



Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Физико-механический факультет
Кафедра Механики и процессов управления

Конечно-элементное моделирование и расчет на прочность штуцеров емкостного оборудования

Выполнил студент группы 6055/12

Руководитель, к.т.н., профессор

Соруководители:

ассистент

ведущий инженер

ЗАО «НЕФТЕХИМПРОЕКТ»

Бегунович А.Ю.

Боровков А.И.

Немов А.С.

Гилёв Е.Е.

Санкт-Петербург
2013 год

Цель и задачи работы

Цель: КЭ моделирование и исследование НДС штуцеров на корпусе колонны



Задачи:

- Расчет люка (Ду600) при действии внутреннего давления;
- Расчет штуцера для КИП (Ду50) при действии внутреннего давления;
- Расчет технологических штуцеров (Ду300, Ду400) при действии внутреннего давления и внешних статических нагрузок.

Описание объекта

Стабилизационная колонна

Назначение: стабилизация очищенной бензиновой фракции;

Техническая характеристика:

- расчетное давление 1 МПа;
- расчетная температура 250°C;
- материальное исполнение
 - корпус – сталь 09Г2С
($E = 1.76 \cdot 10^5$ МПа, $\nu = 0.3$,
 $[\sigma] = 162$ МПа)*,
 - штуцеры – сталь 09Г2С
($E = 1.76 \cdot 10^5$ МПа, $\nu = 0.3$,
 $[\sigma] = 162$ МПа)*;
- высота колонны 32 м;
- вместимость 149 м³;
- масса колонны 55 т.

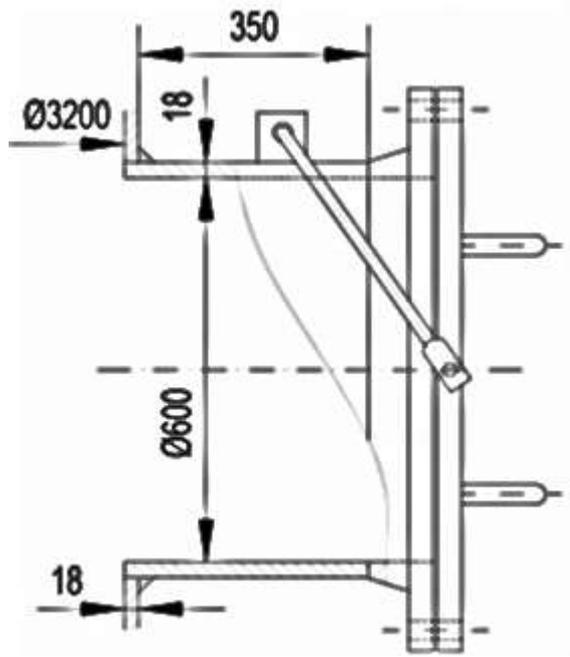


* ГОСТ Р 52857.1-2007 «Нормы и методы расчета на прочность. Общие требования»

Расчет люка при действии внутреннего давления. КЭ постановка



Полная модель
Тип элемента SHELL181
Характерный размер элемента
 $h^{(e)} = 50$ мм
NN – 60 879
NE – 61 037
NDF – 365 274



Субмодель
Тип элемента SOLID186
Характерный размер элемента вблизи места
врезки штуцера $h^{(e)} = 10$ мм ($\sim 0.2\sqrt{Ds}$)*
NN – 167 353
NE – 35 566
NDF – 502 059

* Mershon J.L. Local stresses in cylindrical shells due to external loadings on nozzles – supplement to WRC Bulletin №107

Условия прочности для элементов сосудов под давлением

В соответствии с п. 8.10 ГОСТ Р 52857.1-2007 условия статической прочности элементов сосудов выполняются, если

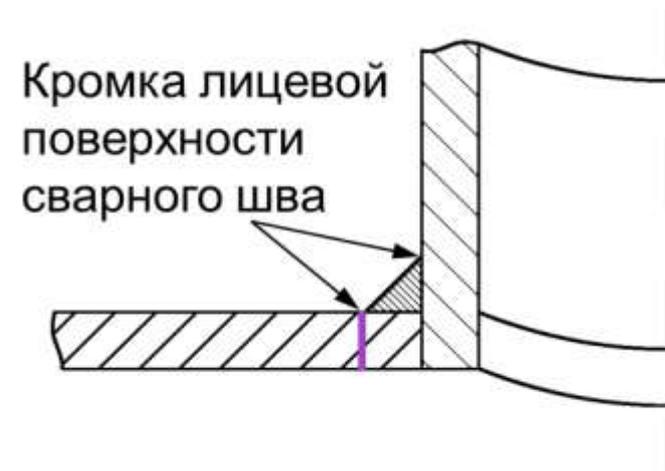
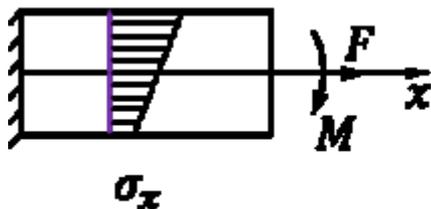
$$\begin{cases} \sigma_m \leq [\sigma] \\ \sigma_m + \sigma_b \leq [\sigma]_M \end{cases}$$

где $[\sigma]_M = 1.5 [\sigma]$;

σ_m – мембранные напряжения;

σ_b – изгибные напряжения.

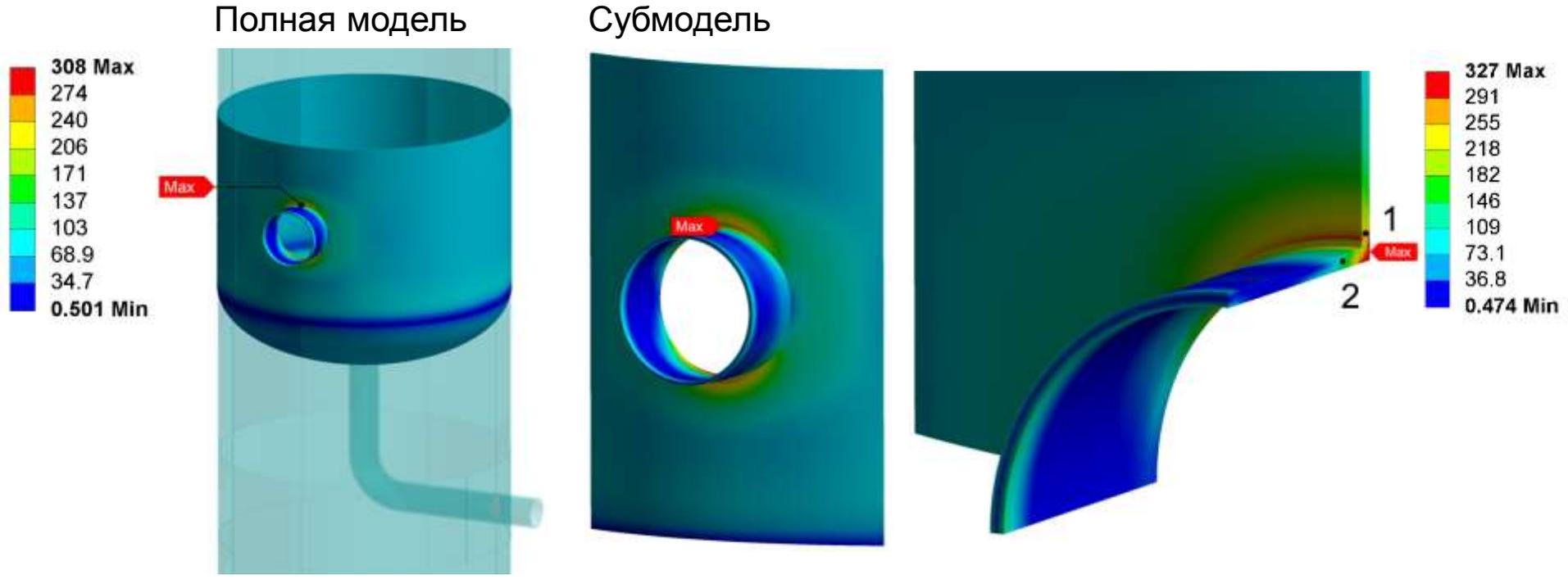
Для стали 09Г2С $[\sigma] = 162$ МПа, $[\sigma]_M = 243$ МПа.



σ_m и σ_b определяются вблизи кромки лицевой поверхности сварного шва*

* ASME. Rules for Construction of Pressure Vessels (Sec. VIII, Division 2)

Распределение эквивалентных напряжений, МПа



Оценка статической прочности в окрестности сварного шва:

Зона	σ_m , МПа	$(\sigma_m + \sigma_b)^{top}$, МПа	$(\sigma_m + \sigma_b)^{bot}$, МПа
1	212	240	233
2	117	124	144

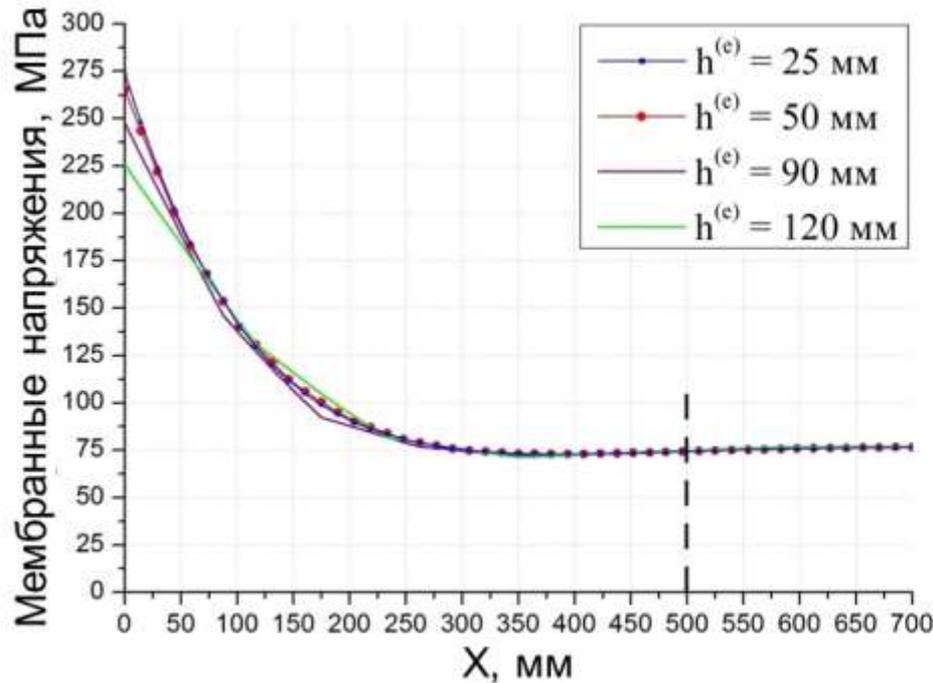
$$\begin{cases} \sigma_m^{max} = 212 \text{ МПа} > [\sigma] = 162 \text{ МПа} \\ (\sigma_m + \sigma_b)^{max} = 240 \text{ МПа} \leq [\sigma]_M = 243 \text{ МПа} \end{cases}$$

- Статическая прочность люка в соответствии с ГОСТ Р 52857.1-2007 **не обеспечена**;
- Требуется дополнительное укрепление.

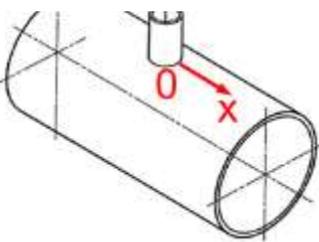
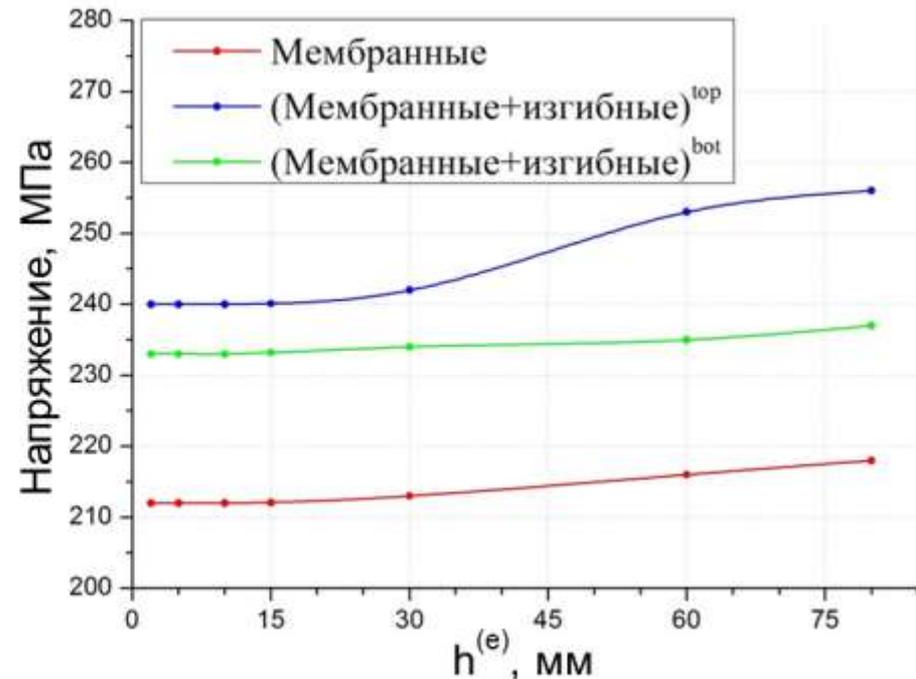
Сходимость метода конечных элементов

Размер субмодели

Полная модель:

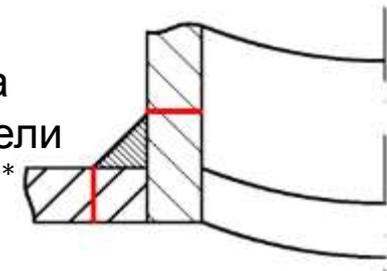


Субмодель:



Зона влияния краевого эффекта распространяется на участок цилиндра длиной $2\sqrt{Ds} \approx 500$ мм*

Характерный размер элемента вблизи места врезки штуцера в субмодели $h^{(e)} = 10$ мм ($\sim 0.2\sqrt{Ds}$)**

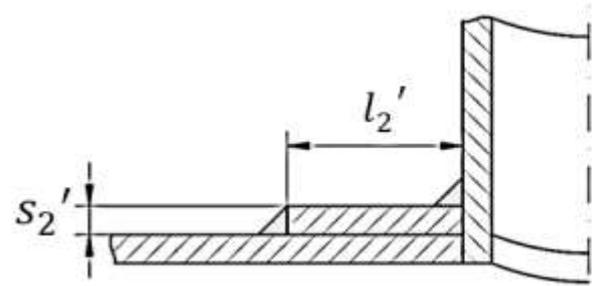


* Феодосьев В.И. Сопrotивление материалов

** Mershon J.L. Local stresses in cylindrical shells due to external loadings on nozzles – supplement to WRC Bulletin №107

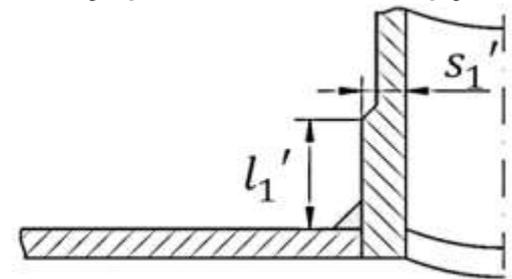
Варианты укрепления штуцеров. КЭ постановка

- Укрепление накладным кольцом



s_2' – толщина накладного кольца
 l_2' – ширина накладного кольца

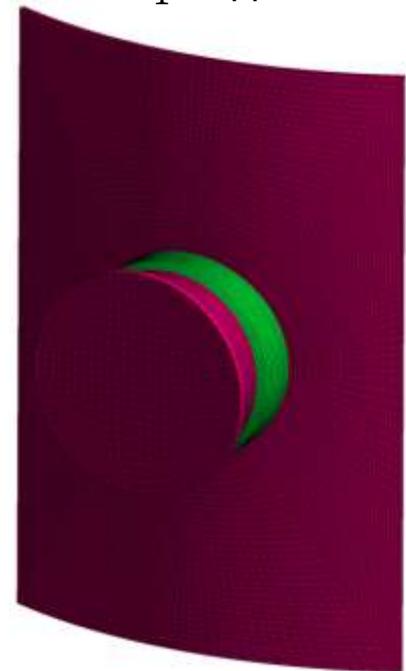
- Утолщение стенки штуцера («самоукрепленный патрубок»)



s_1' – толщина стенки штуцера
 l_1' – длина штуцера



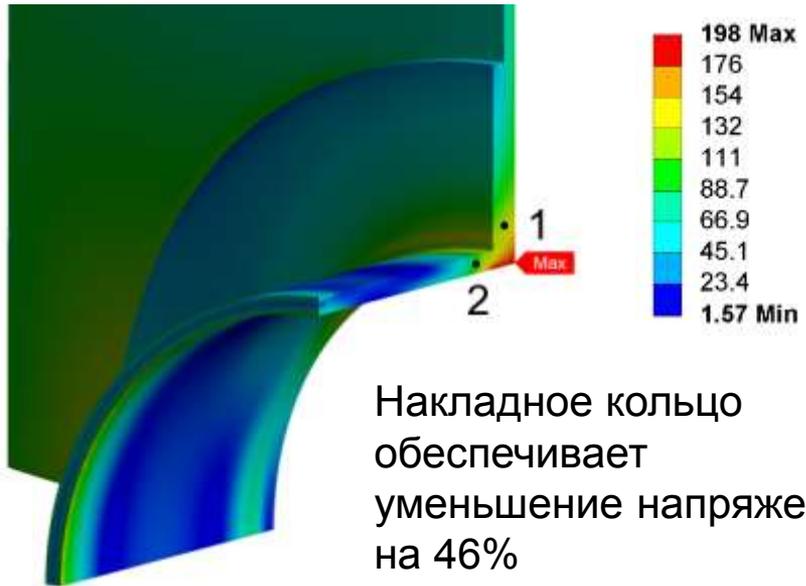
Тип элемента SOLID186
 $s_2' = 18 \text{ мм}, l_2' = 200 \text{ мм}$
 $h^{(e)} = 10 \text{ мм} (\sim 0.2\sqrt{Ds})^*$
NN – 191 391
NE – 41 899
NDF – 574 173



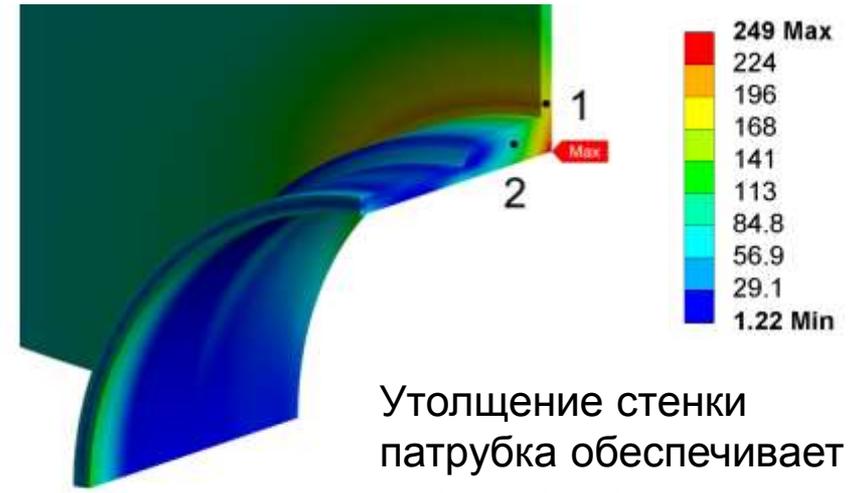
Тип элемента SOLID186
 $s_1' = 36 \text{ мм}, l_1' = 150 \text{ мм}$
 $h^{(e)} = 10 \text{ мм} (\sim 0.2\sqrt{Ds})^*$
NN – 145 710
NE – 32 039
NDF – 437 130

* Mershon J.L. Local stresses in cylindrical shells due to external loadings on nozzles – supplement to WRC Bulletin №107

Распределение эквивалентных напряжений, МПа



Накладное кольцо обеспечивает уменьшение напряжений на 46%



Утолщение стенки патрубка обеспечивает уменьшение напряжений на 24%

Оценка статической прочности в окрестности сварного шва:

Зона	σ_m , МПа	$(\sigma_m + \sigma_b)^{top}$, МПа	$(\sigma_m + \sigma_b)^{bot}$, МПа
1	121	110	133
2	103	94	114

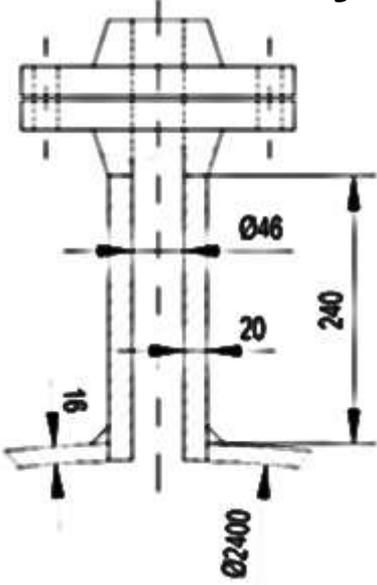
$$\begin{cases} \sigma_m^{max} = 121 \text{ МПа} \leq [\sigma] = 162 \text{ МПа} \\ (\sigma_m + \sigma_b)^{max} = 133 \text{ МПа} \leq [\sigma]_M = 243 \text{ МПа} \end{cases}$$

Зона	σ_m , МПа	$(\sigma_m + \sigma_b)^{top}$, МПа	$(\sigma_m + \sigma_b)^{bot}$, МПа
1	154	208	187
2	90	81	118

$$\begin{cases} \sigma_m^{max} = 154 \text{ МПа} \leq [\sigma] = 162 \text{ МПа} \\ (\sigma_m + \sigma_b)^{max} = 208 \text{ МПа} \leq [\sigma]_M = 243 \text{ МПа} \end{cases}$$

Статическая прочность люка в соответствии с ГОСТ Р 52857.1-2007 **обеспечена.**

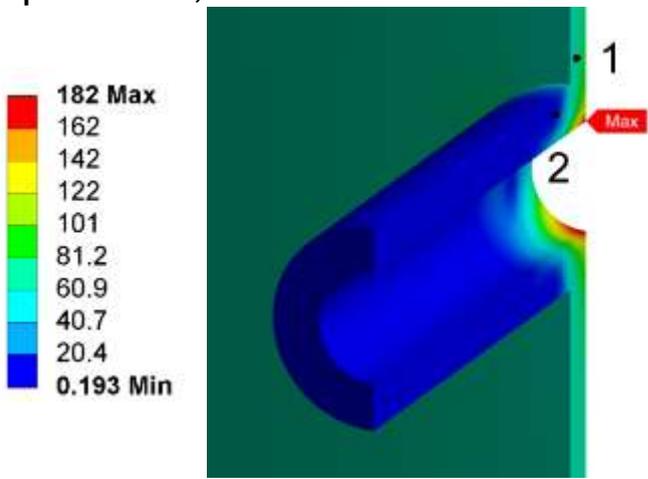
Расчет штуцера для КИП при действии внутреннего давления



КЭ постановка:
 Тип элемента SOLID186
 $h^{(e)} = 10 \text{ мм} (\sim 0.2\sqrt{Ds})^*$
 NN – 60 401
 NE – 13 077
 NDF – 181 203



Распределение эквивалентных напряжений, МПа:



Оценка статической прочности в окрестности сварного шва:

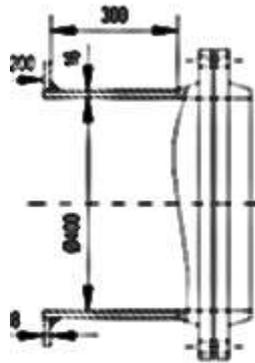
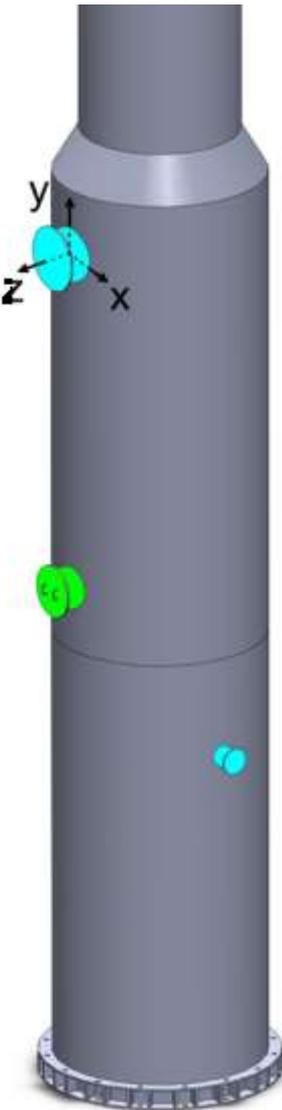
Зона	σ_m , МПа	$(\sigma_m + \sigma_b)^{top}$, МПа	$(\sigma_m + \sigma_b)^{bot}$, МПа
1	72	59	86
2	27	19	55

$$\begin{cases} \sigma_m^{max} = 72 \text{ МПа} \leq [\sigma] = 162 \text{ МПа} \\ (\sigma_m + \sigma_b)^{max} = 86 \text{ МПа} \leq [\sigma]_M = 243 \text{ МПа} \end{cases}$$

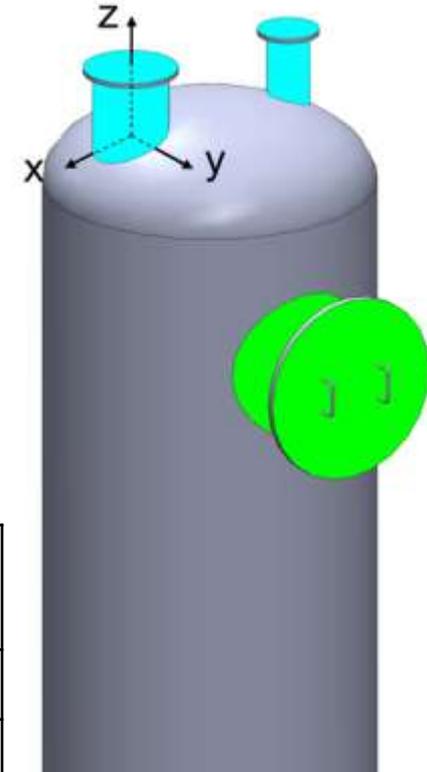
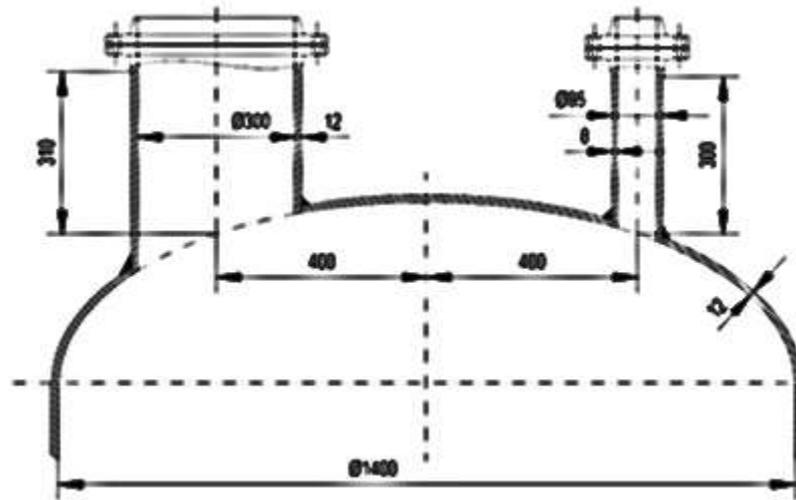
* Mershon J.L. Local stresses in cylindrical shells due to external loadings on nozzles – supplement to WRC Bulletin №107

Расчет технологических штуцеров при действии внутреннего давления и внешних статических нагрузок

Штуцер на цилиндрической обечайке



Штуцер на эллиптическом днище



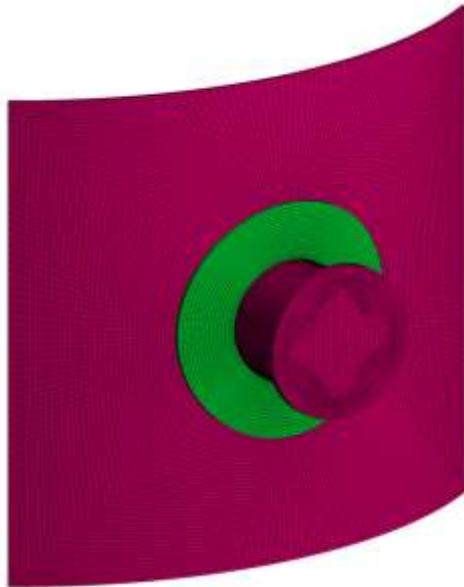
С помощью модуля ANSYS DesignXplorer определена опасная конфигурация нагрузок в месте врезки штуцера*:

d , мм	F_x , кН	F_y , кН	F_z , кН	M_x , кН·м	M_y , кН·м	M_z , кН·м
400	-13.3	13.3	18.8	20.0	20.0	-28.3
300	9.3	9.3	13.1	11.2	11.2	-15.9

* Minimum nozzle loads. Shell global solutions international BV

Конечно-элементные постановки задач

Штуцер на цилиндрической обечайке



Тип элемента SOLID186
 $s_2' = 18 \text{ мм}, l_2' = 200 \text{ мм}$
 $h^{(e)} = 10 \text{ мм} (\sim 0.2\sqrt{Ds})^*$
NN – 278 491
NE – 54 726
NDF – 835 473

Штуцер на эллиптическом днище



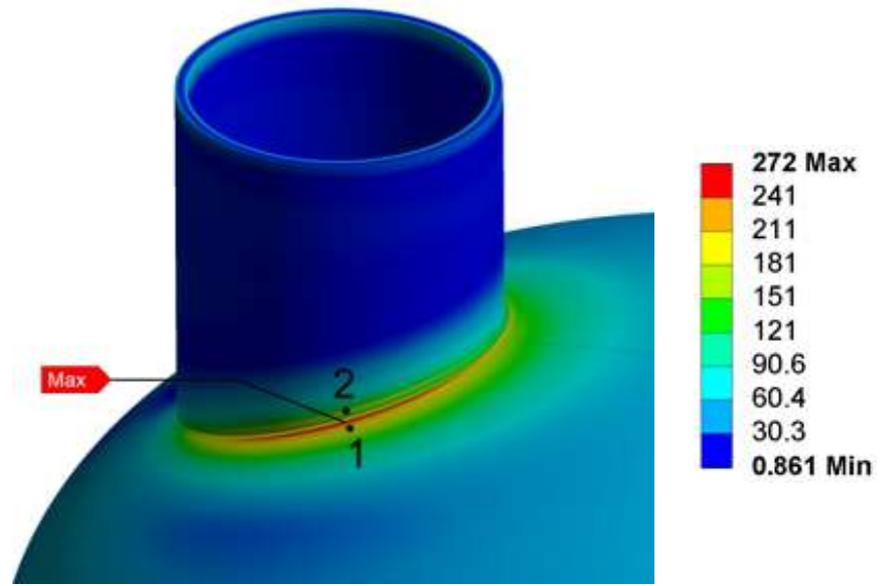
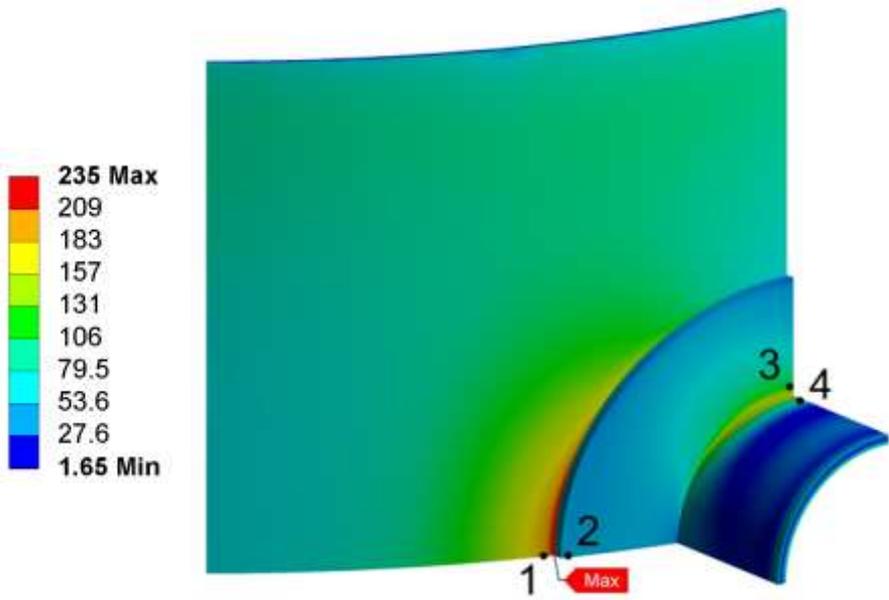
Тип элемента SOLID186
 $h^{(e)} = 10 \text{ мм}$
NN – 333 393
NE – 64 261
NDF – 1 000 179

* Mershon J.L. Local stresses in cylindrical shells due to external loadings on nozzles – supplement to WRC Bulletin №107

Распределение эквивалентных напряжений, МПа

Штуцер на цилиндрической обечайке

Штуцер на эллиптическом днище



Оценка статической прочности в окрестности сварного шва:

Зона	σ_m , МПа	$(\sigma_m + \sigma_b)^{top}$, МПа	$(\sigma_m + \sigma_b)^{bot}$, МПа
1	85	196	59
2	57	58	79
3	34	43	54
4	37	40	35

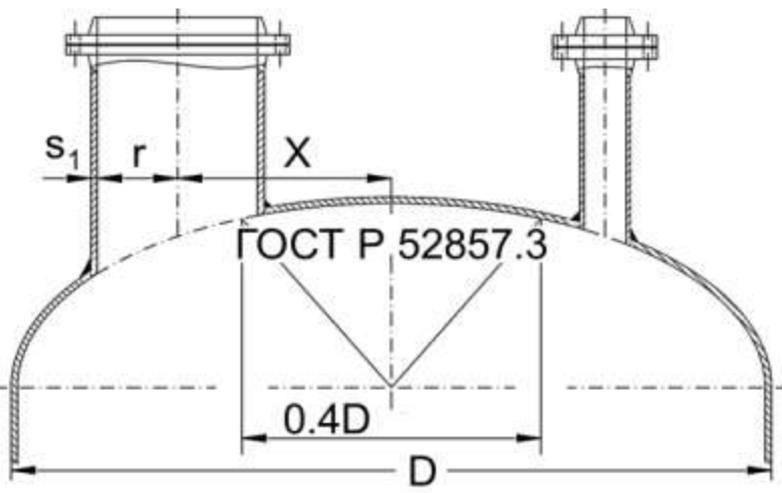
Зона	σ_m , МПа	$(\sigma_m + \sigma_b)^{top}$, МПа	$(\sigma_m + \sigma_b)^{bot}$, МПа
1	140	220	187
2	133	140	160

$$\begin{cases} \sigma_m^{max} = 85 \text{ МПа} \leq [\sigma] = 162 \text{ МПа} \\ (\sigma_m + \sigma_b)^{max} = 196 \text{ МПа} \leq [\sigma]_M = 243 \text{ МПа} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \sigma_m^{max} = 140 \text{ МПа} \leq [\sigma] = 162 \text{ МПа} \\ (\sigma_m + \sigma_b)^{max} = 220 \text{ МПа} \leq [\sigma]_M = 243 \text{ МПа} \end{cases}$$

Определение допускаемых нагрузок

	$[F_x]$, кН	$[F_y]$, кН	$[F_z]$, кН	$[M_x]$, кН·м	$[M_y]$, кН·м	$[M_z]$, кН·м
Штуцер на цилиндрической обечайке						
МКЭ	27.9	27.9	39.5	42	42	59.4
ГОСТ Р 52857.3	-	-	247	136	41	-
WRC 297	-	-	395	216	113	-
Штуцер на эллиптическом днище						
МКЭ	10.7	10.7	15.1	12.9	12.9	18.3
ГОСТ Р 52857.3	-	-	-	-	-	-
WRC 297	-	-	281	27	27	-



- В соответствии с ГОСТ 52857.3 и WRC 297 значения допускаемых нагрузок определяются независимо друг от друга;
- Коэффициент запаса по допускаемым нагрузкам составляет 2.1 в случае штуцера на цилиндрической обечайке, 1.15 – на эллиптическом днище;
- Расчёт штуцера на эллиптическом днище по ГОСТ Р 52857.3 не может быть выполнен, т.к. $s_1 + r + X > 0.2 \cdot D$.



Анализ результатов

- в работе исследовано НДС и проведена оценка прочности трёх типов штуцеров (люк, КИП, технологический штуцер);
- выявлено сингулярное поведение напряжений вблизи места врезки штуцера в корпус колонны;
- параметры КЭ моделей ($h^e = 50$ мм для полной модели, $h^e = 10$ мм для субмодели) обеспечивают сходимость метода конечных элементов;
- рассмотрены два варианта укрепления штуцеров (накладное кольцо, утолщение патрубка);
- предложены рекомендации по выбору того или иного варианта укрепления штуцера;
- в случае расчёта технологических штуцеров при действии внешних нагрузок показаны ограничения нормативных документов;
- с помощью модуля ANSYS DesignXplorer предложена методика выбора наиболее опасной конфигурации внешних нагрузок на штуцер.