

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: $F \leq [F] = \frac{F_{пр}}{n_F}$, 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.

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

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

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.

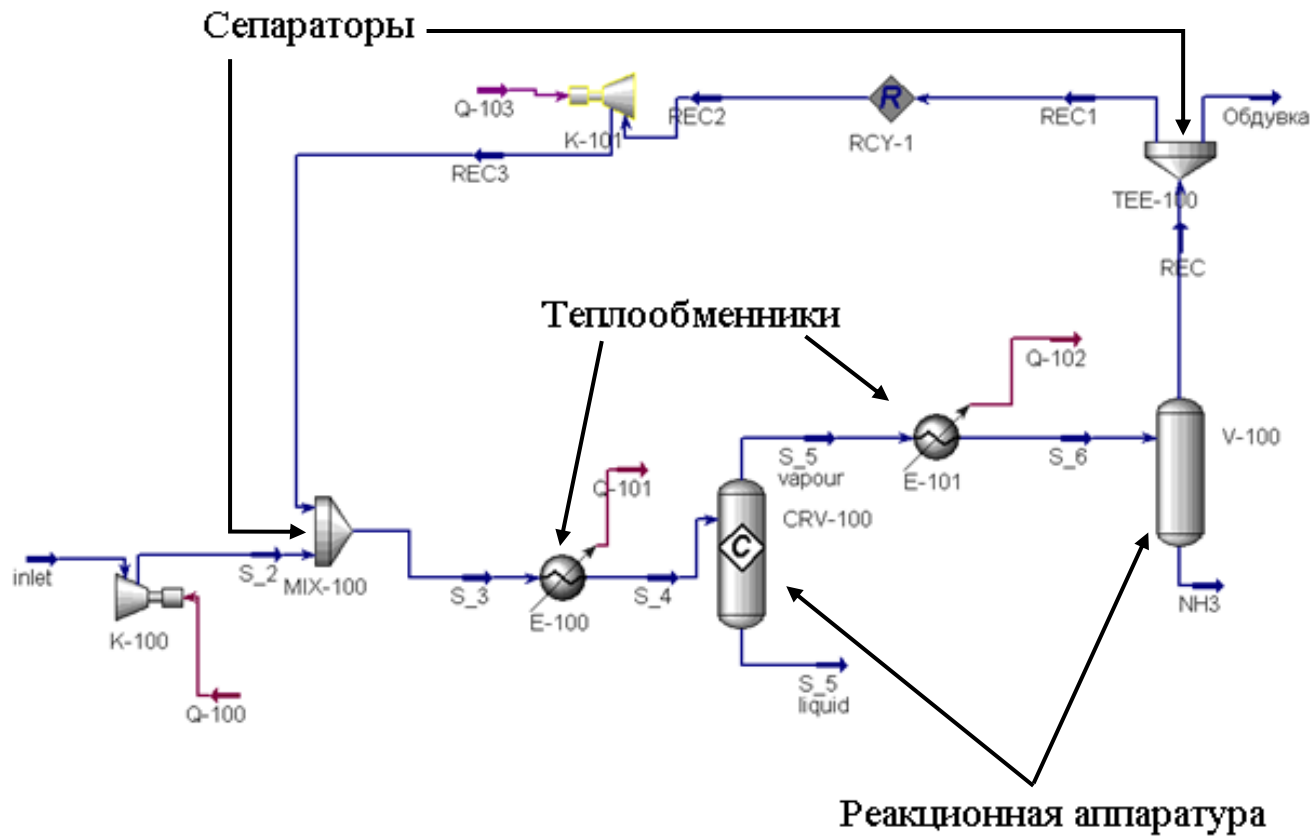


Рис. 1. Схема блока синтеза аммиака

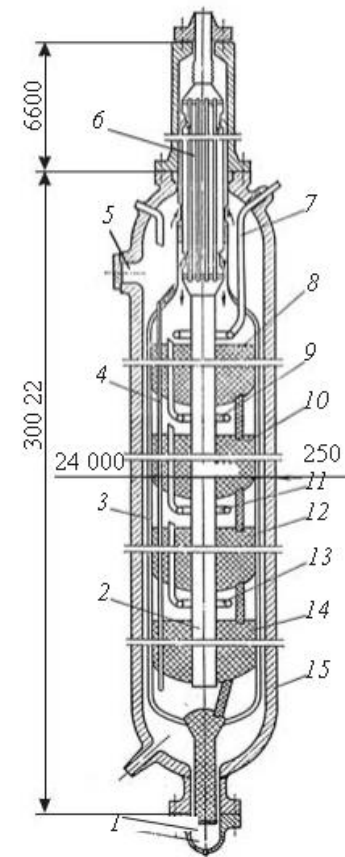


Рис. 2. Пример колонны синтеза аммиака

Спроектированная модель.

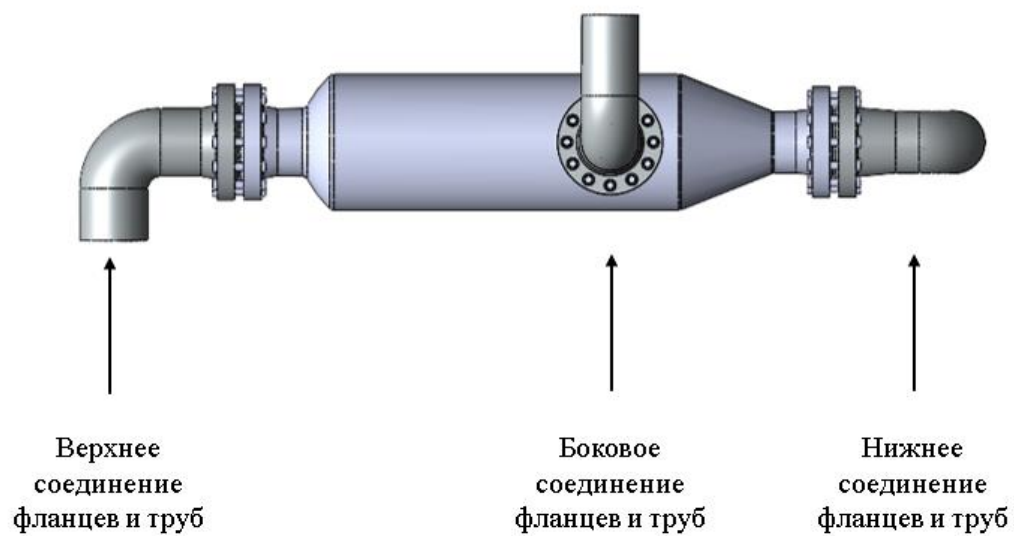


Рис. 3. Упрощенная модель реакционной колонны

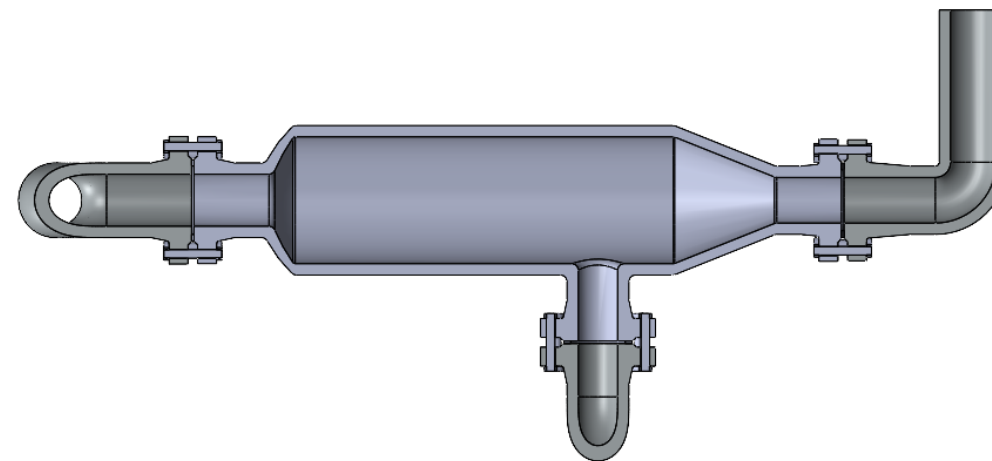


Рис. 4. Упрощенная модель реакционной колонны в разрезе

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.

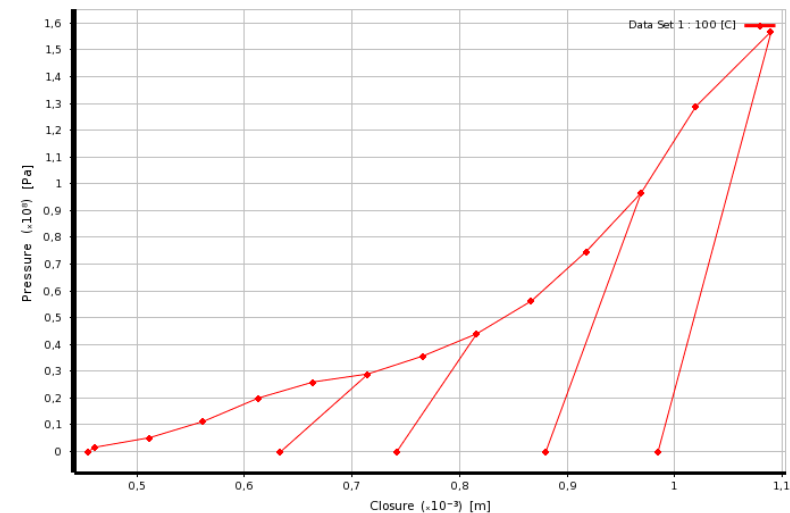


Рис. 5. Модель сжатия с разгрузкой

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

Сетка.

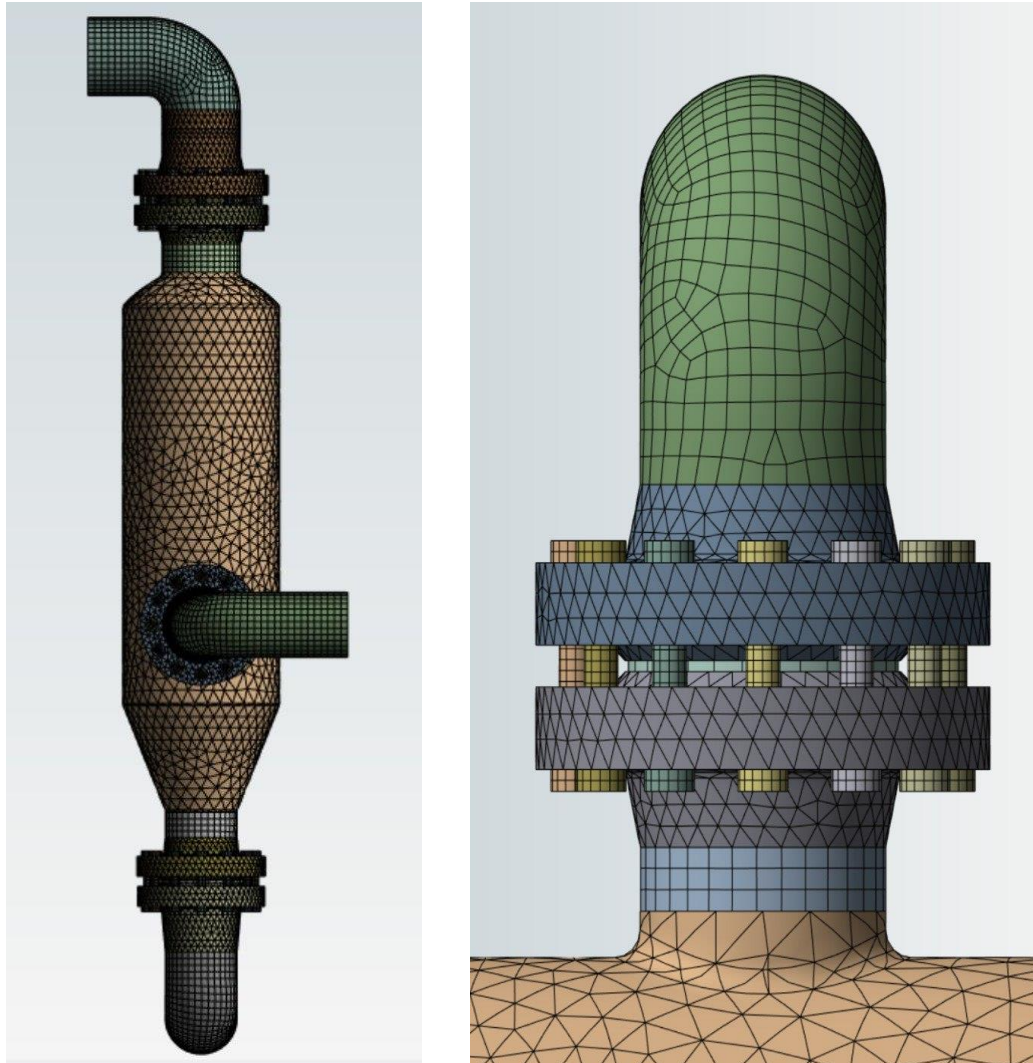


Рис. 6. Построенная сетка

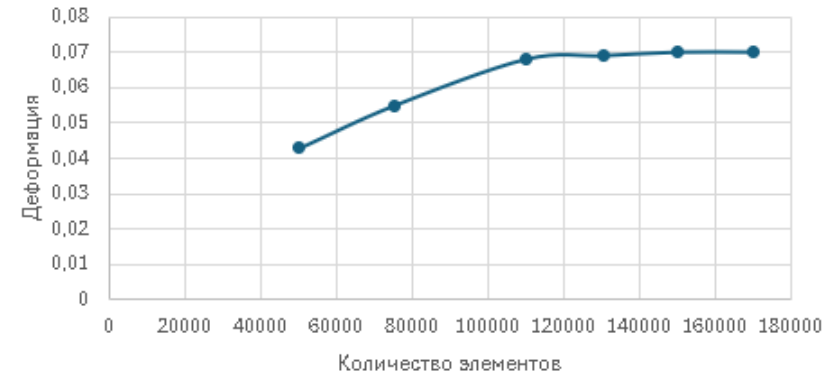


Рис. 7. Сеточная сходимость

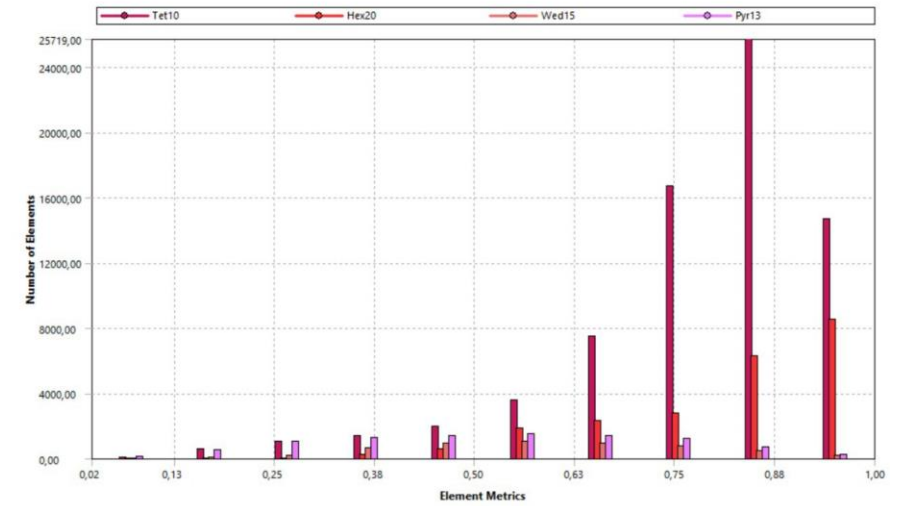


Рис. 8. Метрика элементов

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, ν – кинематический коэффициент вязкости, Nu – число Нуссельта, $Pr_{ж}$ – число Прандтля для жидкости/газа, α – коэффициент теплоотдачи, λ – 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:

$$\alpha_T = 33,2 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\cdot\text{С}} - \text{для верхней трубы}$$

$$\alpha_M = 35,1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\cdot\text{С}} - \text{для средней трубы}$$

$$\alpha_B = 34,1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\cdot\text{С}} - \text{для нижней трубы}$$

$$\alpha_V = 27,7 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\cdot\text{С}} - \text{для сосуда}$$

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

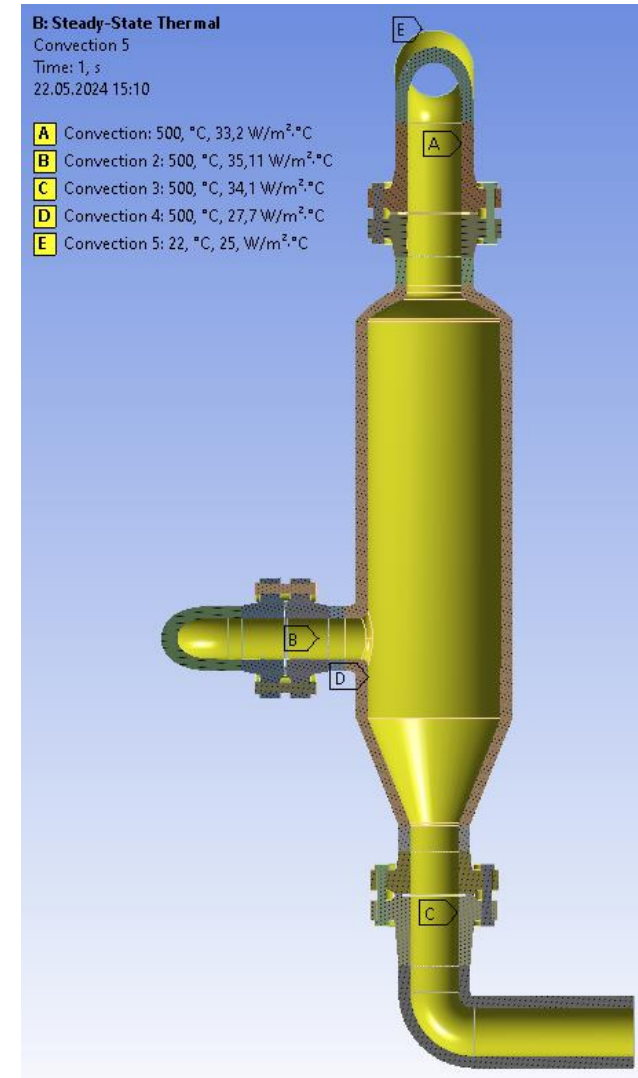


Рис. 9. Заданная конвекция

Распределения температур.

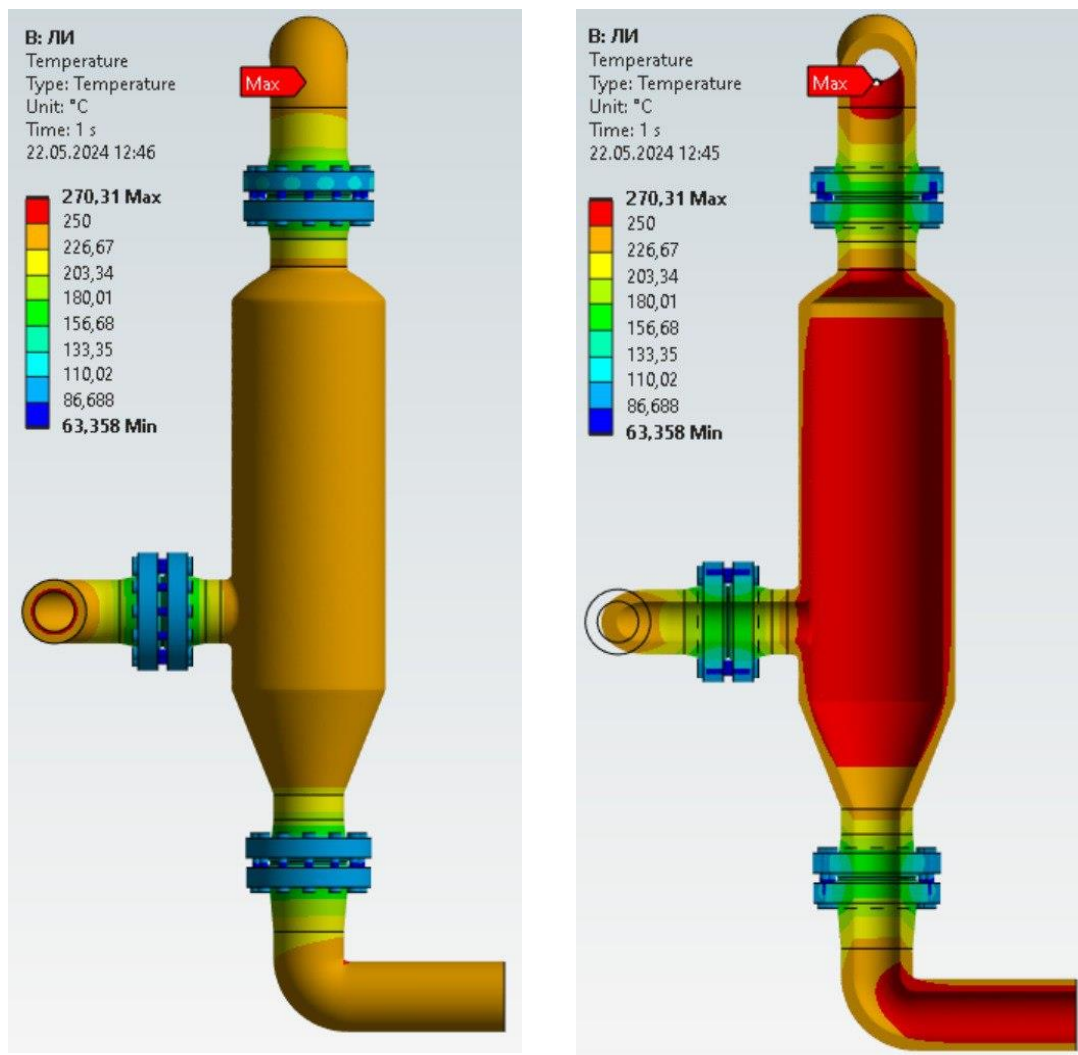


Рис. 10. Результаты температурных расчетов для линейной постановки

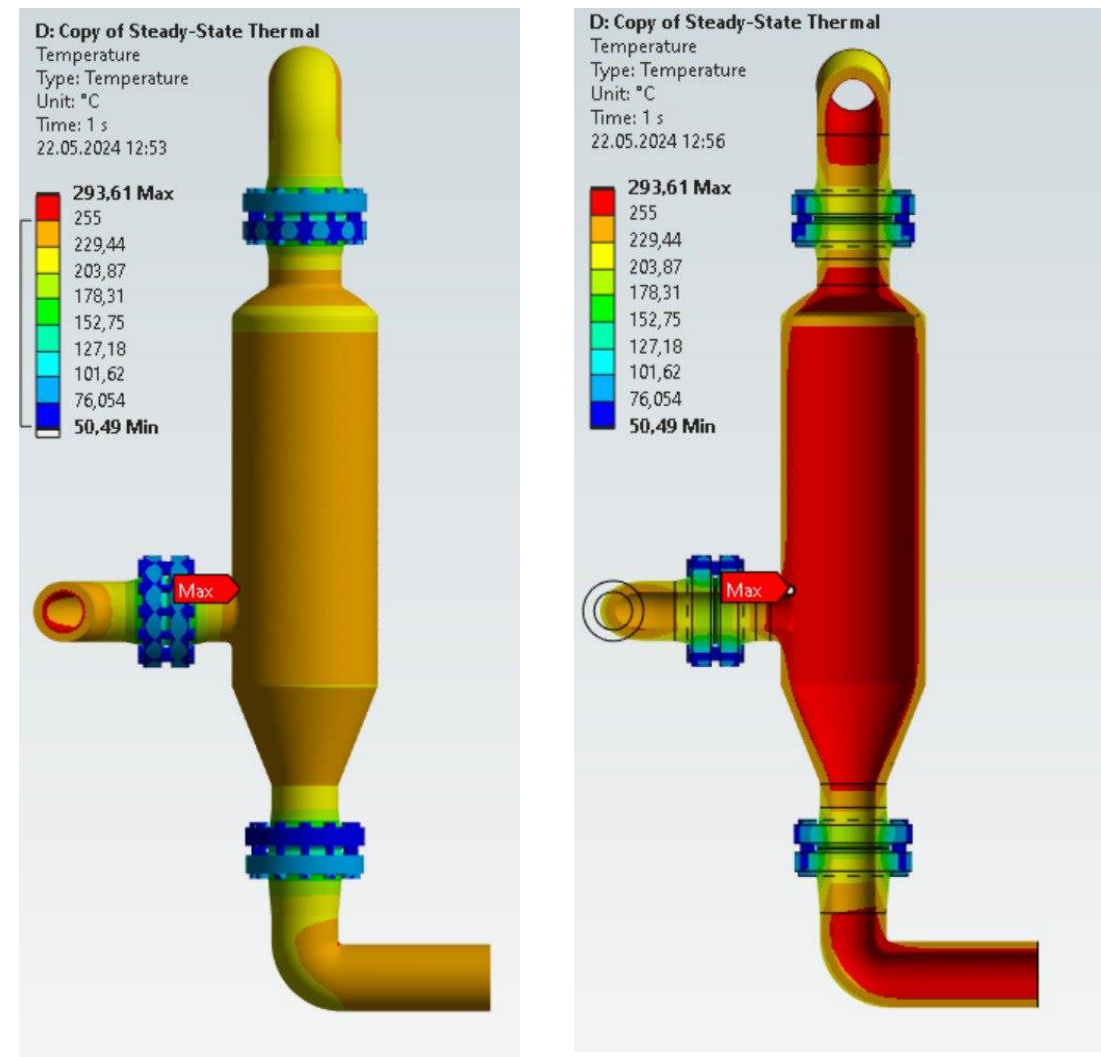


Рис. 11. Результаты температурных расчетов для нелинейной постановки

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

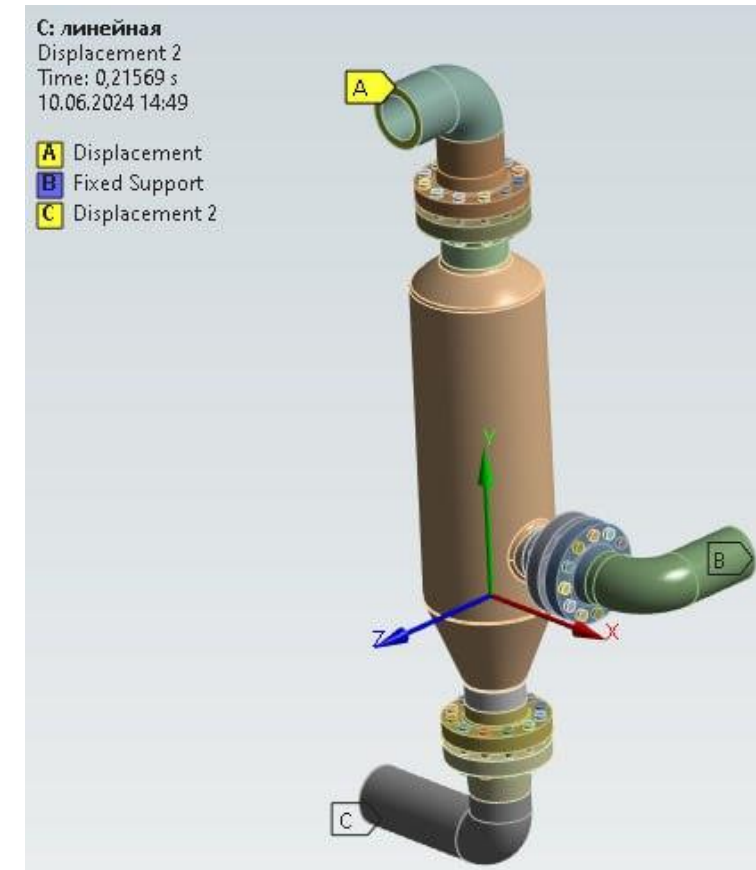


Рис. 12. Заданная затяжка болтов и ограничения на передвижения

Полученные распределения перемещений.

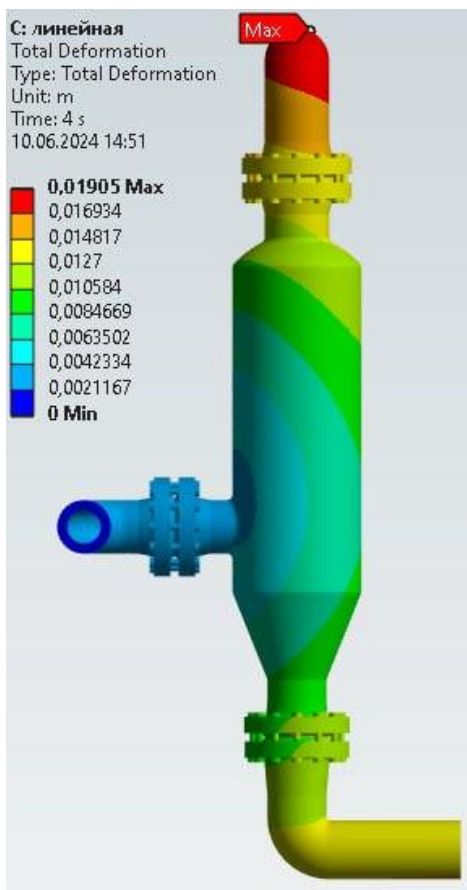


Рис. 13. Перемещения для линейной постановки

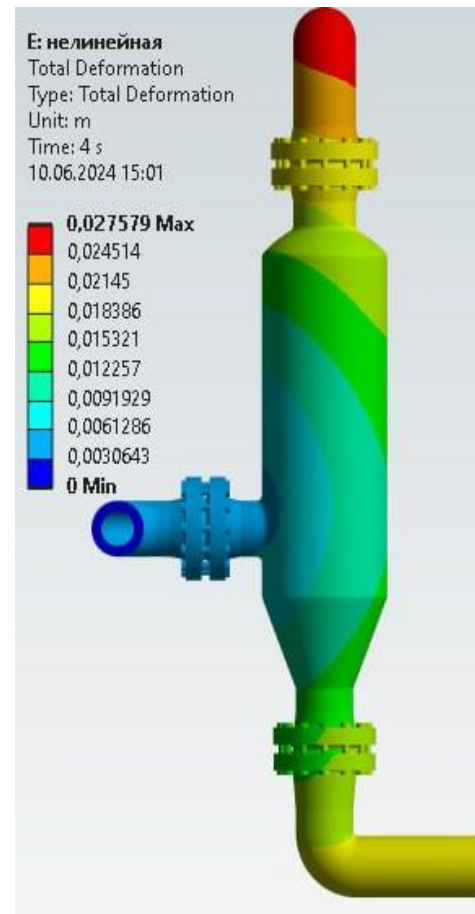
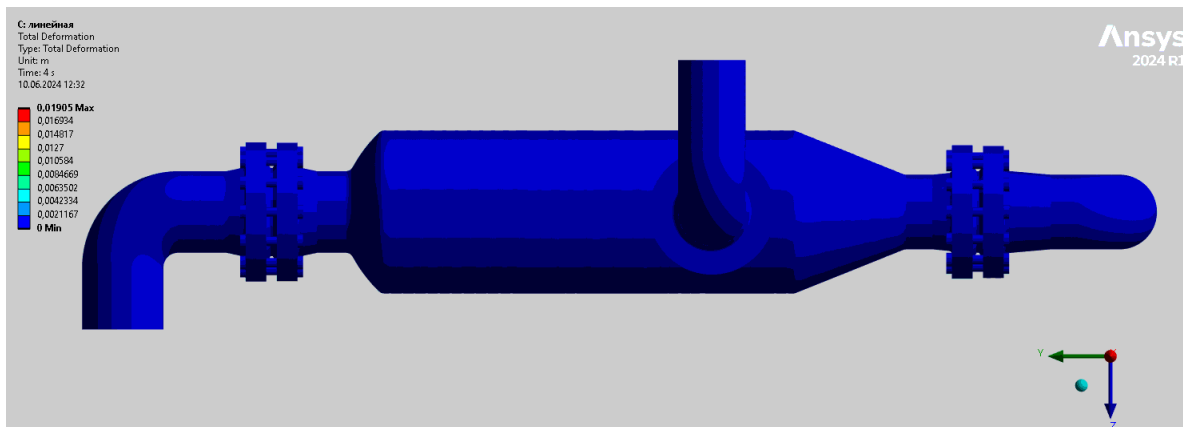
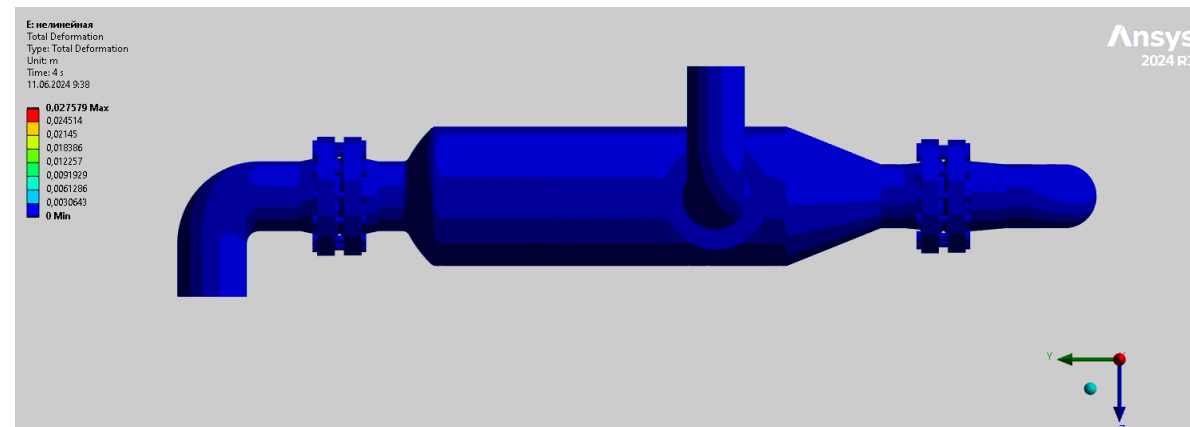


Рис. 14. Перемещения для нелинейной постановки

Полученные распределения перемещений.



Перемещения для линейной постановки



Перемещения для нелинейной постановки

Полученные распределения напряжения для линейной постановки.

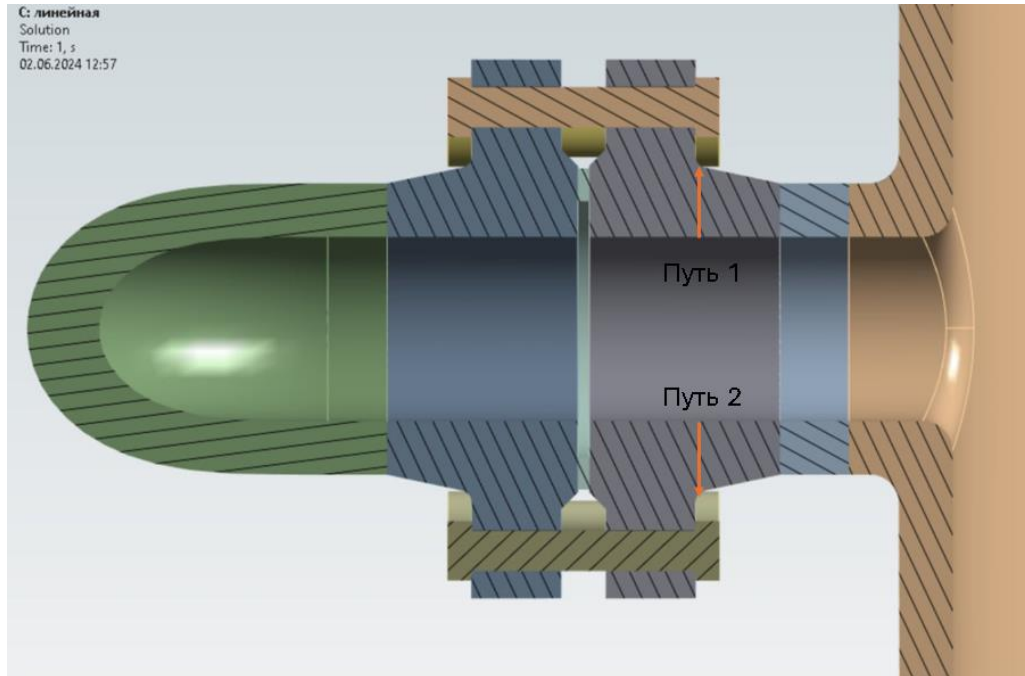


Рис. 15. Пути линейаризации

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

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.

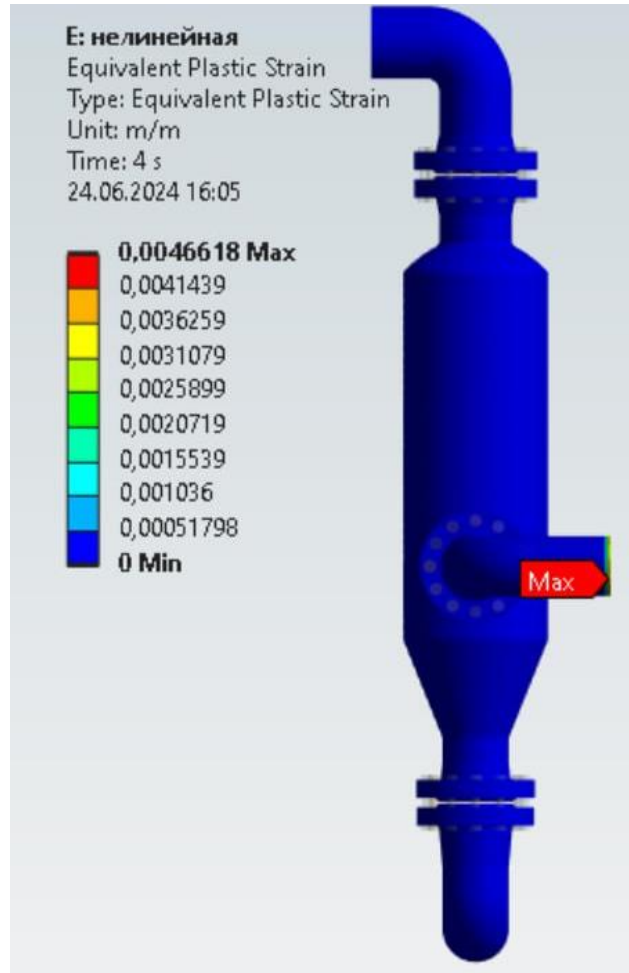


Рис. 16. Пластические деформации

$$\sigma_1 = 103 \text{ МПа}$$

$$\sigma_2 = 132.7 \text{ МПа}$$

$$\sigma_3 = 192 \text{ МПа}$$

$$\sigma_e = 78.5 \text{ МПа}$$

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

$$a_{sl} = 2.2$$

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

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

$$0 \leq 0.055$$

Полученные распределения пластических деформаций для нелинейной постановки.

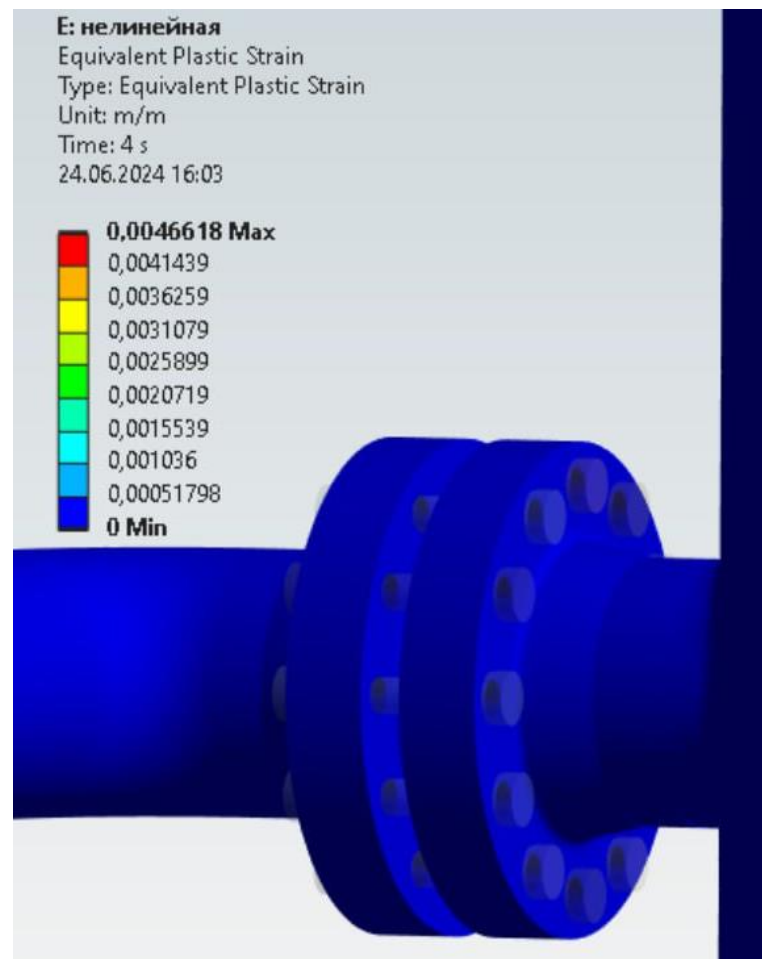


Рис. 17. Пластические деформации на среднем фланце

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!