



Конечно-элементное моделирование и расчеты на прочность опорных узлов колонных аппаратов



Выполнил:

- выпускник 2013 года Н.Е. Плешаков

Научные руководители:

- к.ф.-м.н., асс. В.А. Кузькин (СПбГПУ)
- вед. инж. Е.Е. Гилёв (ЗАО «НЕФТЕХИМПРОЕКТ»)

Санкт-Петербург
2013

Вертикальный аппарат нефтепереработки

Промышленные колонны используются для реализации различных способов переработки нефтепродуктов

Параметры аппаратов варьируются в зависимости от их предназначения

- Масса может достигать несколько сотен тонн
- Аппараты могут достигать до 100 метров в высоту и более шести метров в диаметре



Опорный узел

Выбор опорного узла определяется следующими параметрами:

- Номинальный диаметр обечайки
- Вес аппарата
- Нагрузки на аппарат

Критические режимы работы:

- Гидроиспытание – емкость заполнена водой до максимальной отметки
- Монтаж – колонна не заполнена жидкостью, отсутствуют внутренние устройства



Выбор колонны

Вакуумная колонна ректификации нефти

- ✓ Крупные габариты, большой вес
- ✓ Нестандартная опора
- ✓ Наличие огнезащитного экрана
- ✓ Наличие ветровой нагрузки

Специфика проектирования опорного узла:

- Ограниченный максимальный диаметр бетонного основания



Аналитическая оценка напряжений в болтах

$$\begin{cases} M - 0,5FD_6 = \sum_i F_i h_i \\ \sigma_i = E \varepsilon_i \\ \varepsilon_i = h_i \theta \end{cases}$$

- Уравнение равновесия
- Закон Гука
- Геометрическое соотношение

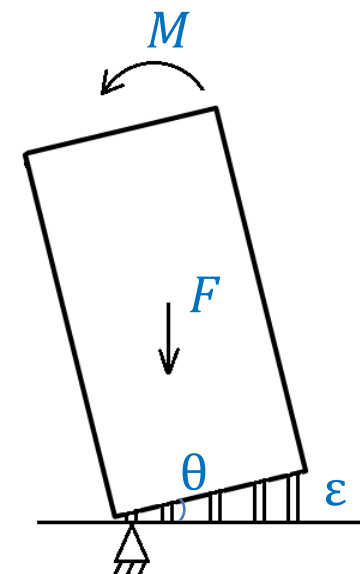
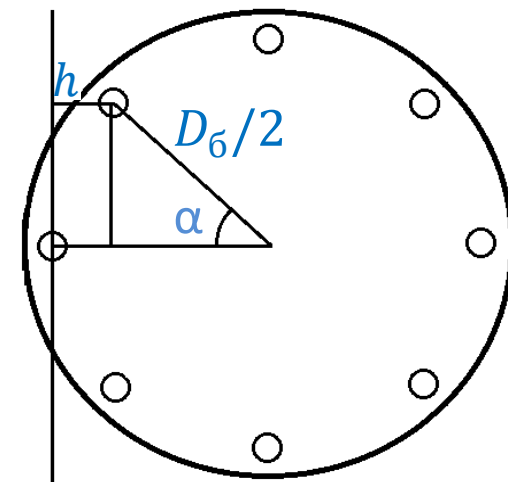
$$\sigma_i = \frac{F_i}{S} = \frac{4F_i}{\pi d_6^2}$$

$$h_i = \frac{D_6}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi i}{n} \right)$$

$$M - 0,5FD_6 = \sum_i \sigma_i S h_i = \sum_i E S \varepsilon_i h_i = \sum_i E S h_i^2 \theta$$

$$\theta = \frac{M - 0,5FD_6}{E S \sum_i h_i^2}$$

$$\sigma_{max} = \frac{M - 0,5FD_6}{S \sum_i h_i^2} h_{max} = \frac{4(M - 0,5FD_6)}{D_6 d_6^2 \pi \sum_i \sin^4 \frac{\pi i}{n}}$$



$$d_{min} = \sqrt{\frac{4(M - 0,5FD_6)}{D_6 [\sigma]_B \pi \sum_i \sin^4 \frac{\pi i}{n}}}$$

F_i – сила действующая на i -ый болт
 d_6 – эффективный диаметр болта
 S – площадь поперечного сечения болта
 θ – параметр [м⁻¹]



Методика расчета по ГОСТ Р 51274-99

Расчет внутреннего диаметра резьбы d_6 анкерных болтов:

$$\chi_6 = \begin{cases} 2,25 + 0,3 \frac{FD_6}{M} & \text{при } \frac{FD_6}{M} < 0,5 \\ 2,7 + 2 \frac{FD_6}{M} + 3,7 \left(\frac{FD_6}{M}\right)^2 + 2,5 \left(\frac{FD_6}{M}\right)^3 + 0,65 \left(\frac{FD_6}{M}\right)^4 & \text{при } \frac{FD_6}{M} \geq 0,5 \end{cases}$$

Минимальный диаметр болтов
по ГОСТ

$$d_6 = \chi_6 \sqrt{\frac{M - 0,44 FD_6}{n[\sigma]_B D_6}}$$

Приближенное аналитическое
решение

$$d_{min} = \sqrt{\frac{4(M - 0,5FD_6)}{D_6[\sigma]_B \pi \sum_i \sin^4 \frac{\pi i}{n}}}$$

- F – Осевое сжимающее усилие
- M – Расчетный изгибающий момент
- D_6 – Диаметр окружности анкерных болтов
- n – Количество анкерных болтов
- $[\sigma]_B$ – Допускаемое напряжение для анкерных болтов



Стандартные опорные узлы

Альбом типовых конструкций (АТК) 24.200.04-90

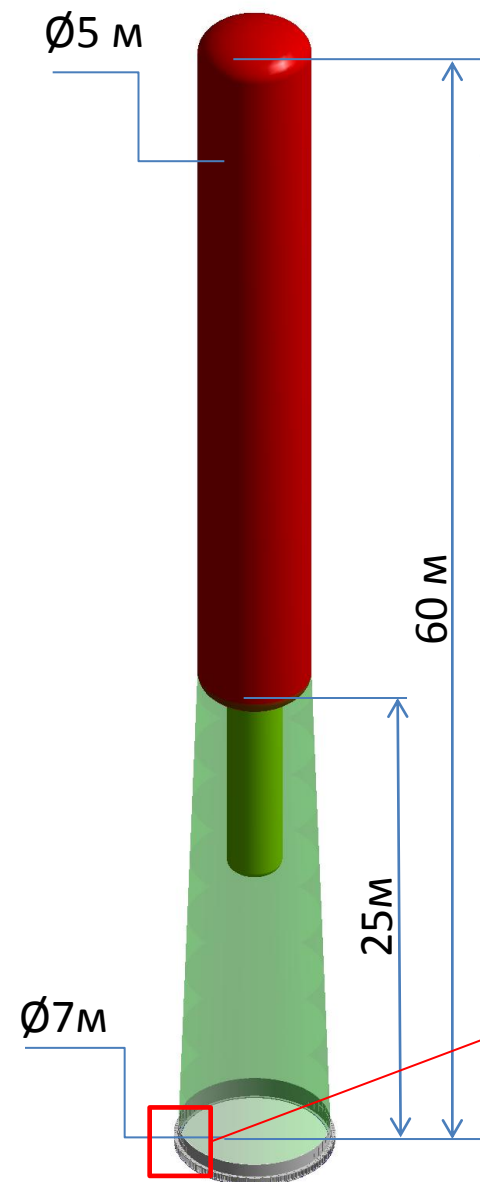
$$Q_{min} = \frac{4M_3}{D} - F_4 = 12 \text{ МН} \quad Q_{max} = \max \left\{ \frac{4M_1}{D} + F_1; \frac{4M_2}{D} - F_2 \right\} = 27 \text{ МН}$$

Наибольшие
 $Q_{min}; Q_{max}$

D	D ₁	D ₂	D ₃	Максимальная приведенная нагрузка Q _{max} , МН											
				до 0,32		до 1,5		до 3,2		до 5,0		до 10,0		до 12,5	
				Минимальная приведенная нагрузка Q _{min} , МН											
до 0,125		до 0,2		до 0,4		до 0,63		до 1,6		до 2,5					
Болт фундам.		Болт фундам.		Болт фундам.		Болт фундам.		Болт фундам.		Болт фундам.		Фундамент			
S ₁	S ₂	d	S ₁	S ₂	d	S ₁	S ₂	d	S ₁	S ₂	d	S ₁	S ₂	d	
Аном.	Рисб.	Монж.	Аном.	Рисб.	Монж.	Аном.	Рисб.	Монж.	Аном.	Рисб.	Монж.	Аном.	Рисб.	Монж.	
3000	2890	3170	3290												
3200	3090	3370	3490						8	25	70	36	22		
3400	3290	3570	3690												
3600	3490	3770	3890												
3800	3690	3970	4090												
4000	3890	4170	4290												
4500	4400	4680	4800						10	28	70	36	20		
5000	4900	5180	5300												
5600	5500	5780	5900												
6300	6200	6490	6600												

- Q_{max} – Максимальная приведенная нагрузка; Q_{min} – Минимальная приведенная нагрузка
- $F_{1;2;4}$ – Осевое сжимающее усилие в режиме: рабочем; испытания; монтажа
- $M_{1;2;3}$ – Расчетный изгибающий момент в режиме: рабочем; испытания; монтажа

CAD-модель колонны



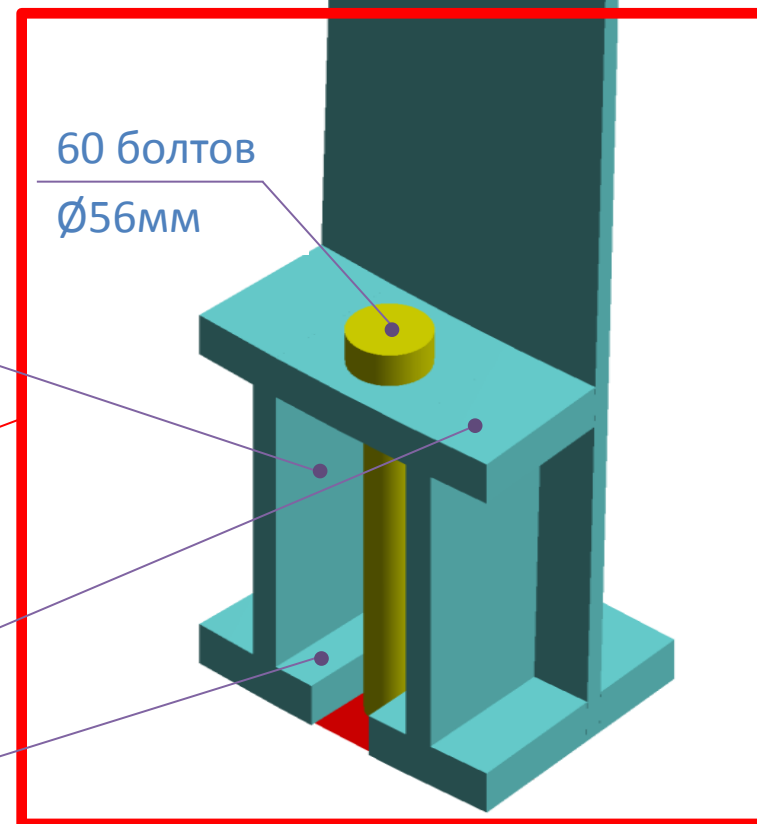
Материальное исполнение:
Опорный узел : сталь 09Г2С
Анкерные болты: сталь 35Х

- Опорный узел
- Анкерные болты
- Бетонное основание

Ребро жесткости

Верхнее опорное
кольцо

Нижнее опорное
кольцо



Постановка задачи

ANSYS

Приложенная нагрузка:

- Вес (различные режимы)
- Ветровая нагрузка M_B
(3-й ветровой район по ГОСТ Р 51273-99)

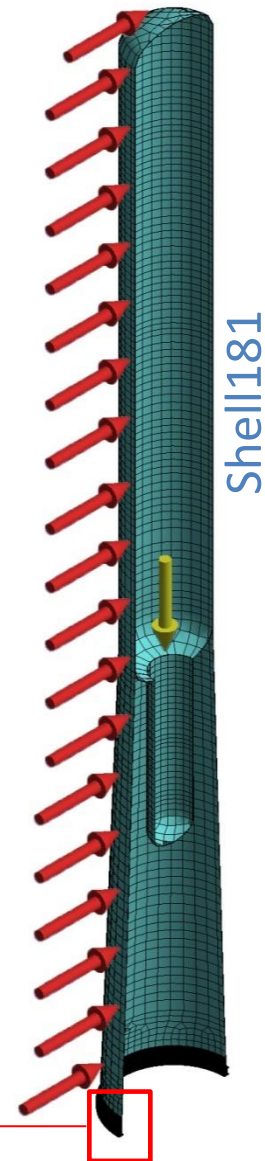
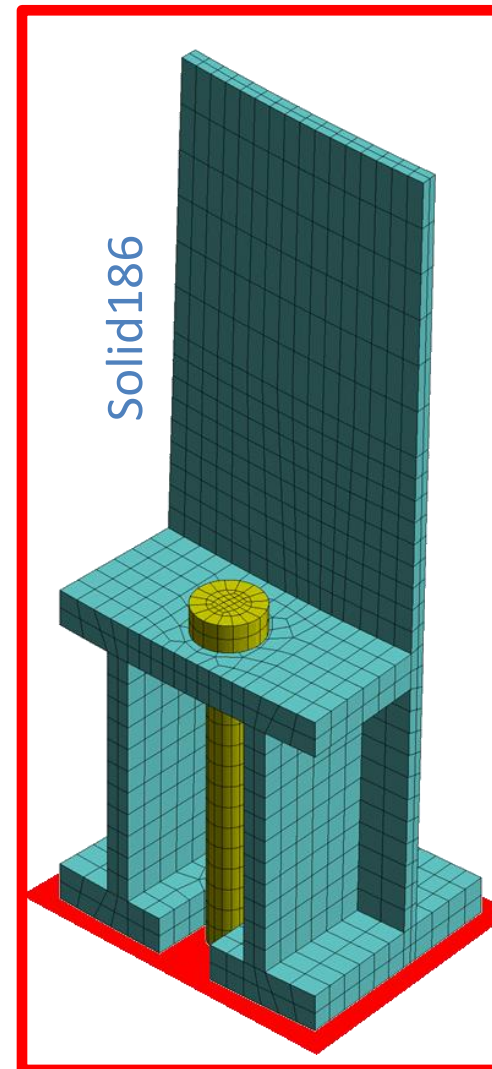
	Монтаж	Гидроиспытание
Вес	325 т	1016 т
Ветер	M_B	$0,6M_B$

Граничные условия:

- Жесткая заделка основания
- Жесткая заделка нижнего сечения болтов

Характеристики КЭ модели:

- Степеней свободы – 1 908 009
- Узлов – 636 003
- Элементов – 118 554
- Объемов – 992



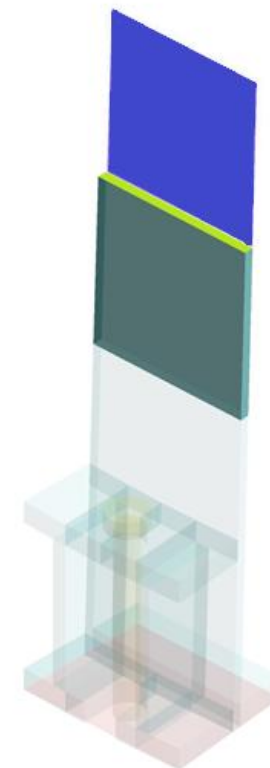
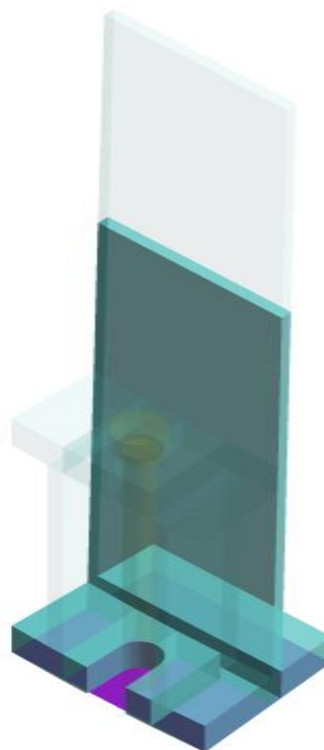
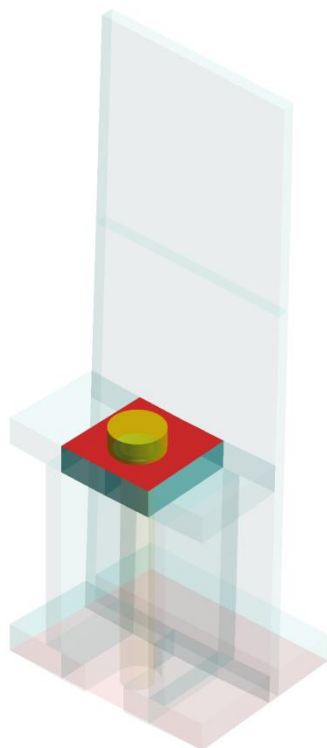
Постановка задачи

Контактные взаимодействия

■ Контакт с трением,
 $\mu=0.3$

■ Контакт с трением,
 $\mu=0.5$

■ Сопряжение твердого
тела и оболочки



Полученные результаты

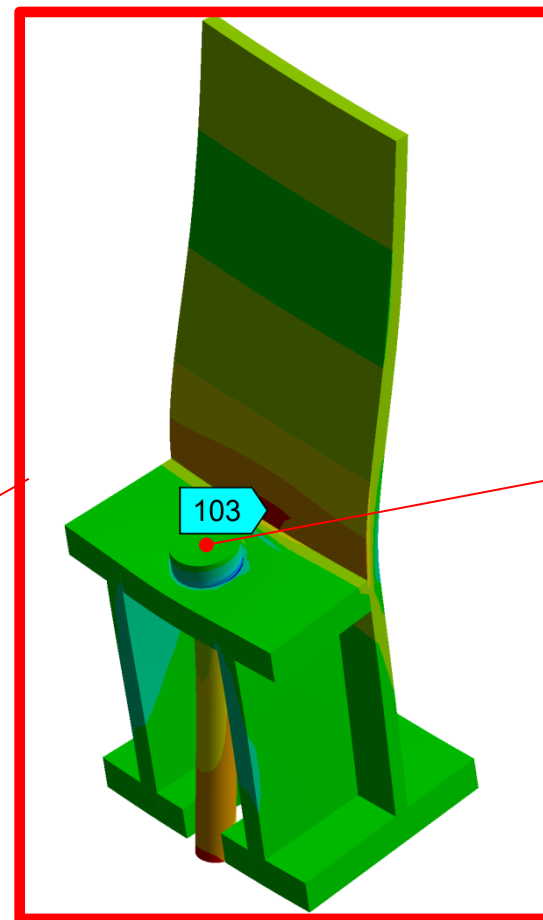
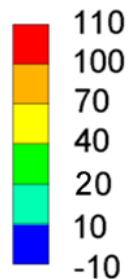
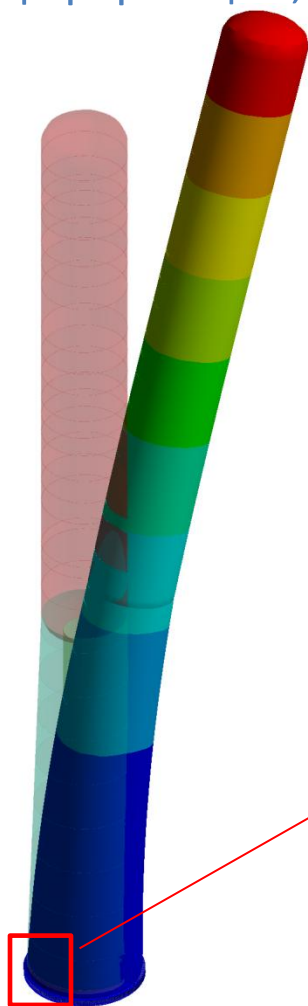
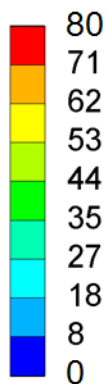
Режим монтажа

Деформации, мм

Растягивающие напряжения, МПа

$[\sigma]_A = 272 \text{ МПа}$

$[\sigma]_B = 170 \text{ МПа}$



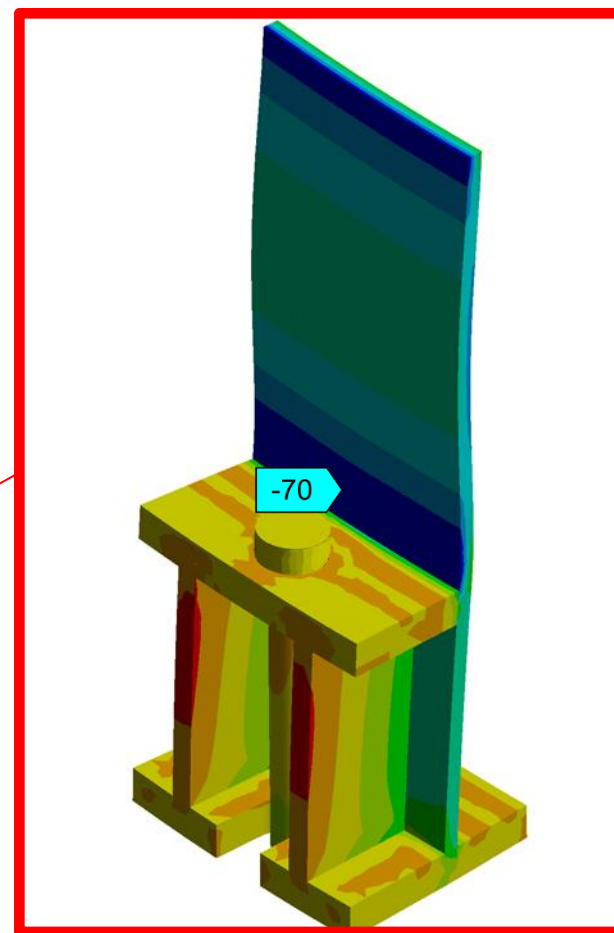
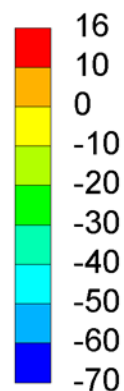
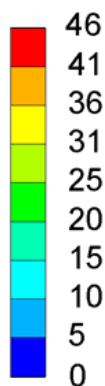
Полученные результаты

Режим гидроиспытания

Деформации, мм

Растягивающие напряжения, МПа

$[\sigma]_A = 272 \text{ МПа}$



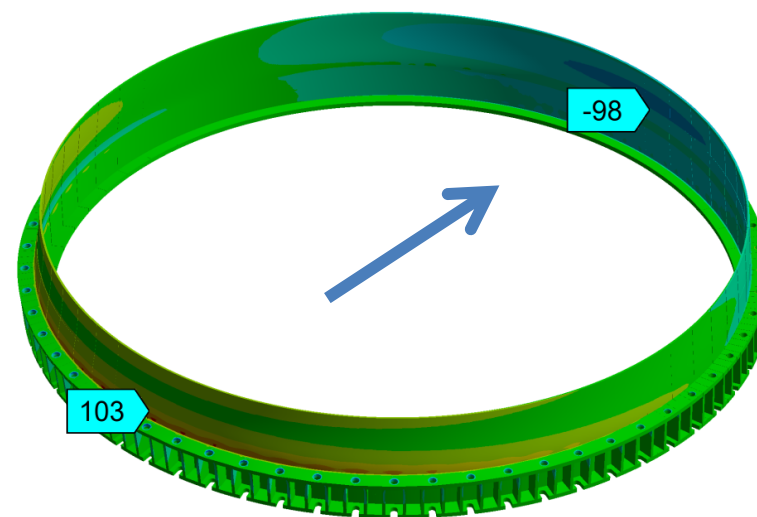
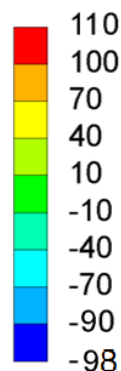
Полученные результаты

Растягивающие напряжения в опорном узле, МПа

Режим монтажа

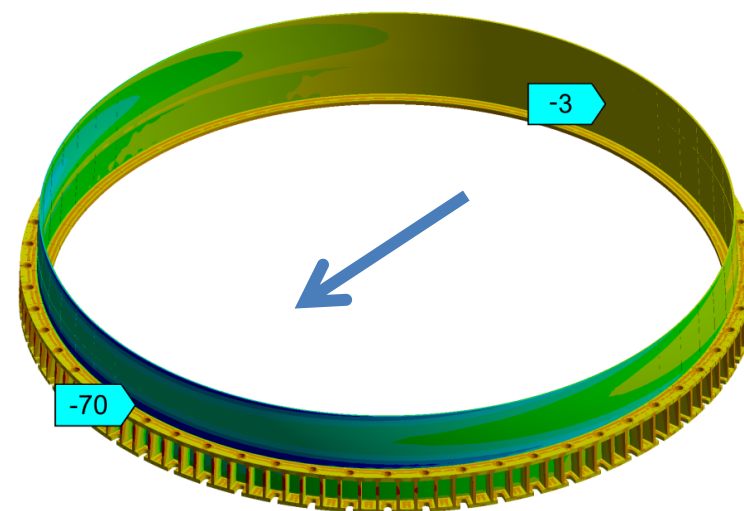
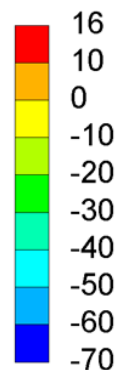
Сочетание относительно малого веса с большой поперечной нагрузкой вызывает зоны растягивающих и сжимающих напряжений. Усилия в зоне растяжения передаются на анкерные болты.

$$[\sigma]_A = 272 \text{ МПа}$$



Режим гидроиспытания

Максимальные напряжения выявлены в зоне сжатия. Наиболее нагруженной является юбка опоры.



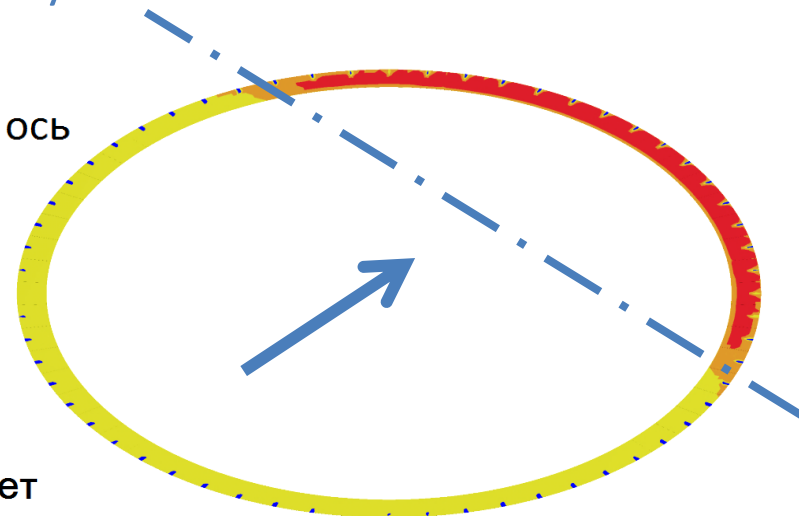
Полученные результаты

Контактное взаимодействие опорного узла с бетонным основанием

Режим монтажа

Сочетание относительно малого веса и поперечной нагрузки вызывает смещение нейтральной оси к зоне сжатия.

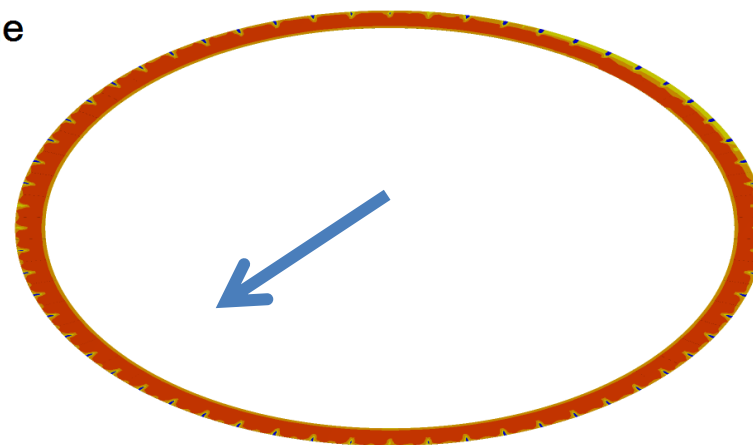
— Нейтральная ось



Режим гидроиспытания

Отсутствие нейтральной оси свидетельствует о том что приложенного момента недостаточно для раскрытия между основанием и опорой. Растягивающие напряжения в болтах отсутствуют.

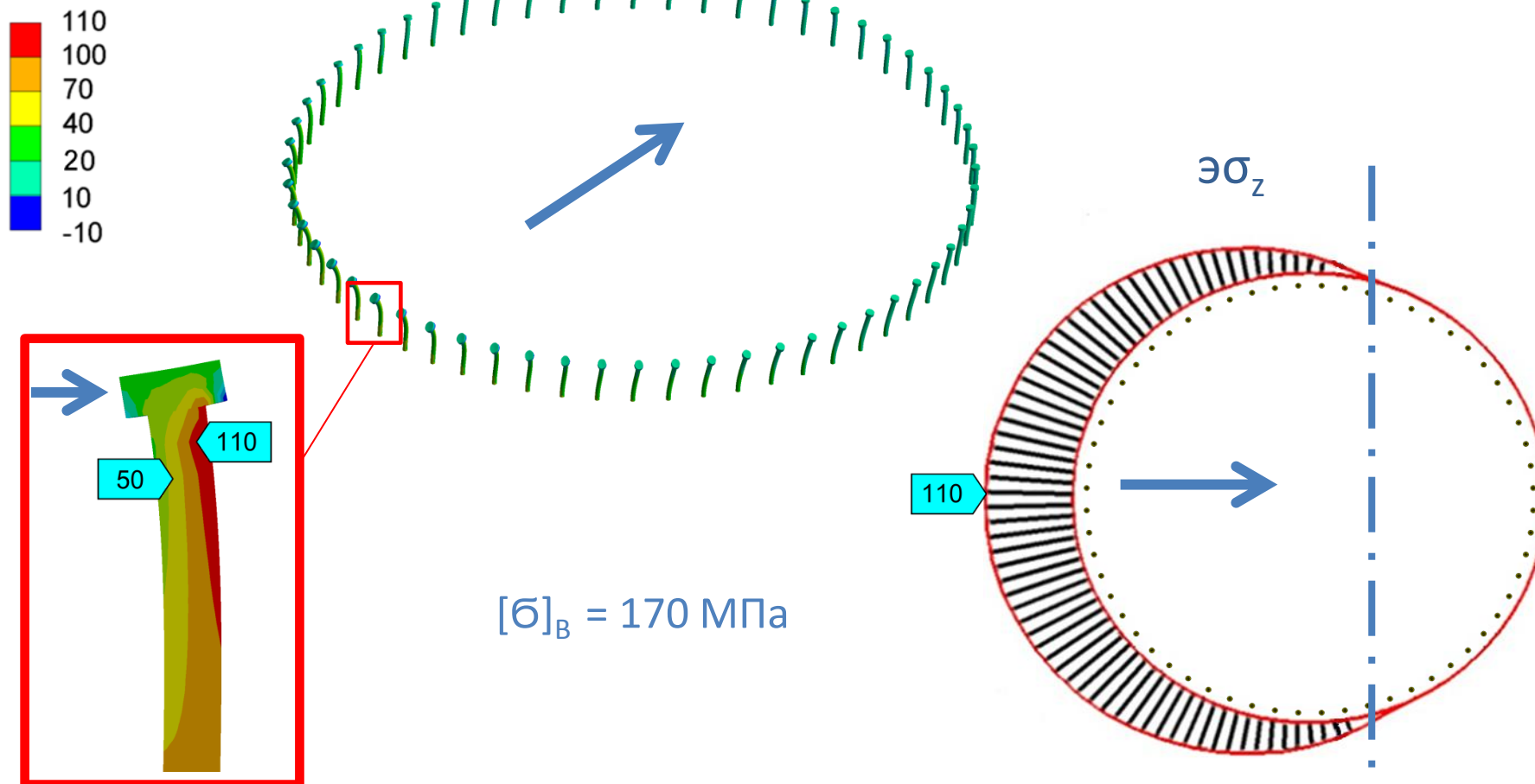
- Отсутствует
- Близко
- Скольжение
- Прилипание



Полученные результаты

Режим монтажа

Растягивающие напряжения в болтах, МПа



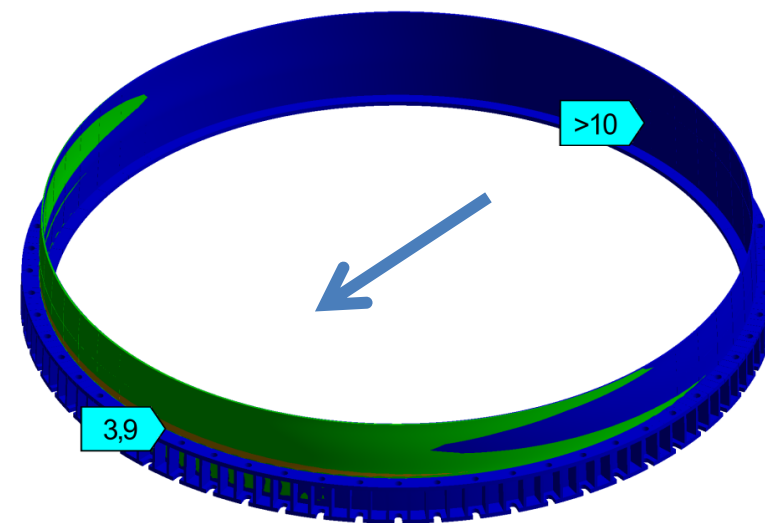
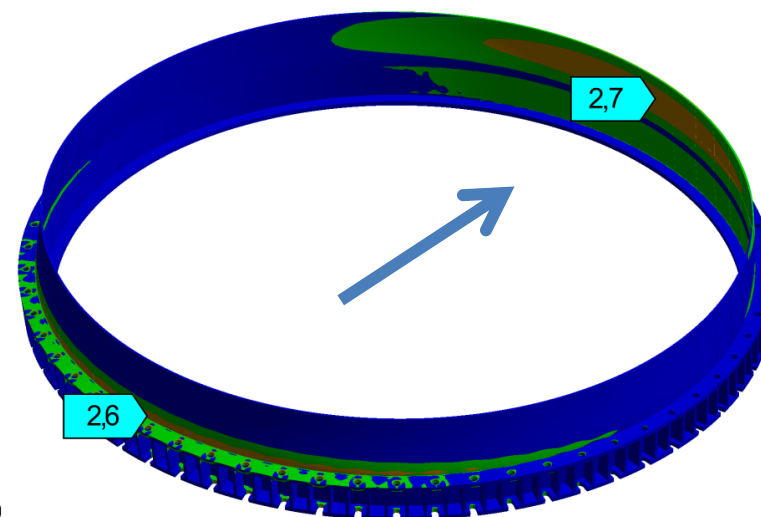
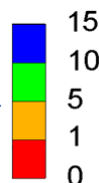
Полученные результаты

Коэффициент запаса прочности в опорном узле

Режим монтажа

Малый запас прочности в зонах сжатия и растяжения. Минимальный коэффициент запаса в верхнем опорном кольце в зоне растяжения.

$$[\sigma]_A = 272 \text{ МПа}$$



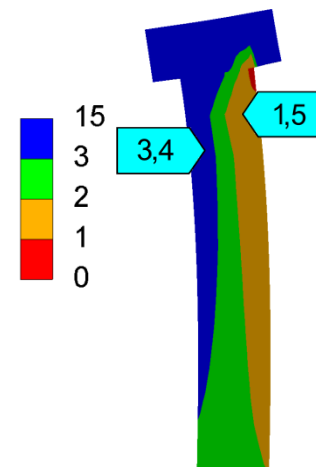
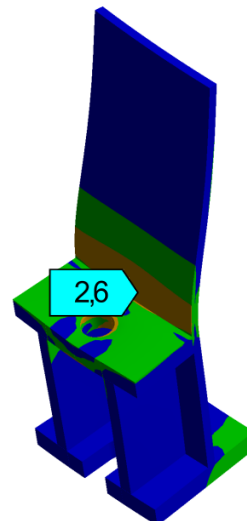
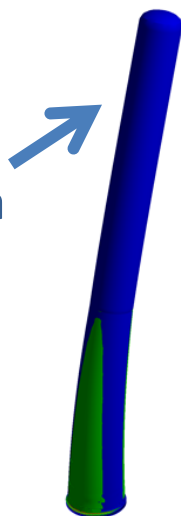
Режим гидроиспытания

Наименьший коэффициент запаса прочности локализован в зоне максимального сжатия. Основную нагрузку испытывает юбка опоры.

Полученные результаты

Запас прочности колонны и элементов

Режим монтажа

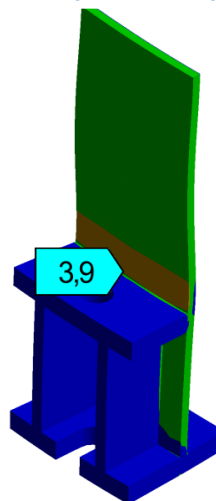
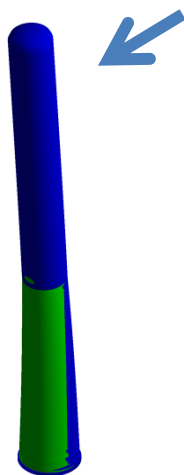


Глобальная модель

Опорный узел

Максимально
растянутый болт

Режим
гидроиспытания

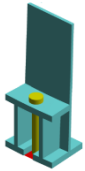




Сверка КЭ модели с расчетами по ГОСТ

	Монтаж			Испытание				
	ГОСТ	КЭ		$\delta, \%$	ГОСТ	КЭ		$\delta, \%$
Напряжение в болтах, МПа	111	77		1	-	-	-	
		min 50	max 110					
Напряжение в верхнем кольце Мах, МПа	176	103		41	176	70	60	
Перемещения Мах, мм	76	79		3,8	47	46	2	
Осевое сжимающее усилие, МН	3,18	3,1		2,5	9,82	9,89	0,01	
Момент на изгиб основания, МН·м	26,6	25		6	16,1	15,1	5,6	
Период колебаний колонны, с	0,94	0,79		15	1,8	1,6	11	

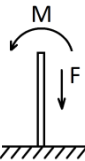
Заключение



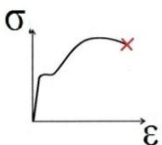
Создана **КЭ модель** колонны для расчета нестандартных **опорных узлов**.
Произведен расчет НДС нестандартного опорного узла колонны.



Произведено **сравнение** НДС КЭ модели с расчетом напряжений по методике ГОСТ. Выявлено значительное **несоответствие** напряжений в зоне верхнего опорного кольца, значения по методике ГОСТ **завышены на 41 и 60 %** для режима монтажа и гидроиспытания соответственно.



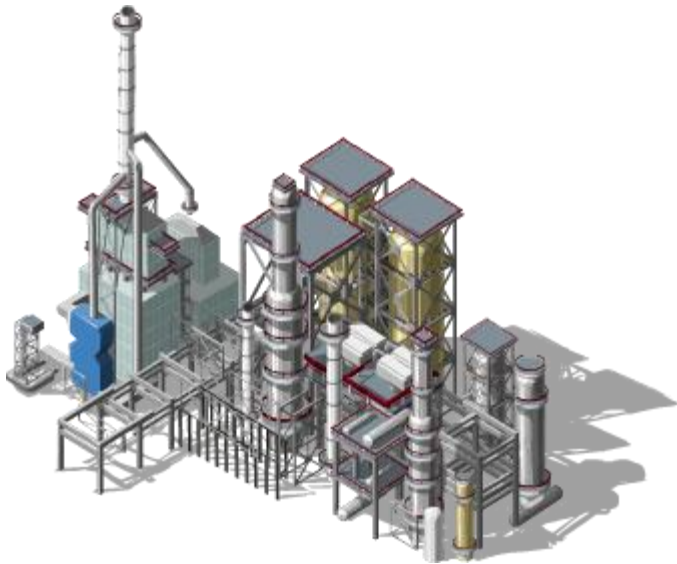
Получена **аналитическая модель** для расчета напряжений в болтах. Определен минимальный диаметр болтов согласно полученной модели, **различие** с методикой ГОСТ составило **20%**.



Дана **оценка** наиболее **опасных участков** в опорном узле колонны. Наименьший коэффициент запаса обнаружен в анкерных болтах. Даны рекомендации по улучшению конструкции опорного узла.



Спасибо за внимание!



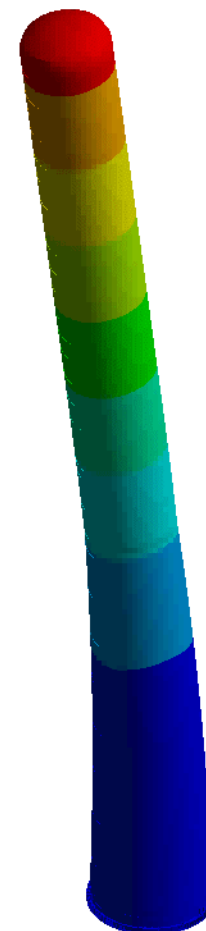
Анализ собственных частот конструкции

Период собственных колебаний (первая мода)

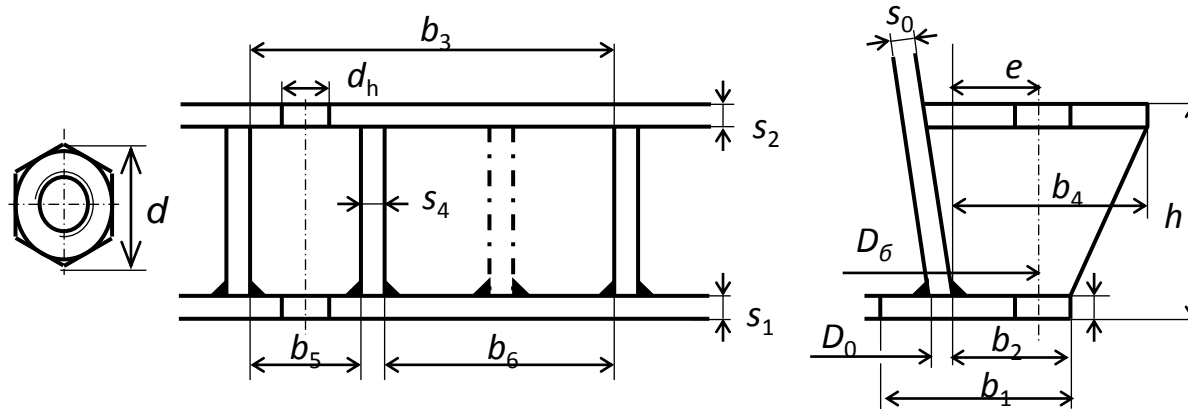
Режим монтажа (0.79 с)



Режим гидроиспытания (1.6 с)



Прочность обечайки в зоне верхнего опорного кольца определяют по формуле:



$$\frac{6\chi_s A_\sigma [\sigma]_B e}{(s_0 - c)^2 h} \leq 1,5[\sigma]_0,$$

$$\chi_s = -0,0248 \left\{ \ln \left(\frac{N}{1100} \right) - \sqrt{\left[\ln \left(\frac{N}{1100} \right) \right]^2 + 2,628} \right\} + K; \quad N = \frac{D_0}{2(s_0 - c)} \left(\frac{10b_3}{D_0} \right)^{2,05} \quad K = \begin{cases} 0, & \text{при } N \leq 10^4 \\ -0,002 \ln(10^{-4} \cdot N), & \text{при } N > 10^4; \end{cases}$$

h - Высота опорного узла

e - расстояние от оси анкерного болта до опорной обечайки

c - Прибавка на коррозию

s₀ - Исполнительная толщина юбки

[σ]_В - Допускаемое напряжение для анкерных болтов

[σ]₀ - Допускаемое напряжение для материала опорной обечайки при расчетной температуре

A_σ - Эффективная площадь анкерного болта