



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:

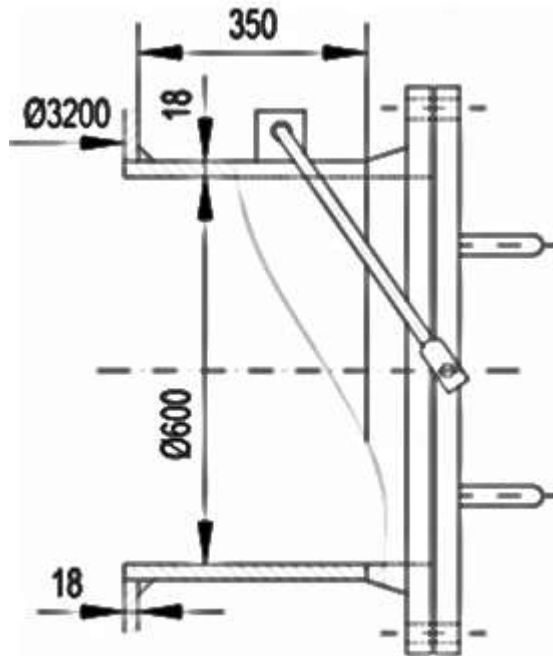
- расчетное давление 1 МПа;
- расчетная температура 250°C;
- материальное исполнение
 - корпус – сталь 09Г2С
($E = 1.76 \cdot 10^5$ МПа, $\nu = 0.3$,
 $[\sigma] = 162$ МПа)*,
 - штуцеры – сталь 09Г2С
($E = 1.76 \cdot 10^5$ МПа, $\nu = 0.3$,
 $[\sigma] = 162$ МПа)*;
- высота колонны 32 м;
- вместимость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

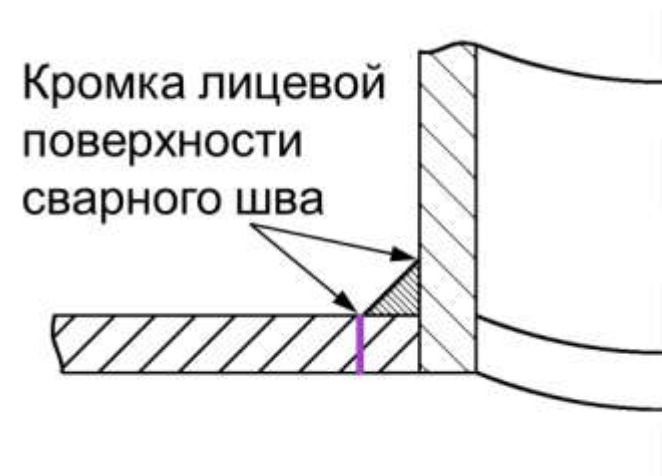
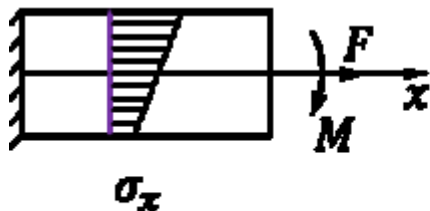
$$\begin{cases} \sigma_m \leq [\sigma] \\ \sigma_m + \sigma_b \leq [\sigma]_M \end{cases}$$

где $[\sigma]_M = 1.5 [\sigma]$;

σ_m – мембранные напряжения;

σ_b – изгибные напряжения.

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



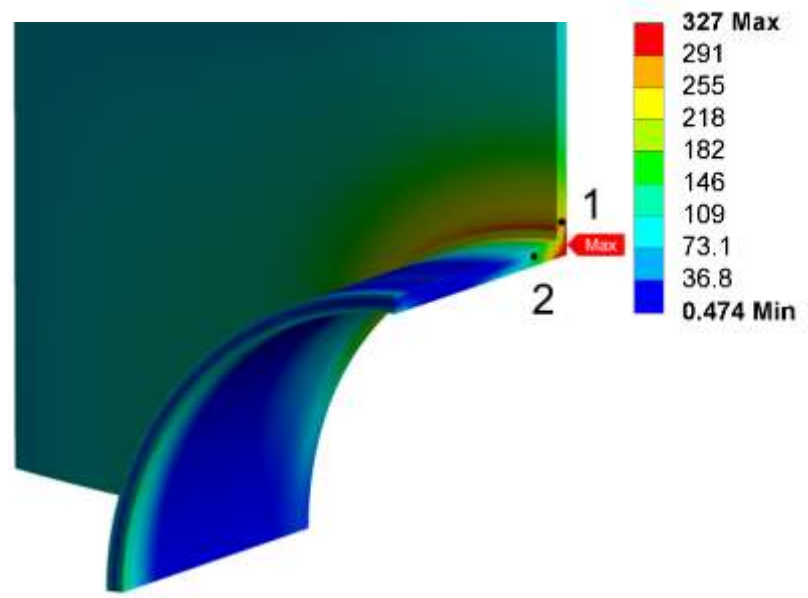
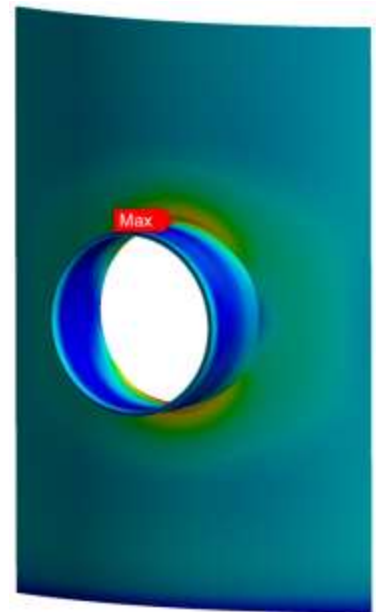
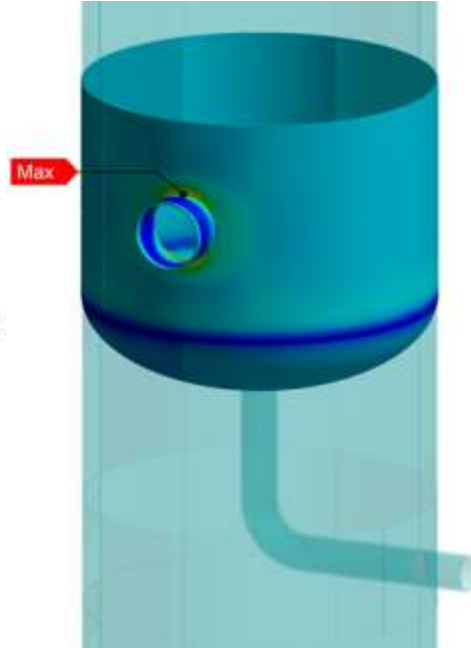
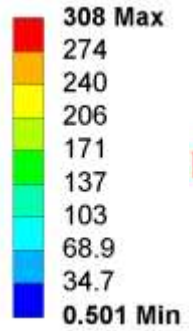
σ_m и σ_b определяются вблизи кромки лицевой поверхности сварного шва*

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

Распределение эквивалентных напряжений, МПа

Полная модель

Субмодель



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 |

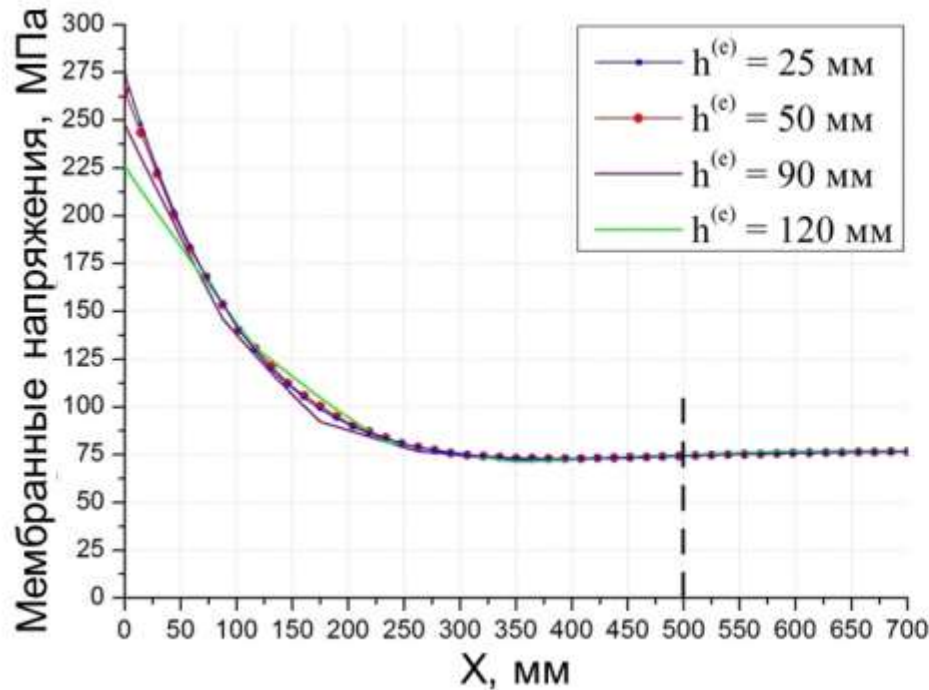
$$\begin{cases}
 \sigma_m^{max} = 212 \text{ МПа} > [\sigma] = 162 \text{ МПа} \\
 (\sigma_m + \sigma_b)^{max} = 240 \text{ МПа} \leq [\sigma]_M = 243 \text{ МПа}
 \end{cases}$$

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

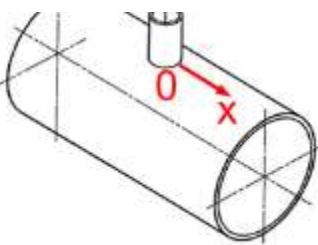
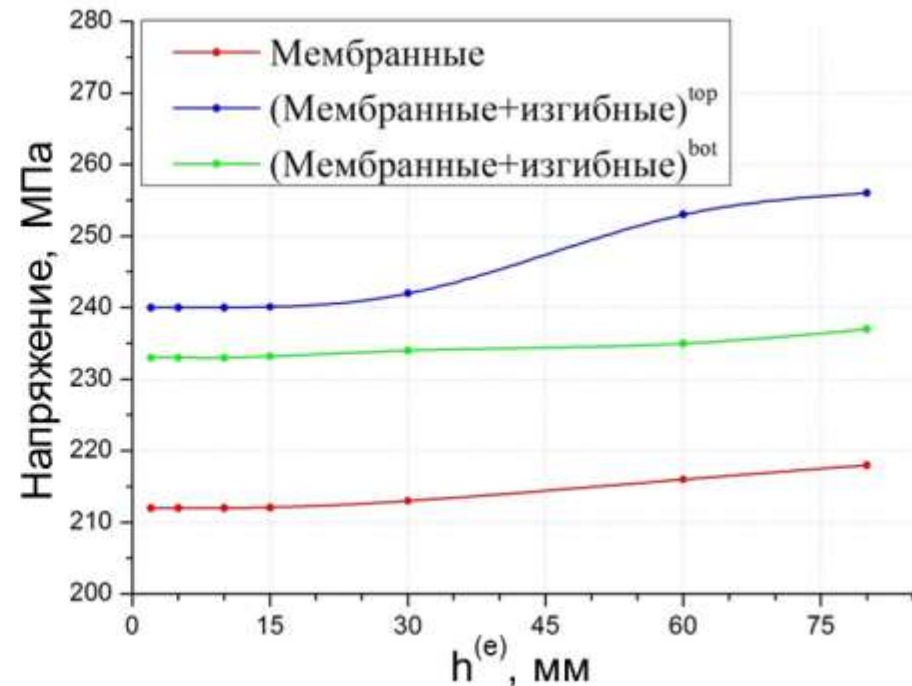
Сходимость метода конечных элементов

Размер субмодели

Полная модель:

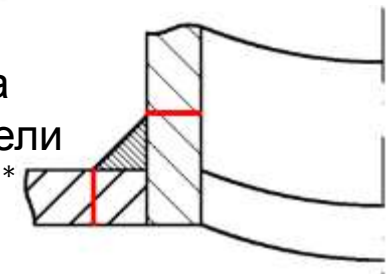


Субмодель:



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 ($\sim 0.2\sqrt{Ds}$)**

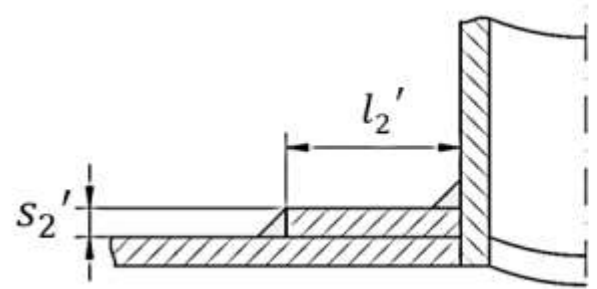


* Феодосьев В.И. Сопротивление материалов

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

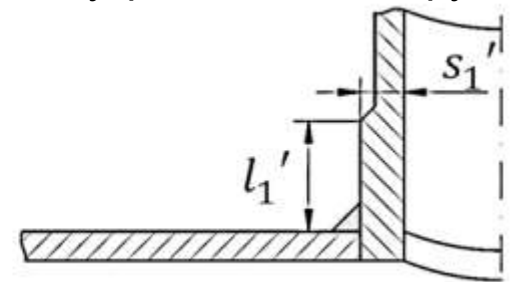
Варианты укрепления штуцеров. КЭ постановка

- 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



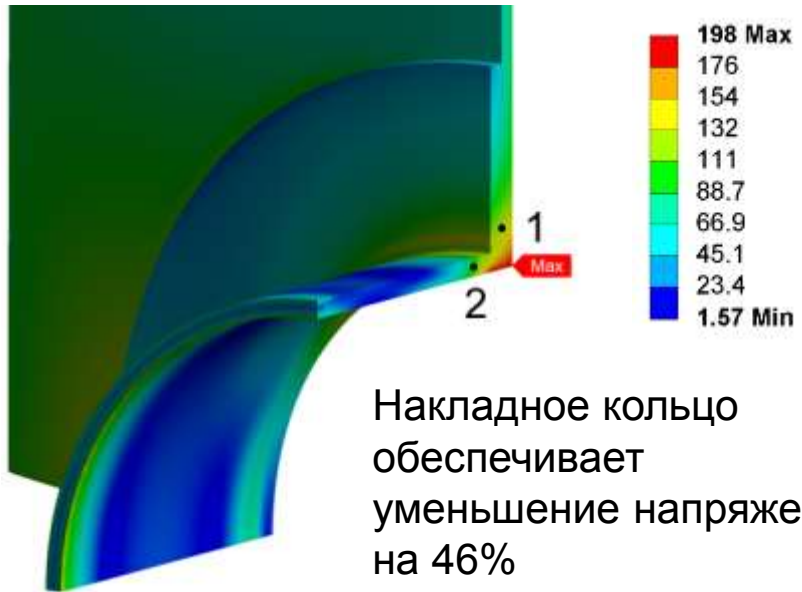
Тип элемента SOLID186
 $s_2' = 18 \text{ мм}, l_2' = 200 \text{ мм}$
 $h^{(e)} = 10 \text{ мм} (\sim 0.2\sqrt{Ds})^*$
NN – 191 391
NE – 41 899
NDF – 574 173



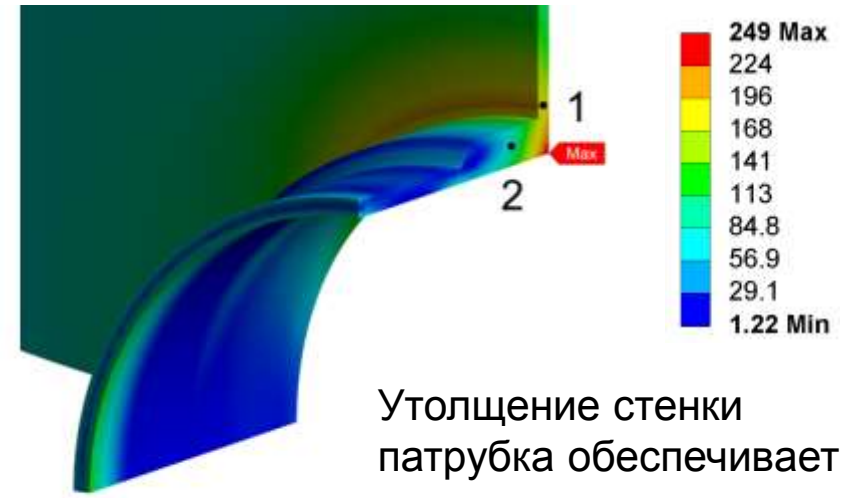
Тип элемента SOLID186
 $s_1' = 36 \text{ мм}, l_1' = 150 \text{ мм}$
 $h^{(e)} = 10 \text{ мм} (\sim 0.2\sqrt{Ds})^*$
NN – 145 710
NE – 32 039
NDF – 437 130

* 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 |

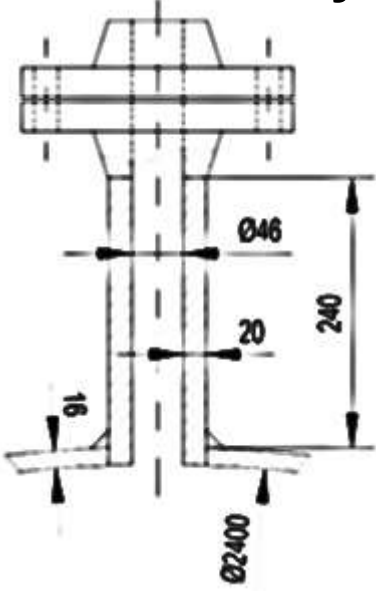
$$\begin{cases} \sigma_m^{max} = 121 \text{ МПа} \leq [\sigma] = 162 \text{ МПа} \\ (\sigma_m + \sigma_b)^{max} = 133 \text{ МПа} \leq [\sigma]_M = 243 \text{ МПа} \end{cases}$$

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

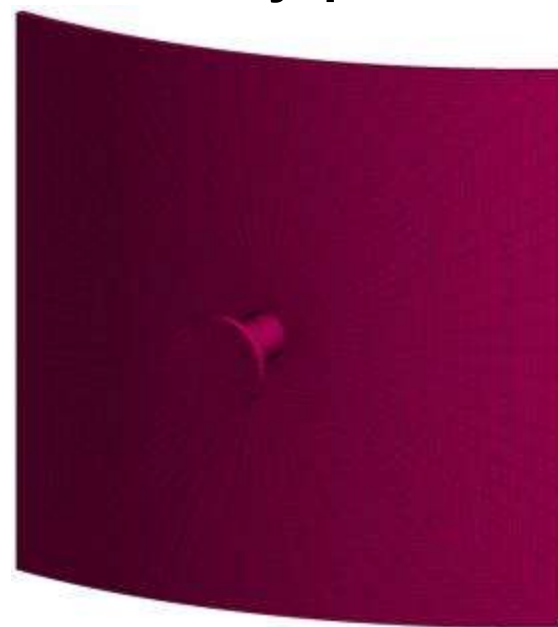
$$\begin{cases} \sigma_m^{max} = 154 \text{ МПа} \leq [\sigma] = 162 \text{ МПа} \\ (\sigma_m + \sigma_b)^{max} = 208 \text{ МПа} \leq [\sigma]_M = 243 \text{ МПа} \end{cases}$$

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

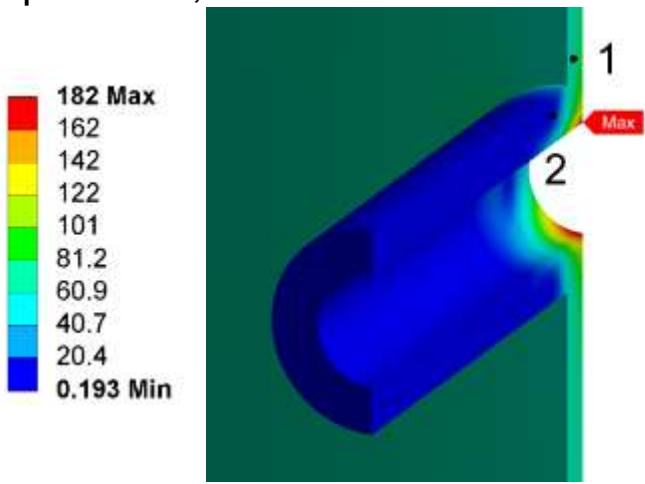
Расчет штуцера для КИП при действии внутреннего давления



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 |

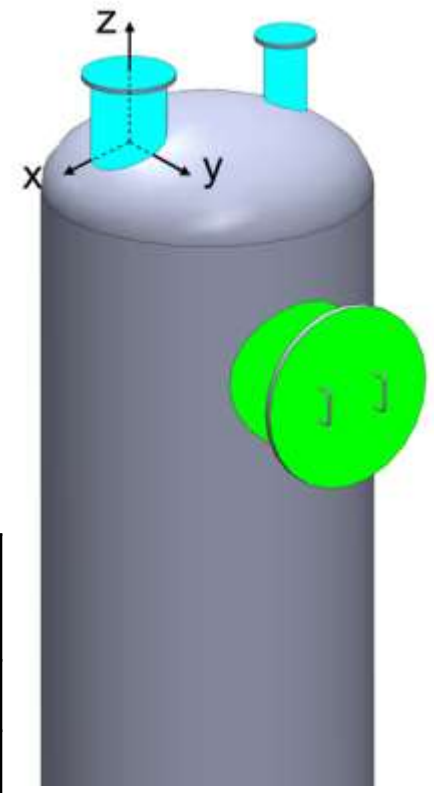
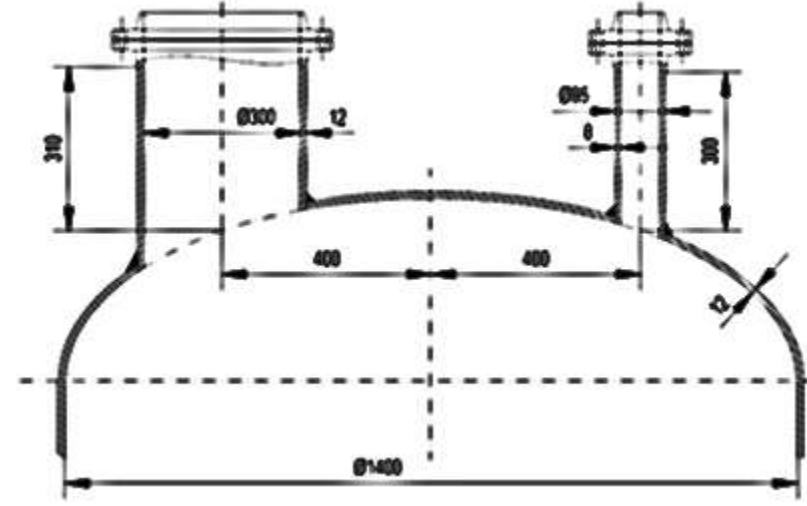
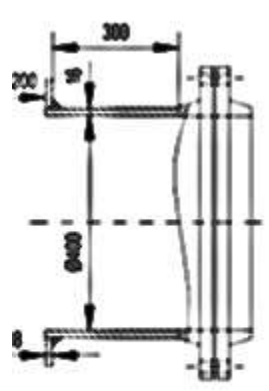
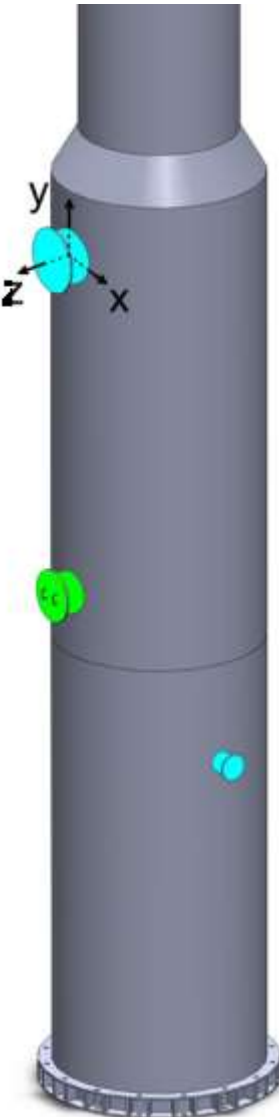
$$\begin{cases} \sigma_m^{max} = 72 \text{ МПа} \leq [\sigma] = 162 \text{ МПа} \\ (\sigma_m + \sigma_b)^{max} = 86 \text{ МПа} \leq [\sigma]_M = 243 \text{ МПа} \end{cases}$$

* 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



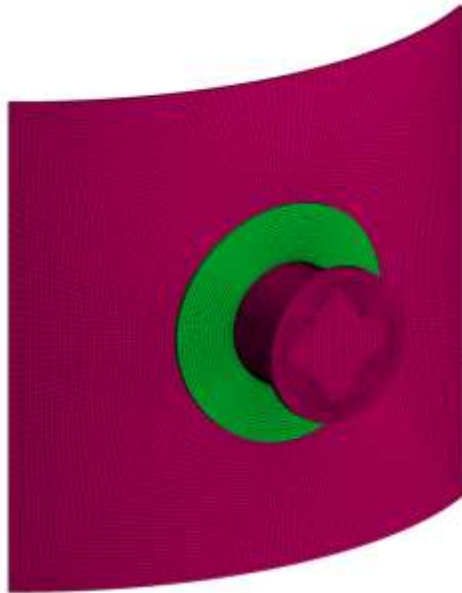
С помощью модуля ANSYS DesignXplorer определена опасная конфигурация нагрузок в месте врезки штуцера*:

| 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



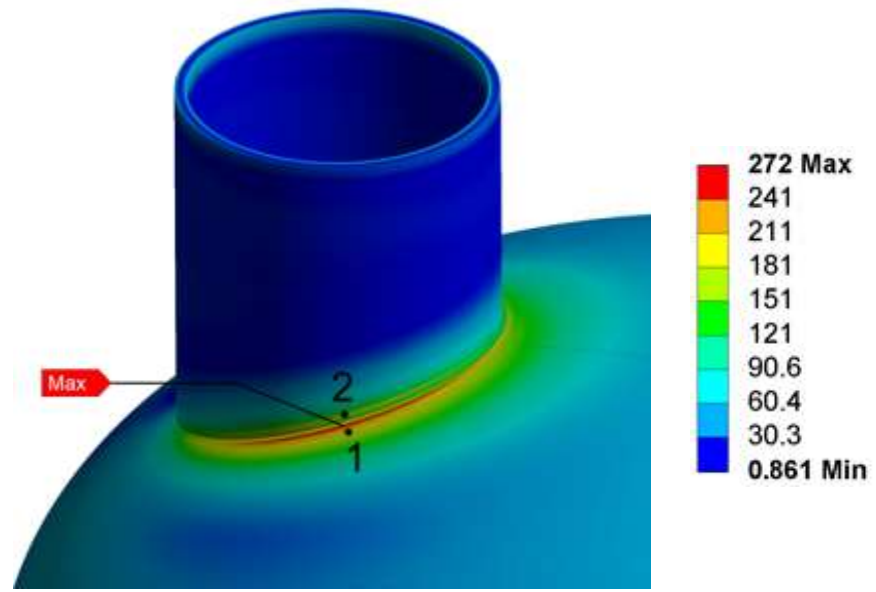
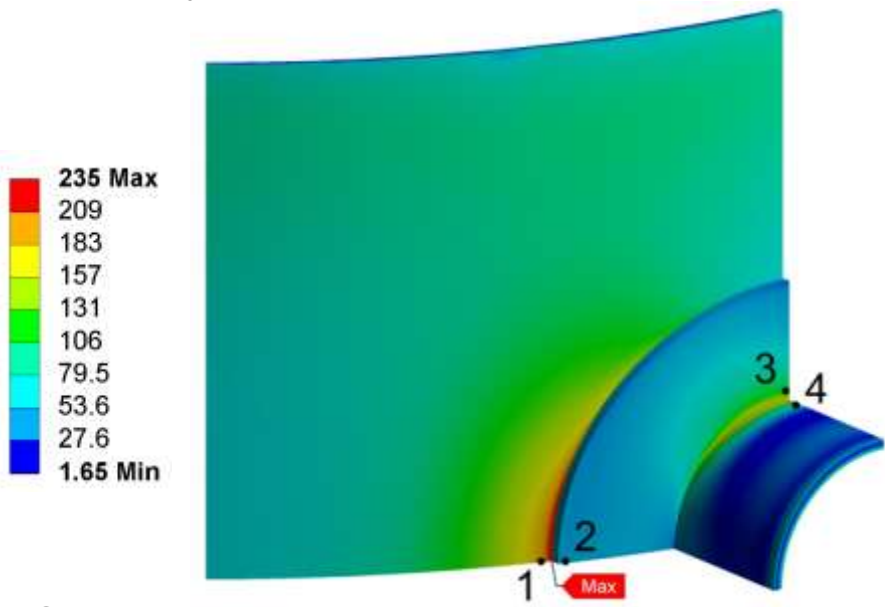
Тип элемента SOLID186
 $h^{(e)} = 10 \text{ мм}$
NN – 333 393
NE – 64 261
NDF – 1 000 179

* 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 |

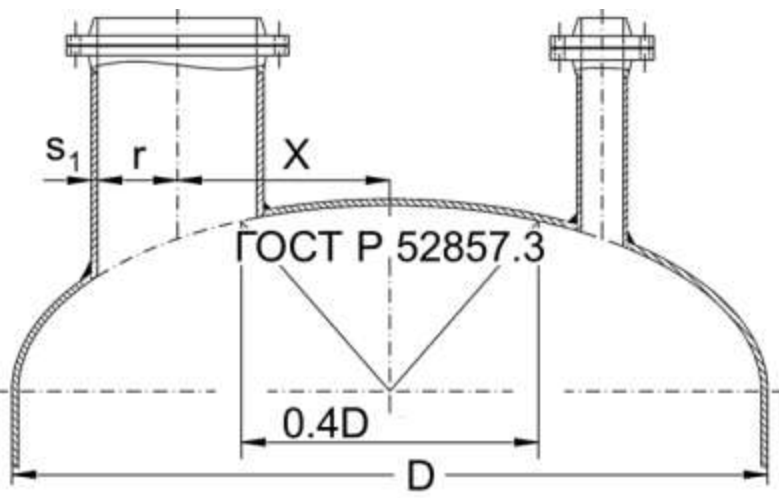
| Зона | σ_m , МПа | $(\sigma_m + \sigma_b)^{top}$, МПа | $(\sigma_m + \sigma_b)^{bot}$, МПа |
|------|------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 1 | 140 | 220 | 187 |
| 2 | 133 | 140 | 160 |

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

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

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.