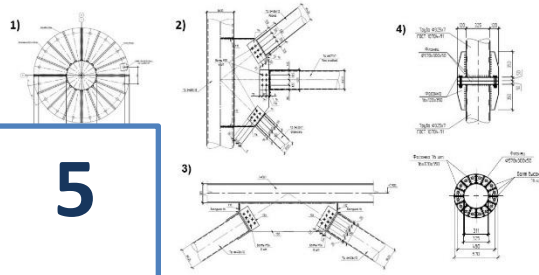
Диаметр стволы диаметром 920 мм.

Температурно-технологические воздействия.

Площадь по несущей стороне, из двутавр 40Ш1.



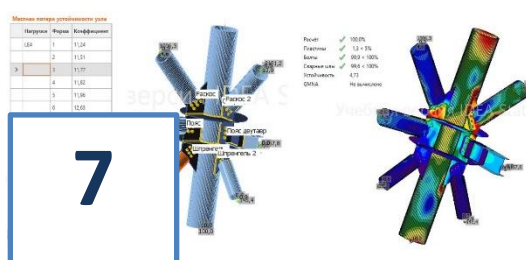
**5** Первоначальная конструкция узлов



**6** Конечно-элементные модели узлов



**7** Результаты расчета



Патрубок	Фланец	Классификация
1	1	11,24
2	1	11,31
3	1	11,17
4	1	11,30
5	1	11,06
6	1	10,97

**8** Оптимизация фланцевого стыка

В третьей главе была произведена оптимизация узла стыка элементов опоры. Вместо традиционной круглой формы фланцев для решения узла на шести болтах была предложена шестиугольная форма.

Произведен анализ раскроя стального листа для изготовления фланцев для двух вариантов конструкции.



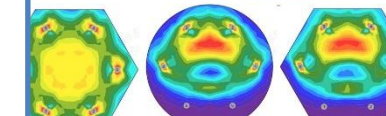
**9** Сравнение напряжений во фланцах

Уменьшение расчетной несущей способности при действии продольной силы находится в пределах 1%, при сопутствующем действии изгибающего момента – в пределах 3%. Увеличение усилий в болтах по сравнению с типовыми решениями составляет до 5%, напряжения от изгиба фланцев и напряжения в сварных швах практически не изменились.

Разница в расходе материала на один фланец составила 10 %.

Сравнение эквивалентных напряжений во фланце от усилия

Сравнение эквивалентных напряжений во фланце для изгибающего усилия



**10** Изготовление круглых фланцев:



**11** Программа анализирует несколько методов раскроя для нахождения оптимального в каждом конкретном случае:

Методы раскроя для круглых фланцев:

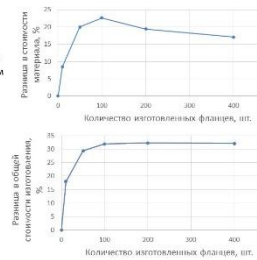


Методы раскроя для шестиугольных фланцев:



**12** Сравнение расходов на изготовление

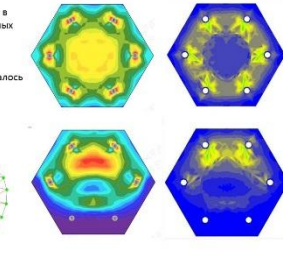
Использование шестиугольных фланцев для варианта фланцевого соединения на шести болтах позволило сократить затраты на материал на 22 %, затраты на резку металла – до 46 %, общие затраты на производство – на 32 %, по сравнению с традиционным круглым вариантом фланца (использовались средние цены второй четверти 2020 года).



**13** Сравнение расчетных моделей

Для сравнения двух вариантов расчетных программ была создана модель соединения в программном комплексе SCAD из оболочечных конечных элементов с учетом физической нелинейности материала.

Разница в результатах расчета фланцевого соединения в двух разных программах оказалась в пределах 10%.




**14** Расчет с учетом фактической жесткости узлов

В четвертой главе произведено сравнение двух расчетных схем мачты: изначальной схемы, использующей классические методы строительной механики: шарниры и жесткие заделки; и новой схемы, в которой учтена фактическая жесткость соединений.

Расчет произведен шагово-итерационным методом постепенного уточнения жесткостных характеристик узлов.

Возможны следующие группы узлов:

- Шпренгели
- Полки
- Раскосы
- Опоры



**15** Сравнение эпюр изгибающих моментов

По результатам расчета только 3 из 23 расчетных типов узлов можно в полном смысле назвать шарнирами в соответствии с требованиями Eurocode.

Изменение изгибающего момента в раскосах нижнего яруса

Изменение изгибающего момента в полке нижнего яруса

