

# Расчет сосудов под высоким давлением при повышенных температурах

Выполнила: Качевская О.А. гр.5030103/00301

Научный руководитель: Орлов А.И., старший преподаватель ВШТМиМФ

# Актуальность.

Актуальность работы вытекает из отсутствия в российской нормативной документации (серия ГОСТ 34233-2017) требований, норм и рекомендаций к численному моделированию конструкций более сложными методами, например, методом упругопластического анализа.

# Цель.

Исследовать метод упругопластического анализа и показать с помощью МКЭ, что использование этого метода демонстрирует повышенную прочность конструкций по сравнению с анализами, осуществленными другими методами.

# Задачи.

- 1) Провести сравнительный анализ.
- 2) Построить практикоориентированную модель.
- 3) Провести анализ и сделать соответствующие выводы.

# Сравнительный анализ.

## ГОСТ 34233-2017; ГОСТ 59115-2021

Метод предельных нагрузок:

Предполагает определение расчетным путем не напряжений, а максимальной нагрузки, которую может выдержать конструкция не разрушаясь.

Условие прочности:  $F \leq [F] = \frac{F_{\text{пр}}}{n_F}$ ,  $n_F$  - коэффициент запаса прочности.

Условный упругий расчет напряжений:

Осуществляется за счет определения значения напряжения с учетом возможной поправки на упругопластическое деформирование материала при помощи аппроксимации диаграммы растяжения сжатия материала.

Смешанный метод:

Метод, при котором напряженно-деформированное состояние рассматриваемых узлов определяют с помощью условного упругого расчета, а оценку проводят по предельному состоянию пластической балки-полоски, то есть кривая напряжений-деформаций представляет собой прямую.

## ASME 2013

Анализ предельных нагрузок и анализ упругих напряжений рассчитываются аналогично ГОСТ.

Метод упругопластического анализа:

Подразумевает, что нагрузка при сжатии определяется на основе упругопластического анализа, учитывающего как приложенную нагрузку, так и характеристики деформации детали, ее физическую и геометрическую нелинейность.

$$\varepsilon_L = \varepsilon_{Lu} \cdot \exp \left[ - \left( \frac{\alpha_{sl}}{1 + m_2} \right) \left( \left\{ \frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{3\sigma_e} \right\} - \frac{1}{3} \right) \right]$$

$$\varepsilon_{\text{req}} + \varepsilon_{\text{cf}} \leq \varepsilon_L$$

Кривая «напряжение-деформация», которая проектируется для учета характеристики идеальной пластичности и истинного предельного состояния, включает в себя и информацию о поведении тела при упрочнении в зависимости от различных температур.

# Сравнительный анализ.

## ГОСТ 34233-2017; ГОСТ 59115-2021

- 1) Все методы расчетов, применяемые для сосудов, просты. Они либо линейные, либо аппроксимируются и линеаризуются.
- 2) Более сложные методы не регламентированы
- 3) Нормированы только напряжения

## ASME 2013

- 1) Используются как и простые методы, аналогично ГОСТ, так и более сложные.
- 2) Нормируются и напряжения, и деформации.

# Синтез аммиака.

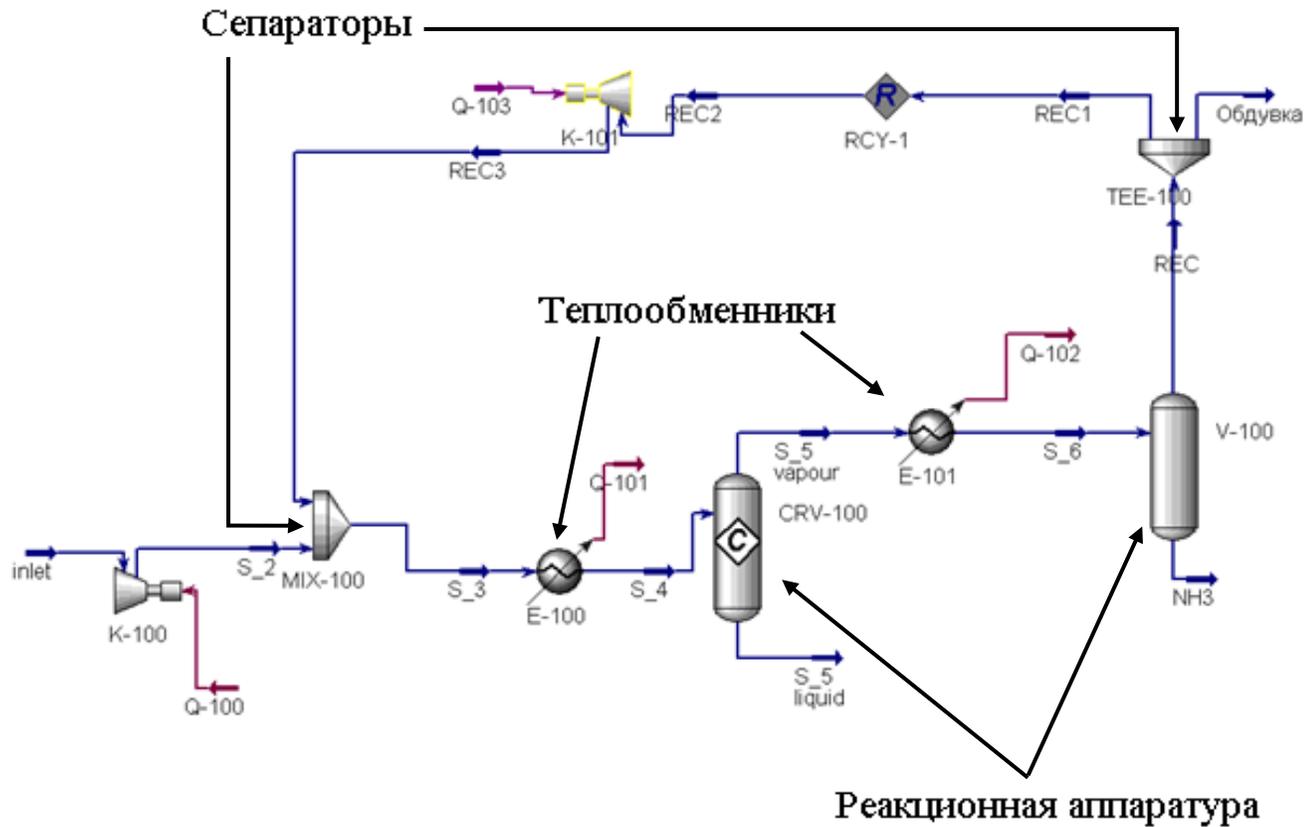


Рис. 1. Схема блока синтеза аммиака

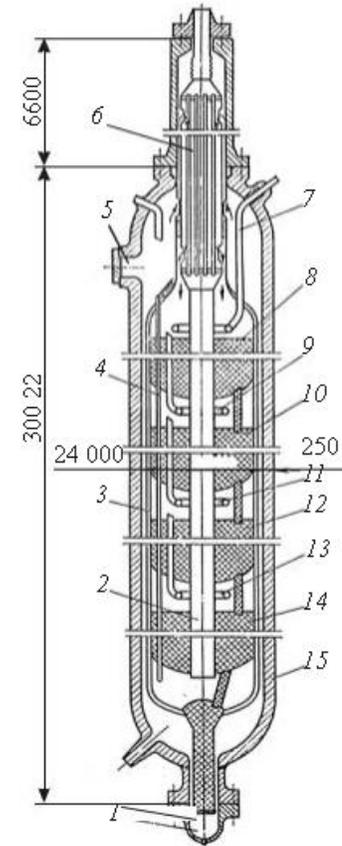


Рис. 2. Пример колонны синтеза аммиака

# Спроектированная модель.

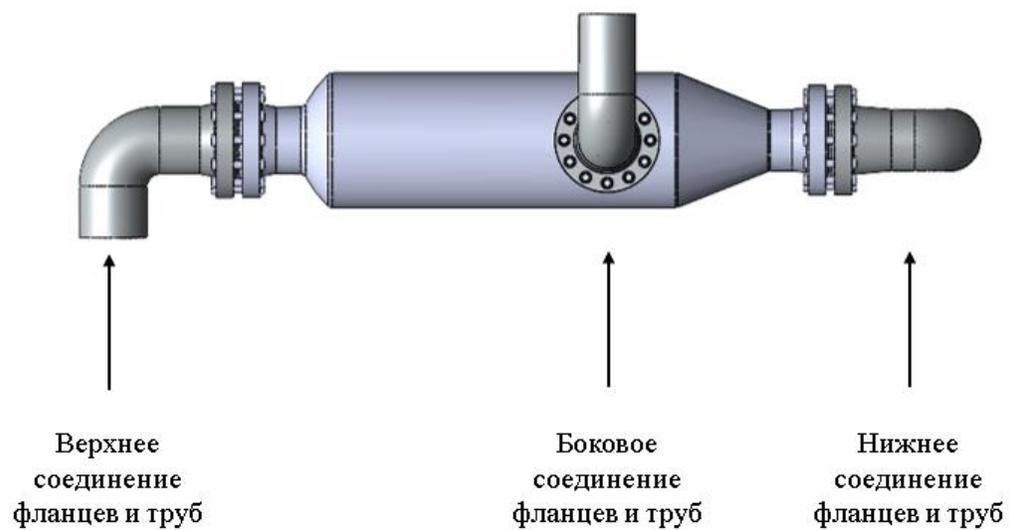


Рис. 3. Упрощенная модель реакционной колонны

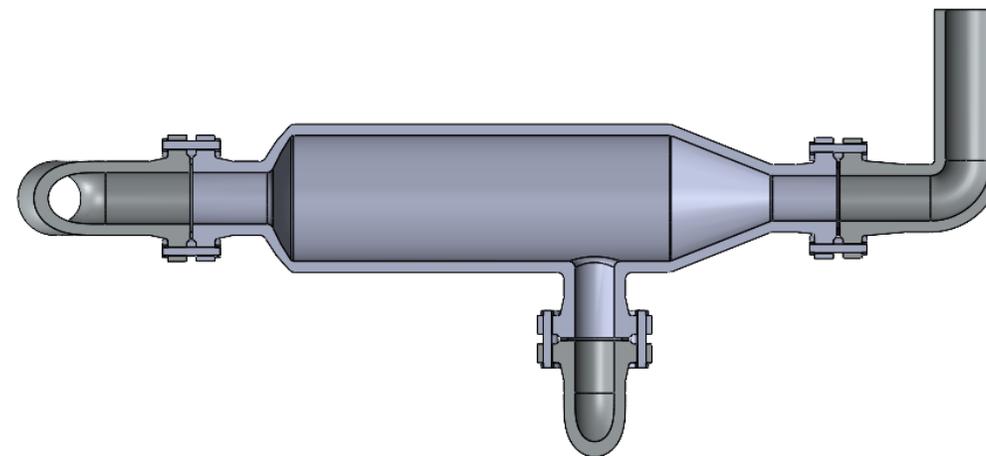


Рис. 4. Упрощенная модель реакционной колонны в разрезе

# Материал.

Structural steel.

Температура: 100 – 600 °C

Плотность:  $7850 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$

Коэффициент теплового расширения:  
 $1.2 - 1.47 \cdot 10^{-5} \frac{1}{^\circ\text{C}}$

Модуль Юнга:  
 $2.14 - 1.57 \cdot 10^{11} \text{ Па}$

Коэффициент Пуассона:  
0.3 – 0.24

Предел текучести материала:  
250 Мпа

Предел прочности материала:  
460 Мпа

Коэффициент теплопроводности:  
 $40 - 31 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot^\circ\text{C}}$

ХН35ВТЮ

Температура: 100 – 600 °C

Плотность:  $8040 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$

Коэффициент теплового расширения:  
 $1.66 - 1.85 \cdot 10^{-5} \frac{1}{^\circ\text{C}}$

Модуль Юнга:  
 $2.00 - 1.60 \cdot 10^{11} \text{ Па}$

Коэффициент Пуассона:  
0.2987 – 0.1940

Предел текучести материала:  
589 Мпа

Предел прочности материала:  
883 Мпа

Коэффициент теплопроводности:  
 $15.4 - 24.7 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot^\circ\text{C}}$

Gasket Linear Uploading

Данная модель используется для моделирования поведения тонких уплотнительных соединений. В качестве основных данных используется модель сжатия с разгрузкой.

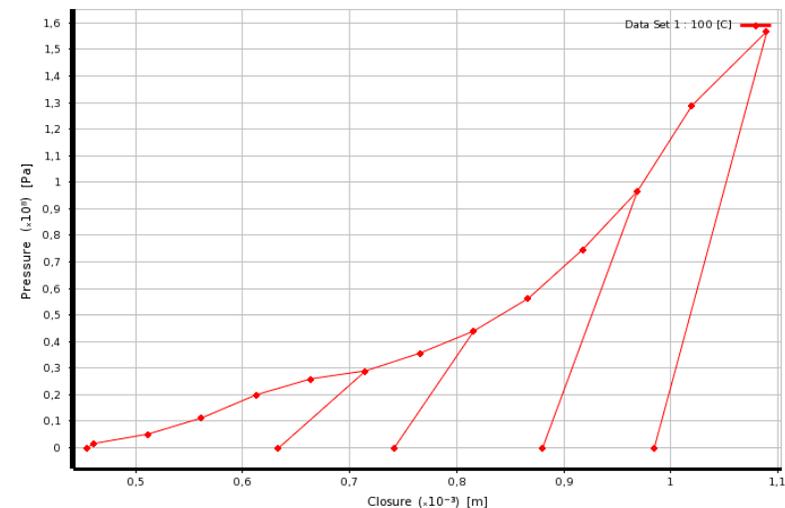


Рис. 5. Модель сжатия с разгрузкой

Коэффициент теплопроводности:  
 $15.4 - 24.7 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot^\circ\text{C}}$

# Сетка.

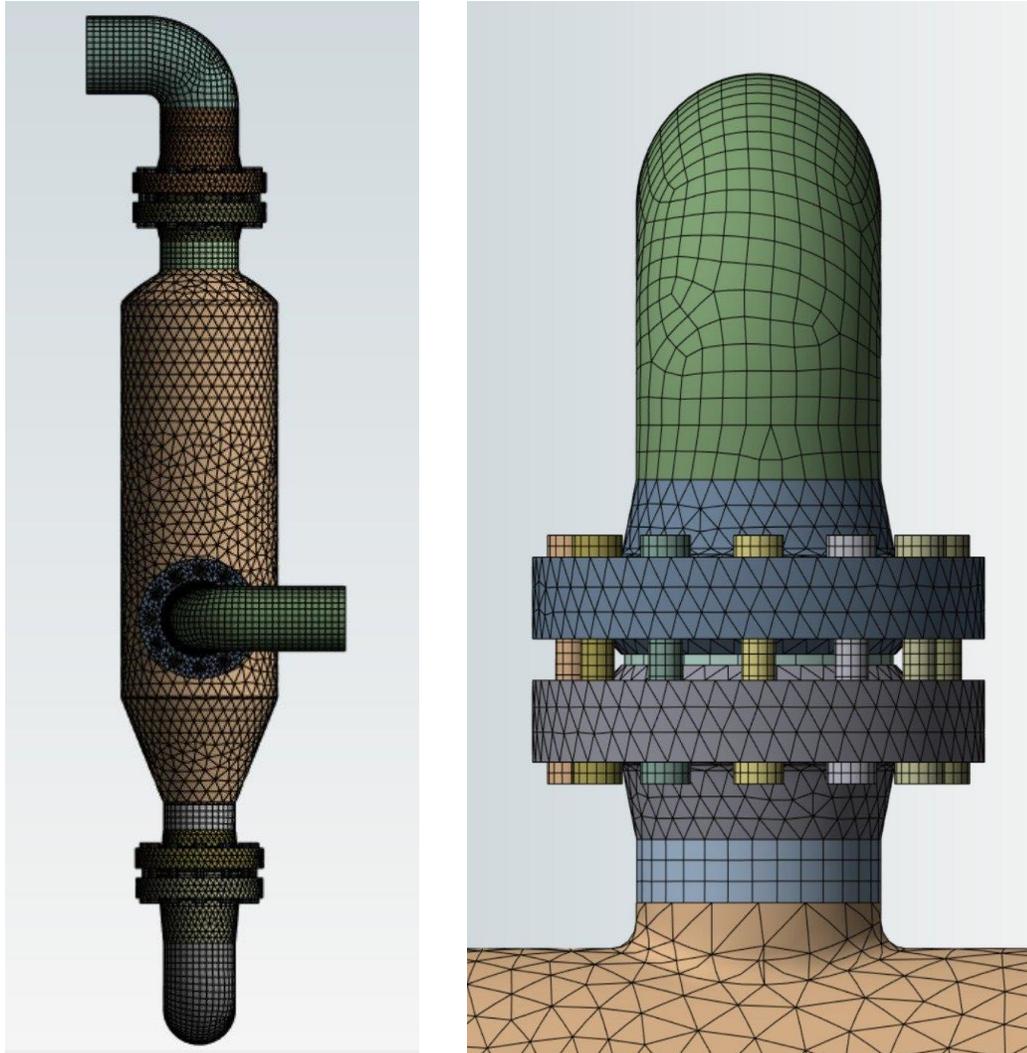


Рис. 6. Построенная сетка

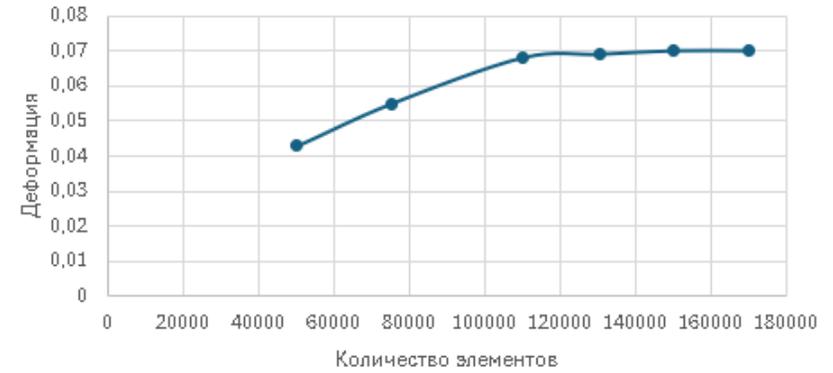


Рис. 7. Сеточная сходимость

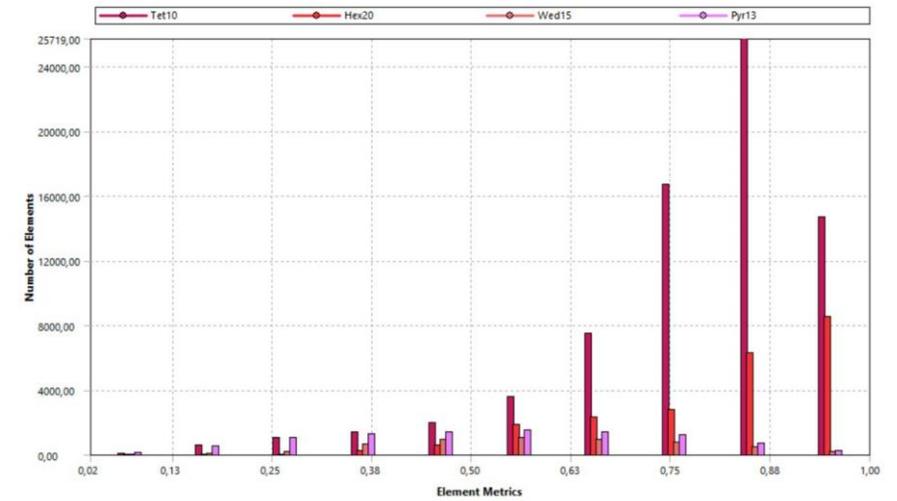


Рис. 8. Метрика элементов

# 1 этап. Получение распределений температур.

Сосуд был нагружен изнутри температурой 500 °С, снаружи – 22 °С.

$$Re = \frac{V \cdot d}{\nu} \rightarrow Nu = 0,021Re^{0,8}Pr_{ж}^{0,43}\varepsilon_e \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_c}\right)^{0,25} \rightarrow \alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d}$$

$Re$  – число Рейнольдса,  $V$  – скорость потока газа,  $d$  – диаметр трубы/обечайки,  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости,  $Nu$  – число Нуссельта,  $Pr_{ж}$  – число Прандтля для жидкости/газа,  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности.

$$\text{Задано: } V = 15 \frac{\text{м}}{\text{с}}, \lambda = 53 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{С}}, \nu = 42.5 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2},$$
$$Pr_{ж} = 0.813, \varepsilon_e = 1, \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_c}\right)^{0,25} = 1$$

Коэффициенты теплоотдачи:

$$\alpha_T = 33.2 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\cdot\text{С}} - \text{для верхней трубы}$$

$$\alpha_M = 35.1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\cdot\text{С}} - \text{для средней трубы}$$

$$\alpha_B = 34.1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\cdot\text{С}} - \text{для нижней трубы}$$

$$\alpha_V = 27.7 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\cdot\text{С}} - \text{для сосуда}$$

$$\alpha_A = 25 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\cdot\text{С}} - \text{для воздуха}$$

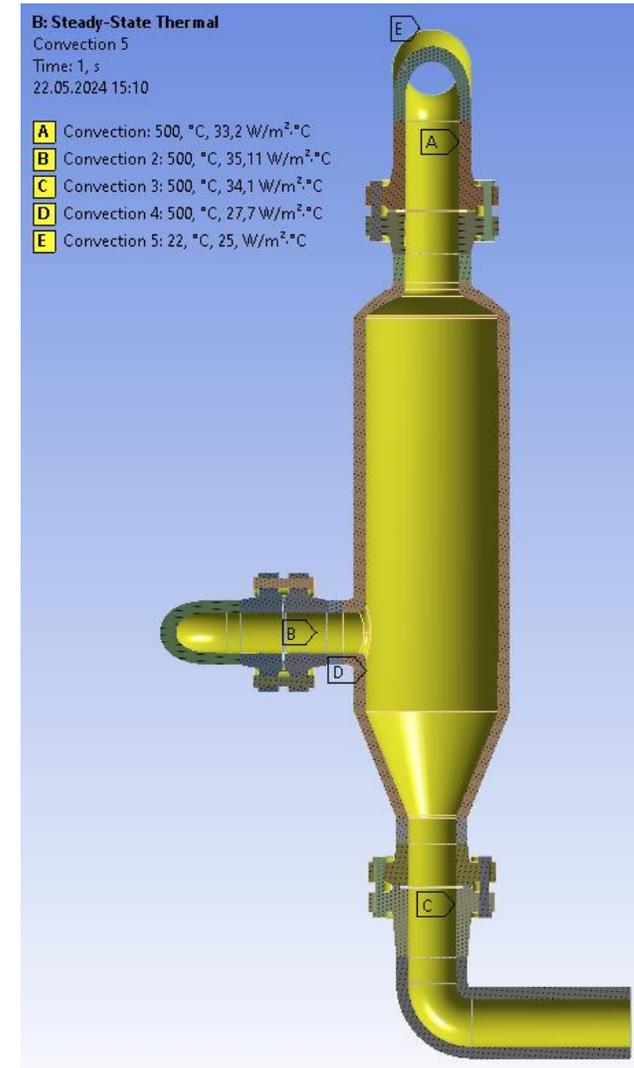


Рис. 9. Заданная конвекция

# Распределения температур.

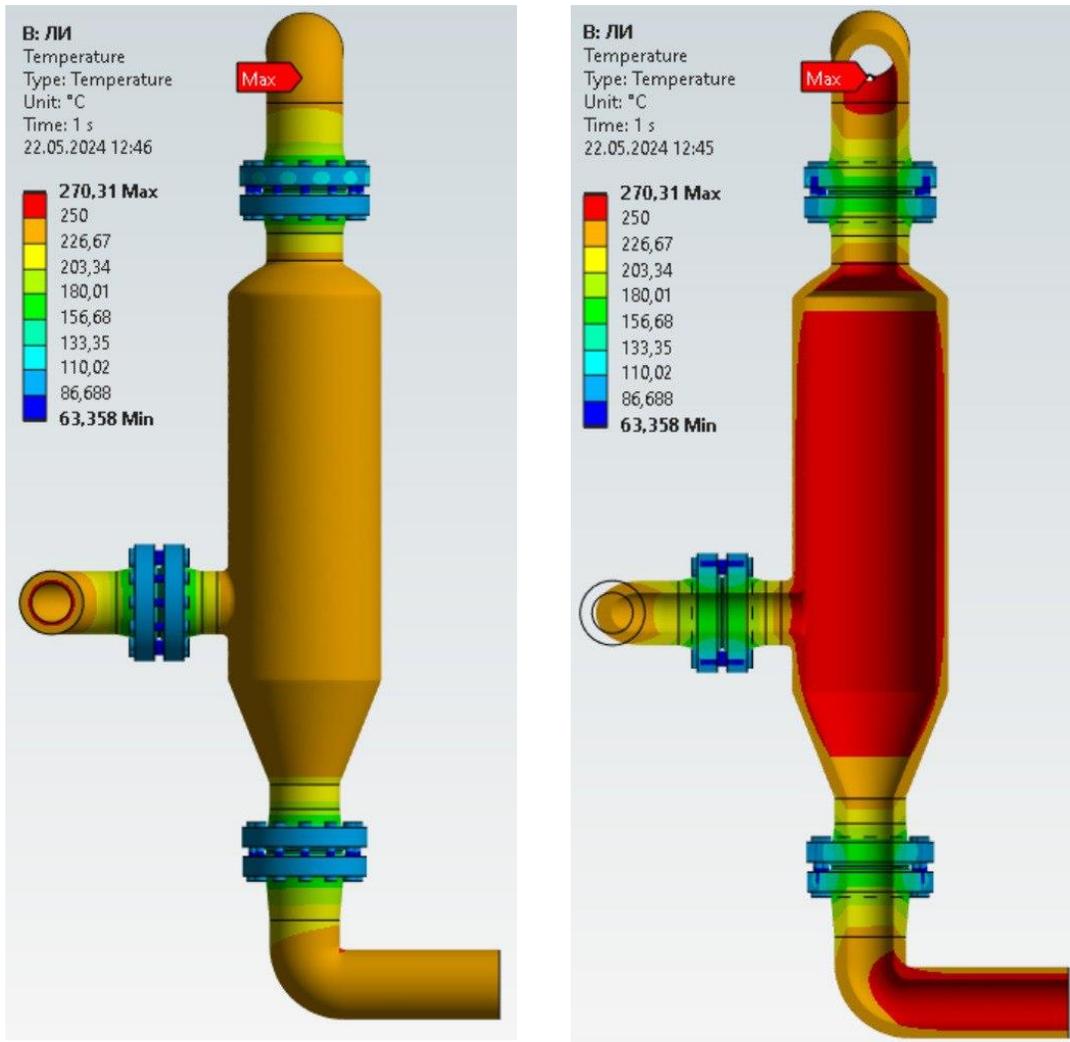


Рис. 10. Результаты температурных расчетов для линейной постановки

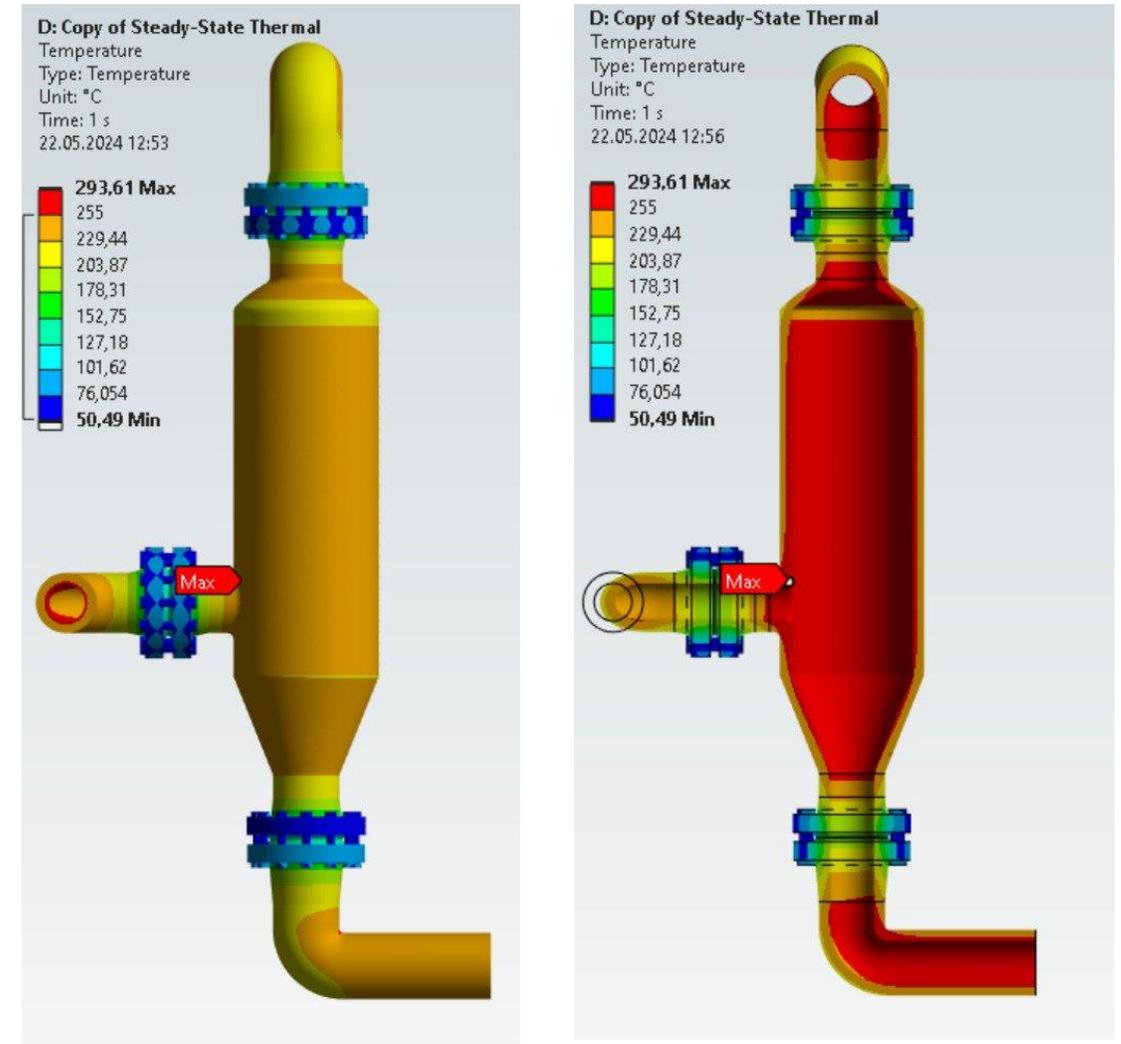


Рис. 11. Результаты температурных расчетов для нелинейной постановки

## 2 этап. Получение распределений напряжений и деформаций.

1 этап. Затяжка болтов и ограничения на передвижения.

- Bolt Pretention (Нагрузка: 200кН)
- Displacements (Приложены к срезам верхней и нижней труб)
- Fix support (Приложено к срезу средней трубы)

2 этап. Нагрузка внутренним давлением.

К внутренней части сосуда было приложено давление 20 МПа

3 этап. Учет полученных распределений температур

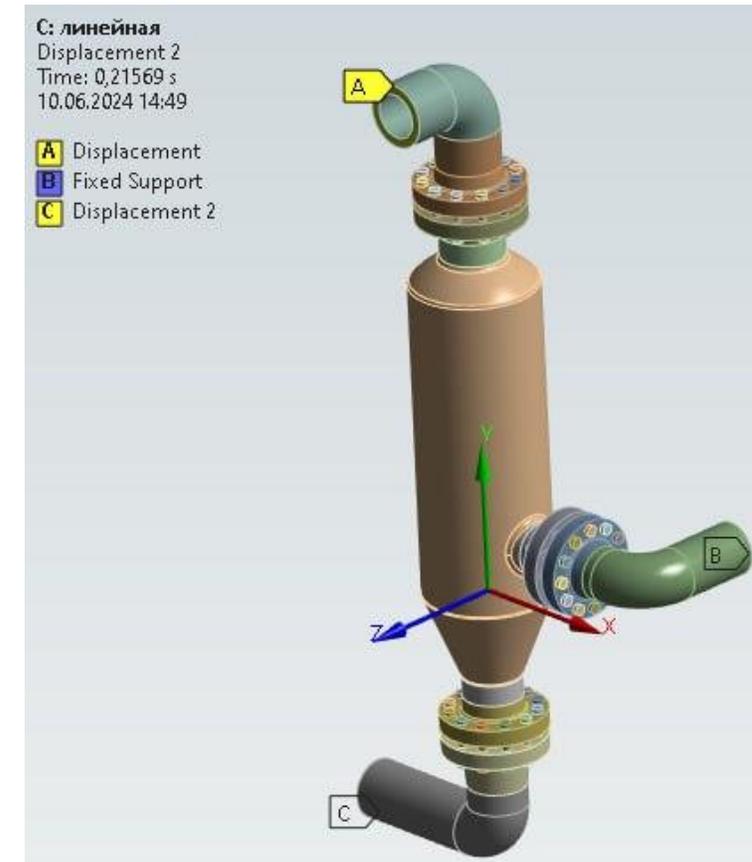


Рис. 12. Заданная затяжка болтов и ограничения на передвижения

# Полученные распределения перемещений.

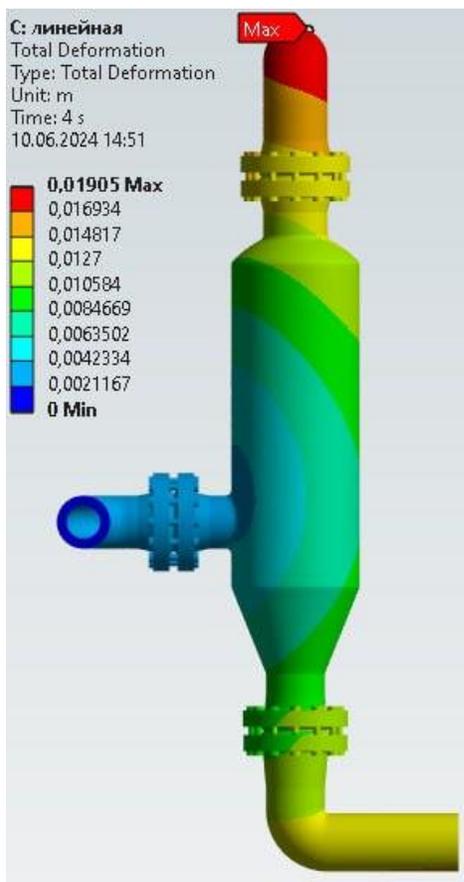


Рис. 13. Перемещения для линейной постановки

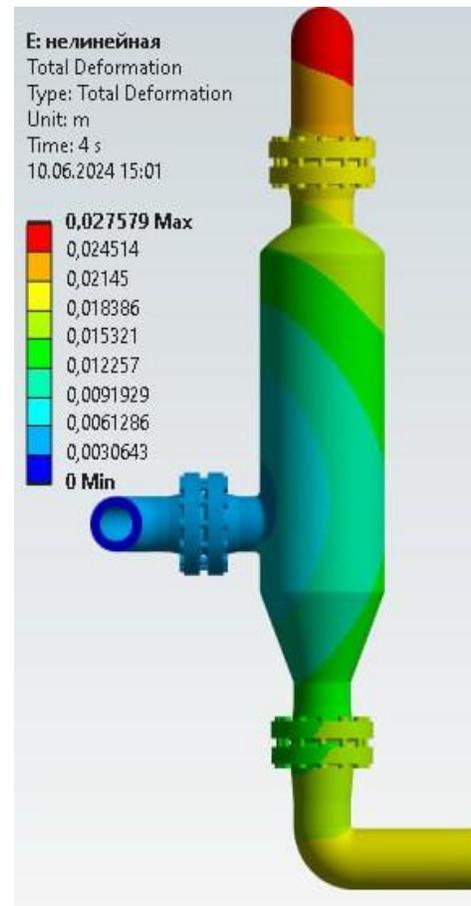
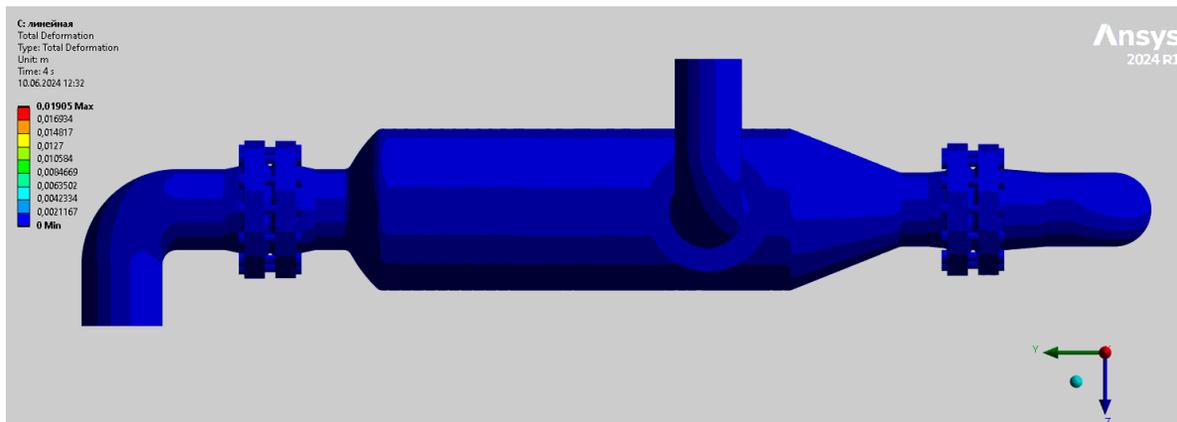
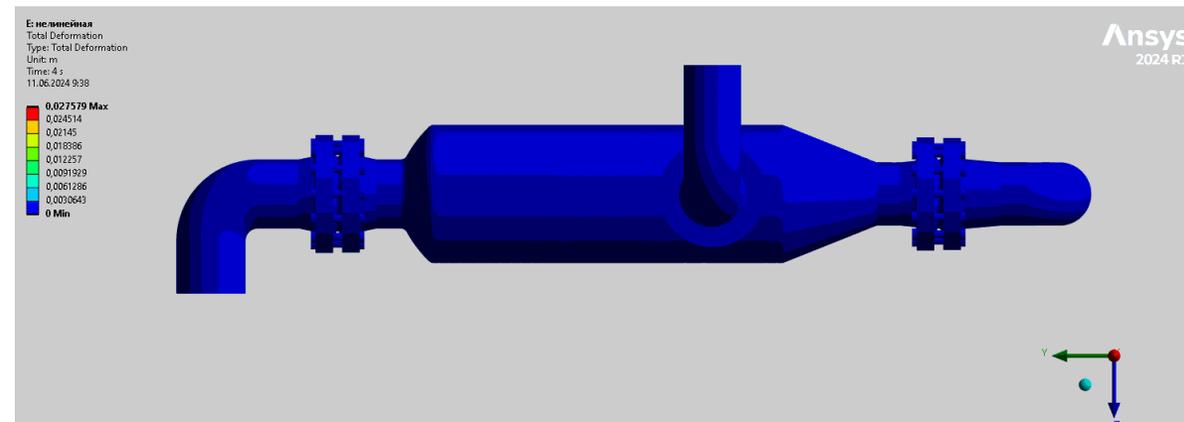


Рис. 14. Перемещения для нелинейной постановки

# Полученные распределения перемещений.



Перемещения для линейной постановки



Перемещения для нелинейной постановки

# Полученные распределения напряжения для линейной постановки.

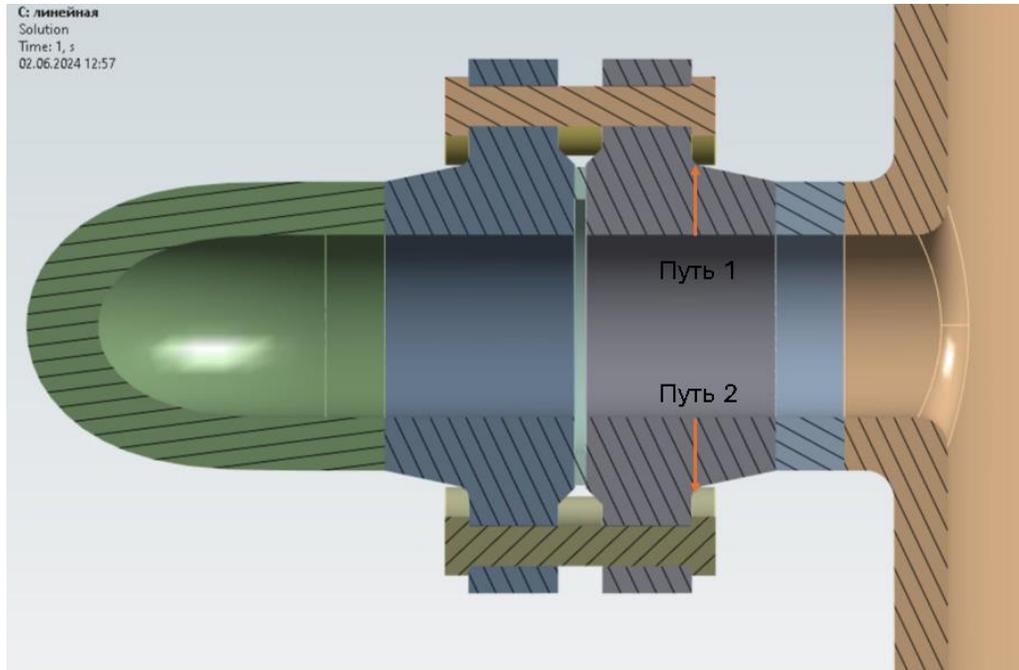


Рис. 15. Пути линейаризации

$$\begin{cases} \sigma_m \leq [\sigma] \\ \sigma_m + \sigma_{и} \leq [\sigma]_m \end{cases}$$

Где  $[\sigma]_m$  – допускаемое условно-упругое напряжение при расчетное температуре для оценки напряжений, определяемых по суммам составляющих общих или местных мембранных и общих изгибных напряжений,  $[\sigma]_m = 1.5[\sigma]$ ,  $[\sigma]$  – допускаемое напряжение при расчете по предельным нагрузкам сосудов и аппаратов из различных видов сталей.

$$\begin{cases} 36.728 \text{ МПа} \leq 166 \text{ МПа} \\ 81.071 \text{ МПа} \leq 250 \text{ МПа} \end{cases}$$

# Полученные распределения пластических деформаций для нелинейной постановки.

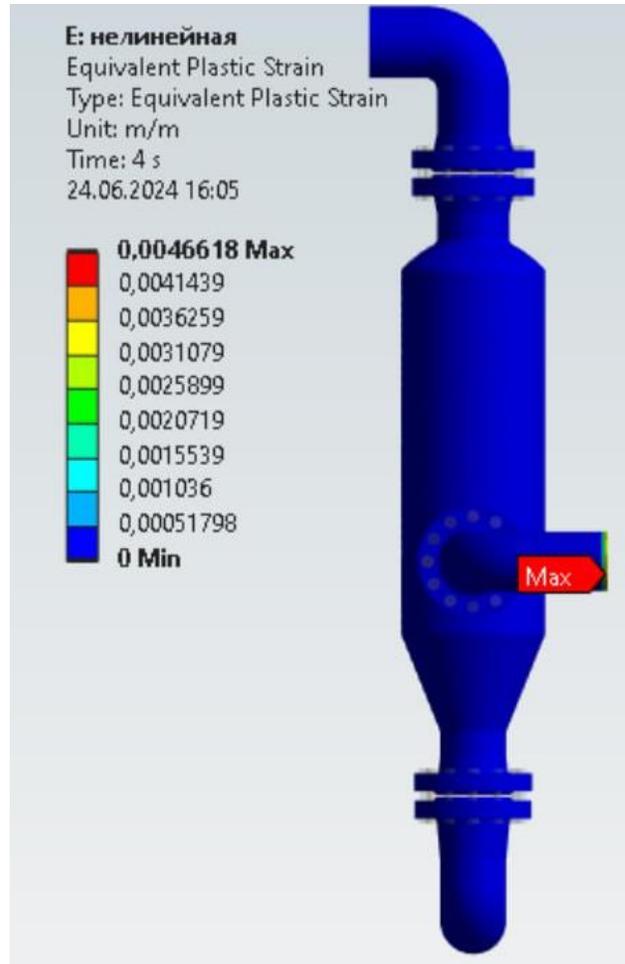


Рис. 16. Пластические деформации

$$\sigma_1 = 103 \text{ МПа}$$

$$\sigma_2 = 132.7 \text{ МПа}$$

$$\sigma_3 = 192 \text{ МПа}$$

$$\sigma_e = 78.5 \text{ МПа}$$

$$\varepsilon_{Lu} = m_2 = 1.9 \cdot \left( 0.93 - \frac{5.89}{8.83} \right) = 0.494$$

$$a_{sl} = 2.2$$

$$\varepsilon_L = \varepsilon_{Lu} \cdot \exp \left( - \left( \frac{a_{sl}}{1 + m_2} \right) \left( \left\{ \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3\sigma_e} \right\} - \frac{1}{3} \right) \right) = 0.055$$

$$\varepsilon_{req \text{ ср. фланец}} = 0$$

$$0 \leq 0.055$$

# Полученные распределения пластических деформаций для нелинейной постановки.

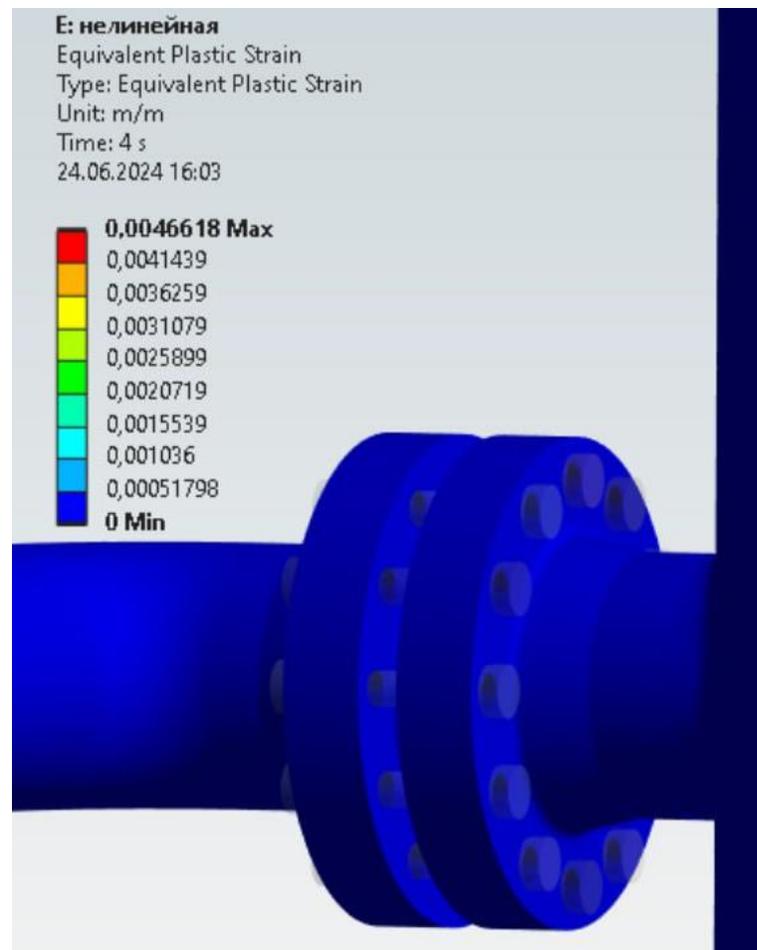


Рис. 17. Пластические деформации на среднем фланце

# Критерий приемки.

Для линейной постановки:

Мембранные напряжения:

$$UF = \frac{\sigma_{\text{расчет}}}{[\sigma]} = \frac{36.728}{166} = 0.22$$

$$UF = \frac{\text{Analysis Result}}{\text{Design Limit}} \text{ if } (> 1 \text{ fails})$$

Мембранные и изгибные напряжения:

$$UF = \frac{\sigma_{\text{расчет}}}{[\sigma]_m} = \frac{81.071}{250} = 0.324$$

Для нелинейного случая:

Деформация фланца в месте втулки:

$$UF = \frac{\varepsilon_{\text{расчет}}}{\varepsilon_L} = \frac{0}{0.055} = 0$$

# Практикоориентируемость.

Уменьшение  
материалоемкости сосуда.

Уменьшение трат на  
материалы.

Повышение  
производительности  
синтеза.

Увеличение  
экономической  
эффективности.

**Спасибо за внимание!**