

**ДИССЕРТАЦИЯ
НА СОИСКАНИЕ
АКАДЕМИЧЕСКОЙ СТЕПЕНИ
МАГИСТРА**

Направление 151600 «Прикладная механика»

Магистерская программа 151600.68.01 «Вычислительная механика и компьютерный инжиниринг»

ТЕМА:

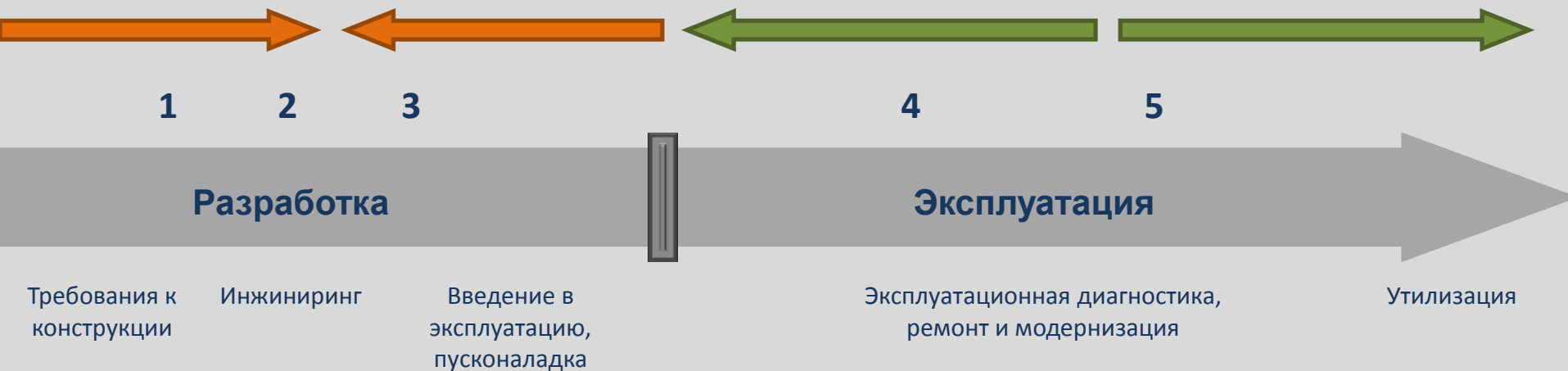
**«ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРЯМОГО КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ПРИ РАЗРАБОТКЕ СОВРЕМЕННЫХ НОРМАТИВНЫХ ПОДХОДОВ
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ
ТЕПЛОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ»**

**ВЫПОЛНИЛ СТУДЕНТ ГР. 63602/1
ЖУРАВЛЕВ Д.Н.**

**РУКОВОДИТЕЛЬ, К.Т.Н.,
ГАЕВ А.В.**

Структура системы нормативно-технической документации

1. Требования к конструкции
2. Методика расчетов на прочность
3. Материалы и технологии изготовления
4. Методы и средства оценки технического состояния
5. Методы восстановления и ремонта



Наличие современной согласованной системы НТД – обеспечение надежности и безопасной эксплуатации на протяжении жизненного цикла

Методы расчетов на прочность сосудов давления

Система EN

EN 13445

Система РосТехНадзора

РД 10-249-98



Design by formulae

(Нормативный расчет, расчет по выбору основных размеров)



Design by analysis

(Расчет численными методами)



- **Design by stress categories**

(Расчет с использованием категорий напряжений, поверочный расчет)



- **Direct route**

(Прямое моделирование)



Отсутствие гармонизированных стандартов расчета на прочность котлов и трубопроводов

Мотивация

Задачи, решаемые при проектировании нового оборудования:

- Расчет статической прочности и устойчивости
- Расчет циклической прочности
- Расчет собственных частот
- Расчет сейсмического воздействия
- Задачи теплопроводности, термоупругости
- ...

Расчет по
приближенным
формулам



Введение
коэффициентов запаса



Излишне
материалоемкая
конструкция

Прямое конечно-
элементное
моделирование



Менее консервативные
оценки запаса
прочности



Конкурентоспособное
оборудование

Объект исследования

Элементы котлов, сосудов, трубопроводов (барабаны, тройники, гиббы, ...)

Требования к материалам:

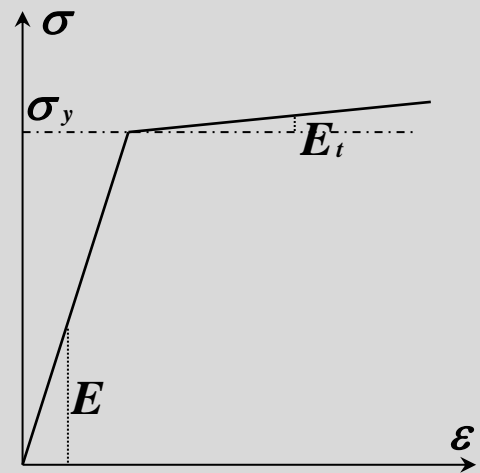
- **пластичность (относительное удлинение при одноосном растяжении ~ 20%)**
- **высокие механические характеристики**
- **коррозионная стойкость**

Применяемые классы сталей:

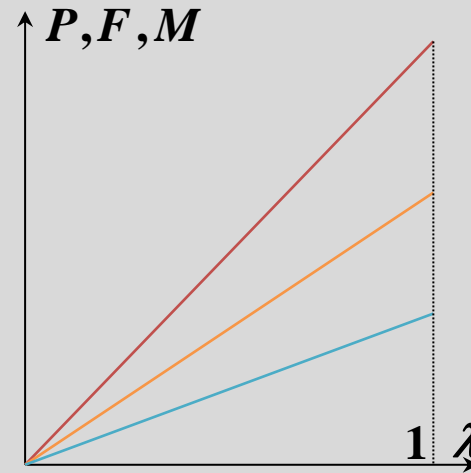
- **углеродистые низколегированные (Ст20, 22К, 16ГС, 09Г2С, ...)**
- **хромомолибденованадиевые (15ХМ, 12Х1МФ, 15Х1М1Ф, ...)**
- **нержавеющие аустенитные (08Х18Н10Т, 10Х18Н12Т, ...)**

Перечень основных материалов, ГОСТов и ТУ, которым они должны соответствовать указан в «Правилах устройства и безопасной эксплуатации котлов, сосудов и трубопроводов»

Численная реализация метода предельного анализа



Билинейная
модель
материала с
кинематическим
упрочнением

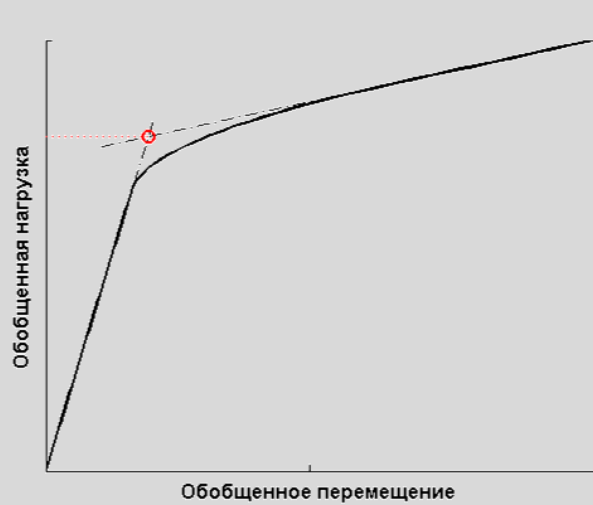


Пропорциональное
напряжение

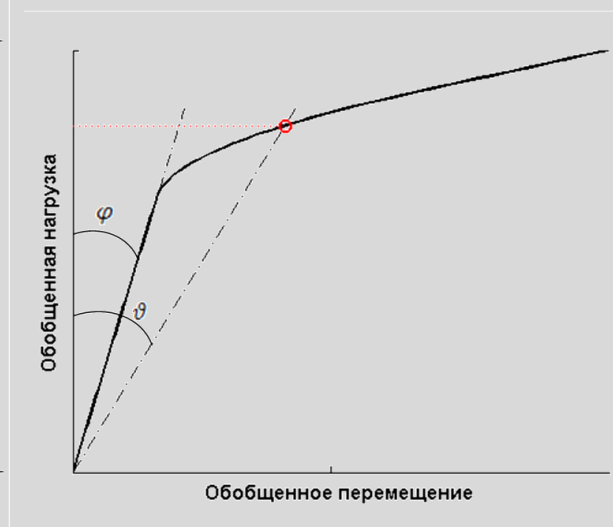


ПРЕДЕЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ ЭЛЕМЕНТА КОНСТРУКЦИИ

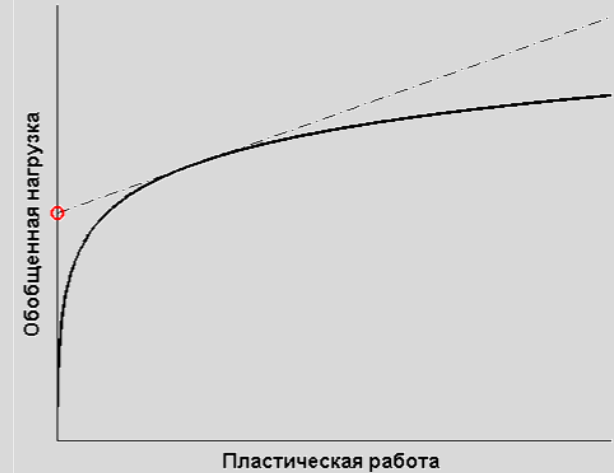
Численные критерии определения предельного состояния



Метод 2-х касательных (Tangent-intersection method, TI)



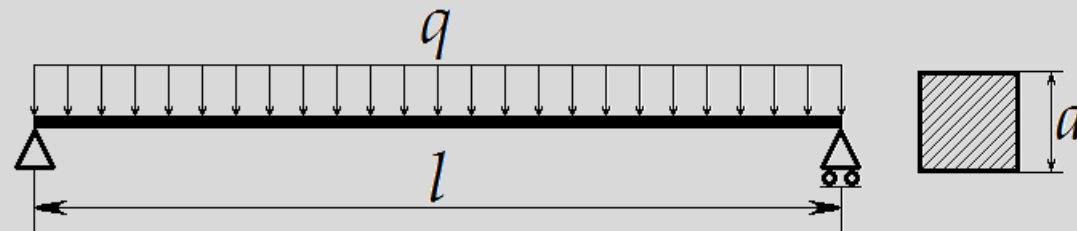
Критерий двойного угла (Twice-elastic-slope method, TES)



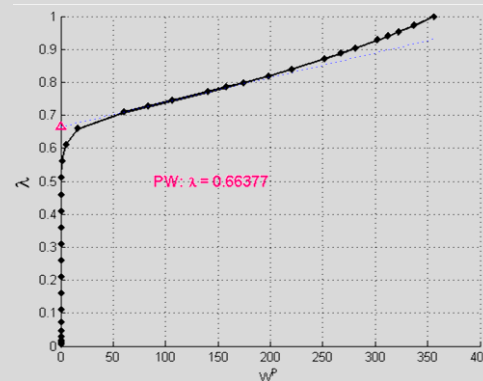
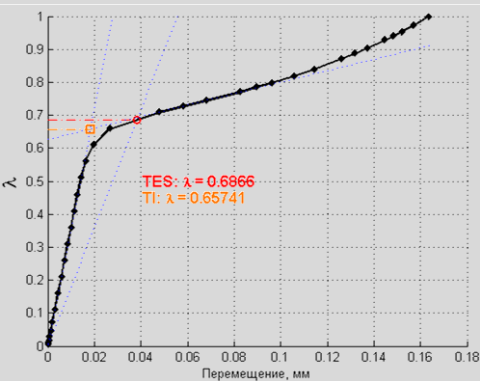
Критерий пластической работы (Plastic-work criterion, PW)

Сравнение численных критериев на примере тестовых задач

Шарнирно-опертая балка под действием распределенной нагрузки



$$\begin{aligned}
 l &= 1\text{ м} \\
 a &= 0.02\text{ м} \\
 \sigma_y &= 250\text{ МПа}
 \end{aligned}
 \Rightarrow
 \begin{aligned}
 q^* &= 4 \frac{\text{кН}}{\text{м}} \\
 (p^* &= 0.2\text{ МПа})
 \end{aligned}$$



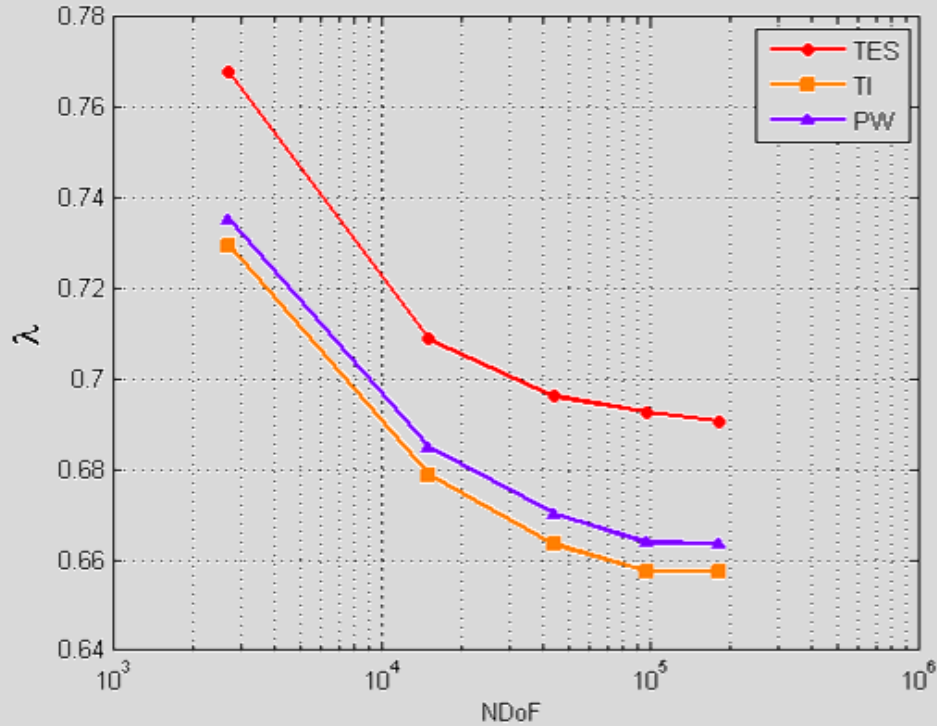
| Критерий | Численное значение, МПа | Аналитическое значение, МПа | Относительная погрешность, % |
|------------|-------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| TES | 0.206 | 0.2 | 2.99 |
| TI | 0.197 | | 1.39 |
| PW | 0.199 | | 0.44 |

Вычисление коэффициента предельной нагрузки методами TES и TI

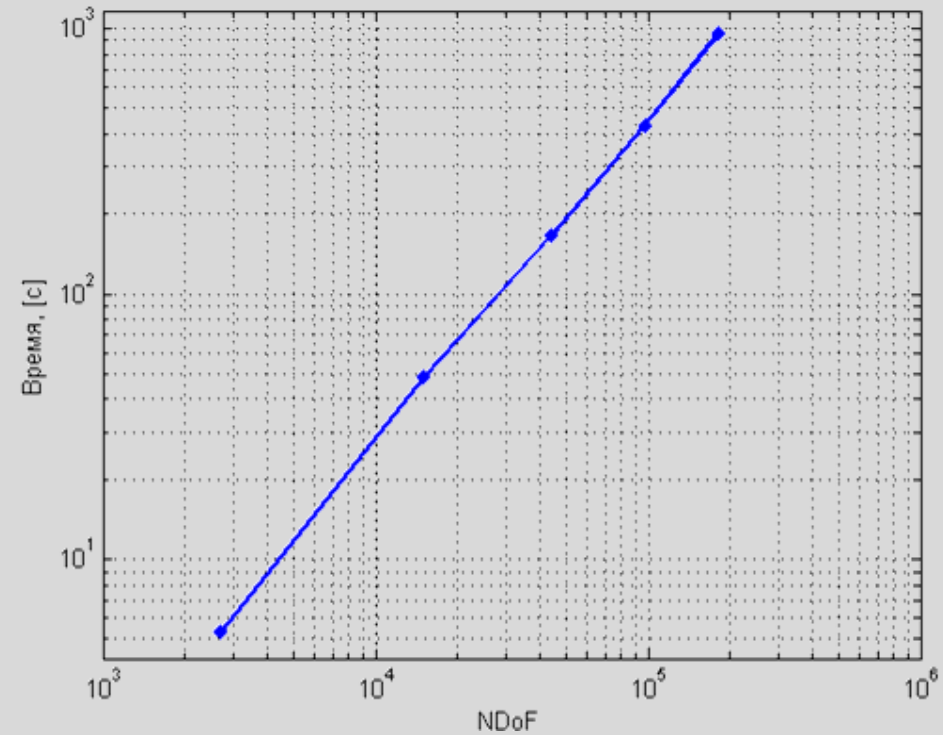
Вычисление коэффициента предельной нагрузки методом PW

Сравнение численных критериев на примере тестовых задач

Шарнирно-опертая балка под действием распределенной нагрузки



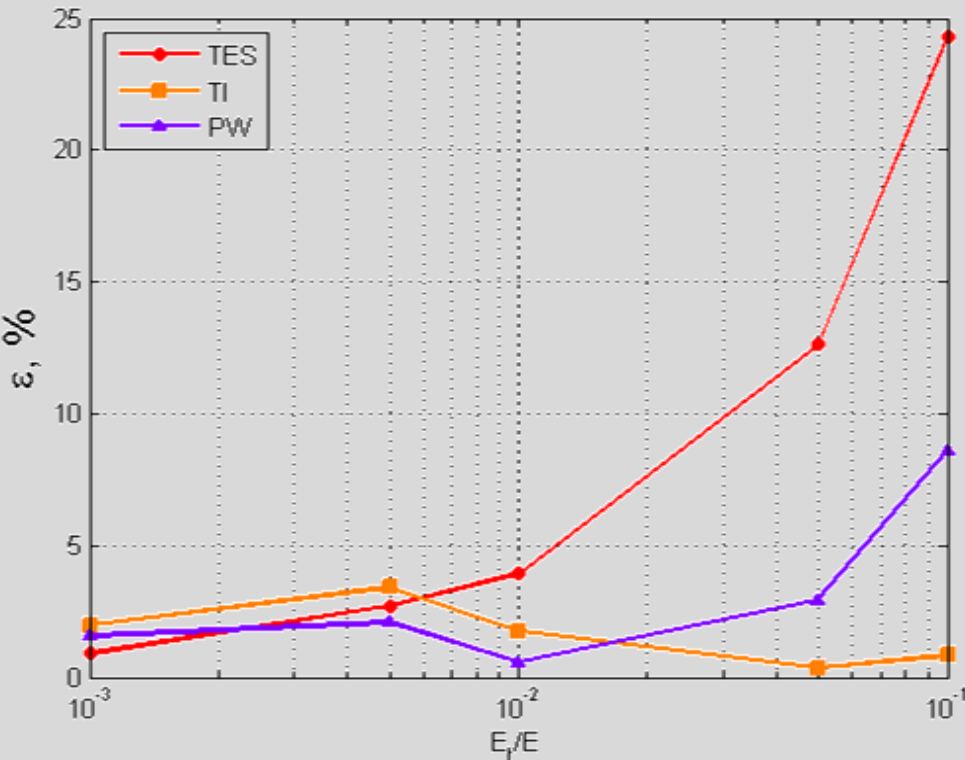
Сходимость КЭ решения по числу степеней свободы



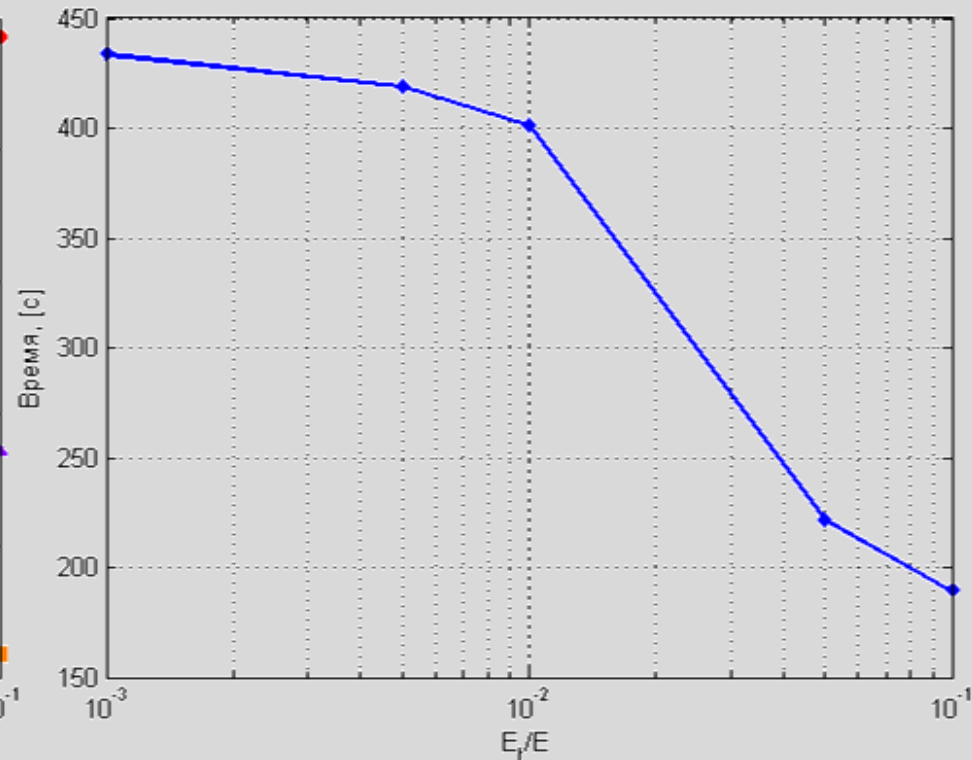
Зависимость вычислительного времени от числа степеней свободы

Сравнение численных критериев на примере тестовых задач

Шарнирно-опертая балка под действием распределенной нагрузки



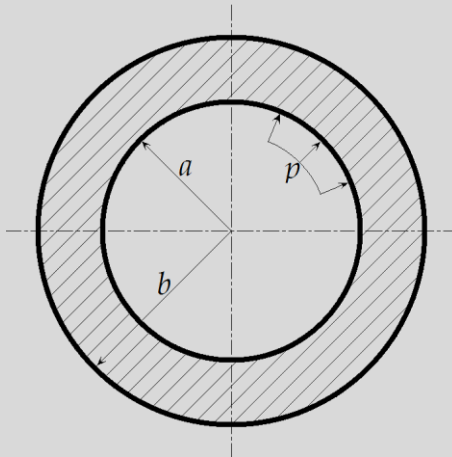
Зависимость коэффициента предельной нагрузки от величины модуля упрочнения материала



Зависимость вычислительного времени от величины модуля упрочнения материала

Сравнение численных критериев на примере тестовых задач

Длинная толстостенная труба под действием внутреннего давления

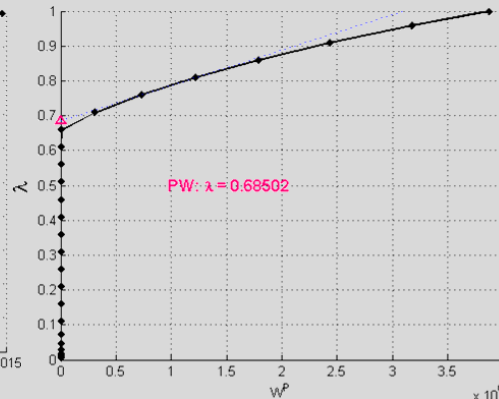
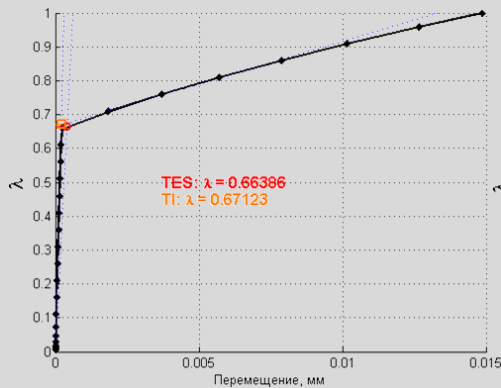


Типоразмер
465 × 56 мм
 ↓
a = 176.5 мм
b = 232.5 мм

$$\sigma_y = 250 \text{ МПа}$$

$$p^* = 2\tau_y \ln \frac{b}{a}$$

$$p^* \approx 79.55 \text{ МПа}$$



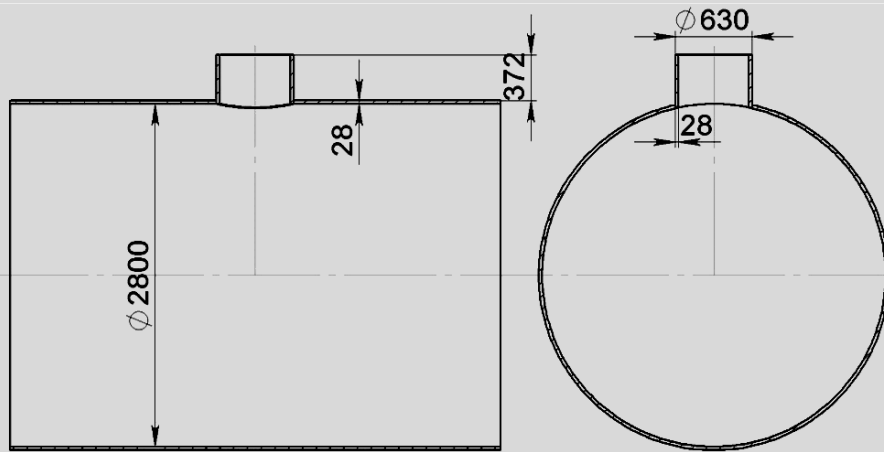
| Критерий | Численное значение, МПа | Аналитическое значение, МПа | Относительная погрешность, % |
|------------|-------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| TES | 79.66 | 79.55 | 0.14 |
| TI | 80.55 | | 1.25 |
| PW | 82.20 | | 3.33 |

Вычисление коэффициента предельной нагрузки методами TES и TI

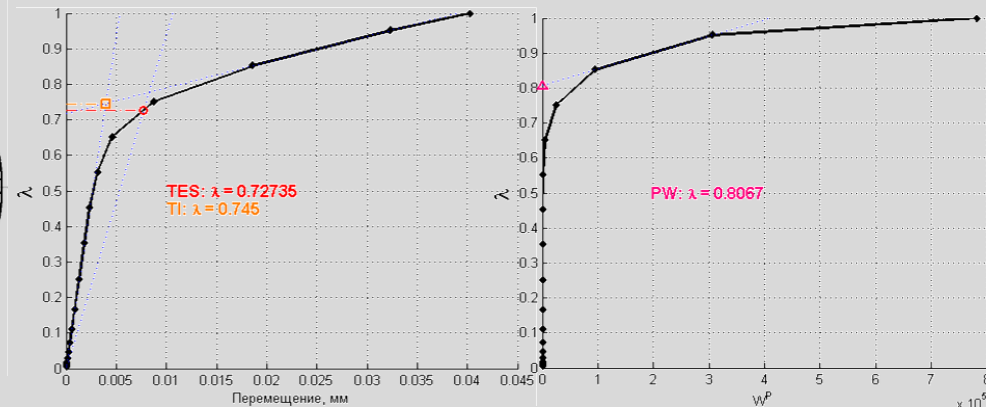
Вычисление коэффициента предельной нагрузки методом PW

Определение предельных нагрузок для элементов ТМО

Радиальный патрубок на цилиндрической обечайке

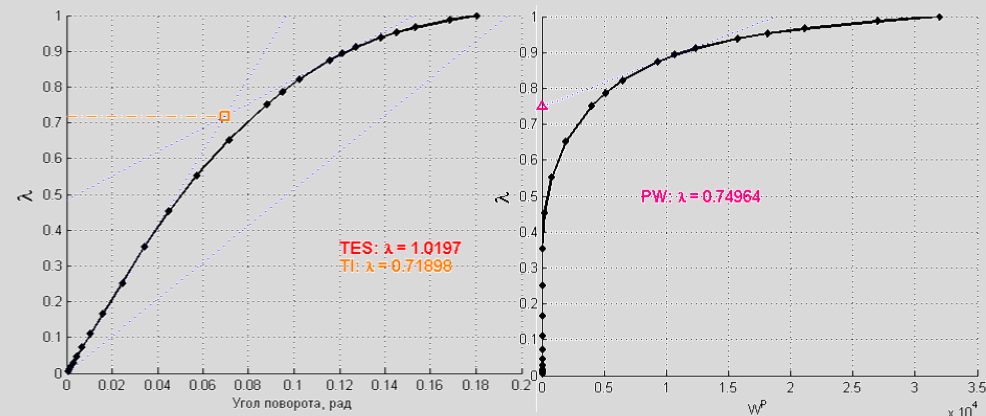


Определение величины предельного давления



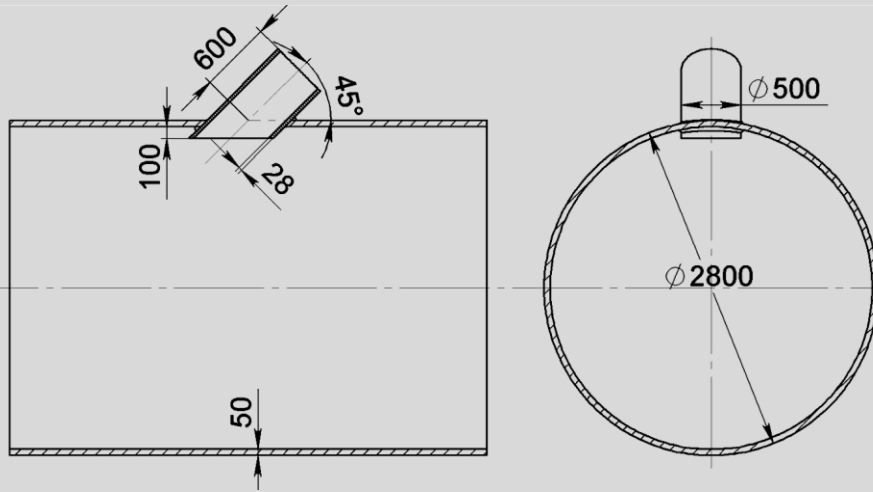
| | [P], МПа | [M _x], кН·м |
|---------------------|----------|-------------------------|
| РД 10-249-98 | 2.671 | - |
| ГОСТ Р 52857.3-2007 | 2.764 | 105.989 |
| EN 13445-3:2009 | 2.396 | 105.989 |
| TI | 2.980 | 263.627 |
| TES | 2.909 | 373.897 |
| PW | 3.227 | 274.868 |

Определение величины предельного момента

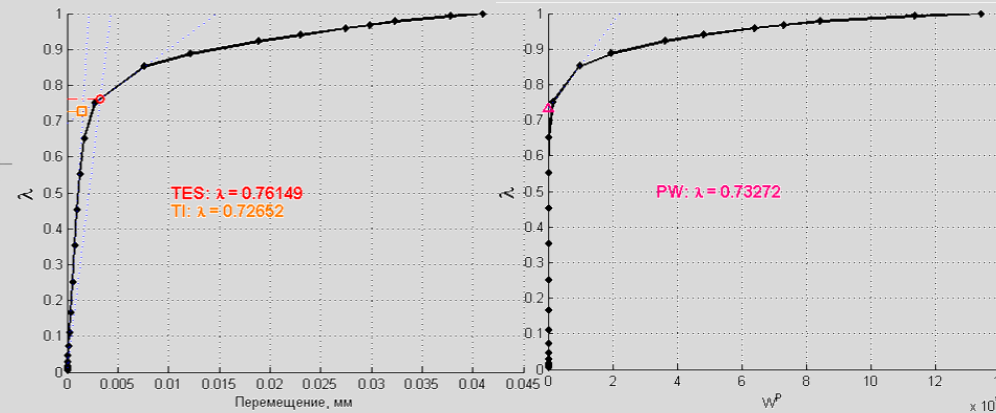


Определение предельных нагрузок для элементов ТМО

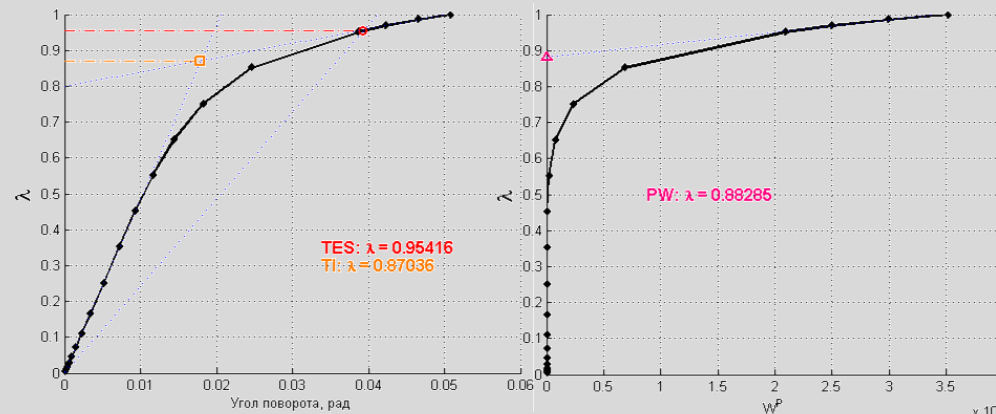
Косой патрубок на цилиндрической обечайке



Определение величины предельного давления



Определение величины предельного момента



| | [P], МПа | [M _x], кН·м | [M _y], кН·м |
|---------------------|----------|-------------------------|-------------------------|
| РД 10-249-98 | 4.30 | - | - |
| ГОСТ Р 52857.3-2007 | 3.96 | 249.59 | 376.46 |
| EN 13445-3:2009 | 4.26 | 249.59 | 376.46 |
| TI | 4.84 | 870.36 | 940.41 |
| TES | 5.08 | 613.63 | 970.75 |
| PW | 4.88 | 882.85 | 951.15 |

Совместное действие нагрузок на элементы ТМО

EN 13445-3:2009

$$\max\{|\Phi_p + \Phi_z|; |\Phi_z|; |\Phi_p - 0.2\Phi_z|\} + |\Phi_z| \leq 1.0$$

$$|\Phi_p| = \frac{P}{P_{\max}} \leq 1.0 \quad |\Phi_z| = \frac{F_z}{F_{z,\max}} \leq 1.0$$

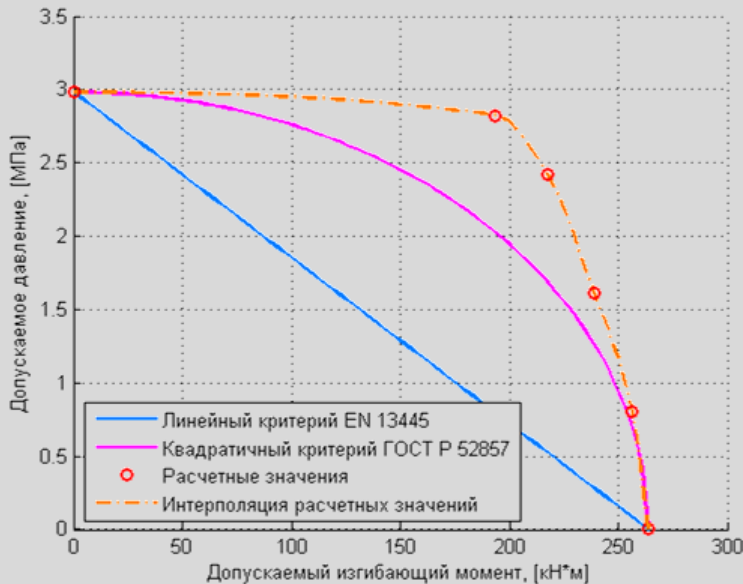
$$|\Phi_b| = \frac{M_b}{M_{b,\max}} \leq 1.0$$

ГОСТ Р 52857.3-2007

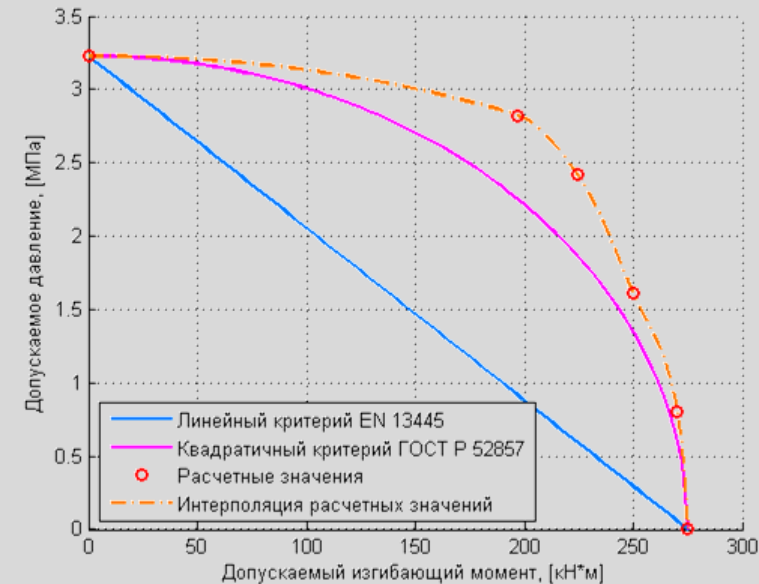
$$\sqrt{\left[\max\left\{ \frac{\Phi_p + \Phi_z}{C_4}; |\Phi_z|; \frac{\Phi_p - 0.2\Phi_z}{C_4} \right\} \right]^2} + \Phi_b^2 \leq 1.0$$

$$\Phi_p = \frac{P}{[P]} \leq 1.0 \quad \Phi_z = \frac{F_z}{[F_z]} \leq 1.0$$

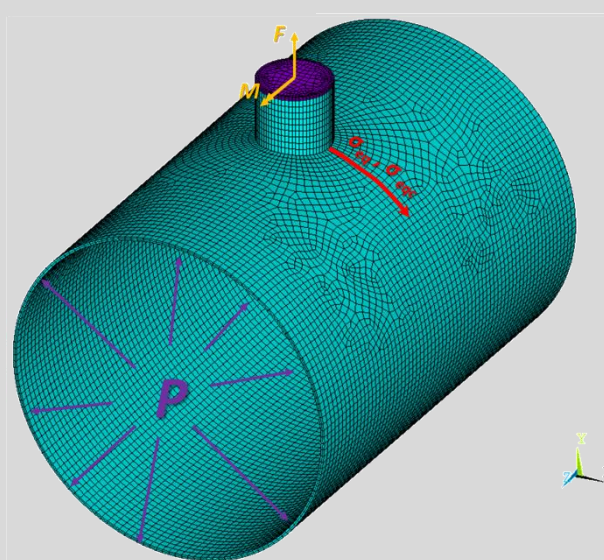
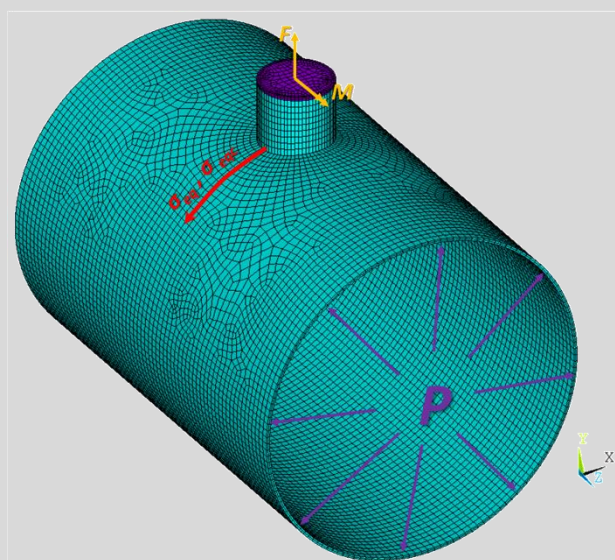
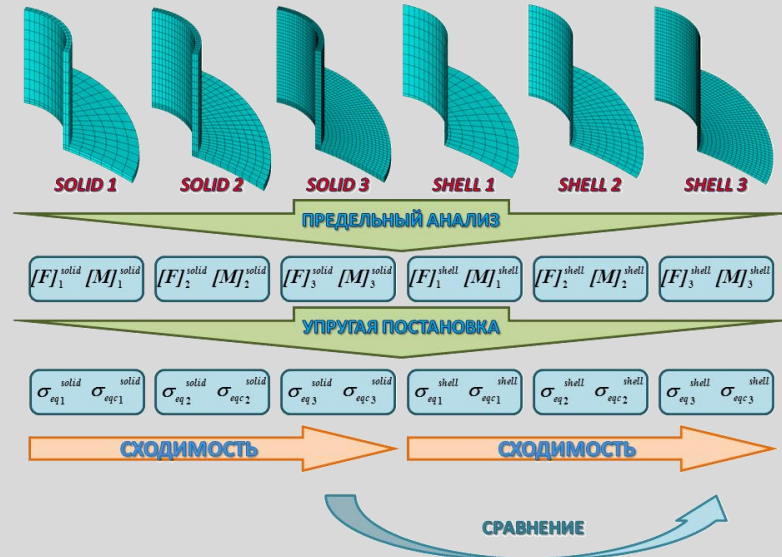
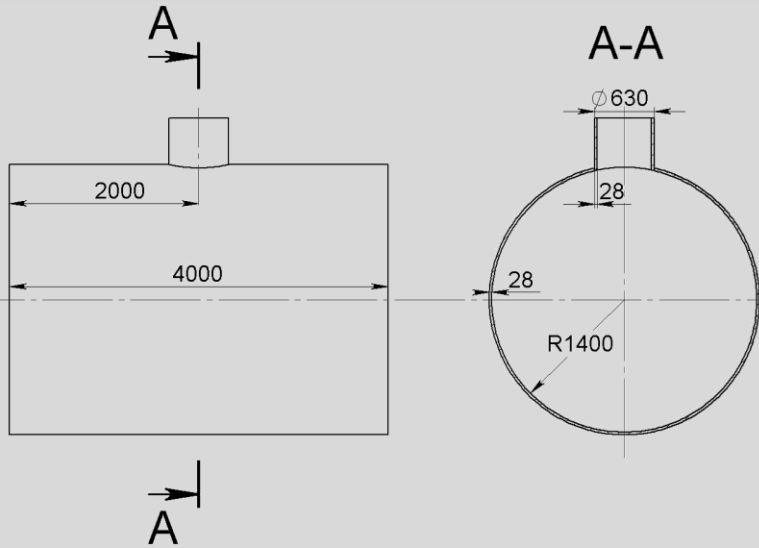
$$\Phi_b = \sqrt{\left(\frac{M_x}{[M_x]} \right)^2 + \left(\frac{M_y}{[M_y]} \right)^2} \leq 1.0$$



**Определение
допускаемых
нагрузок по
критериям
TI и PW**

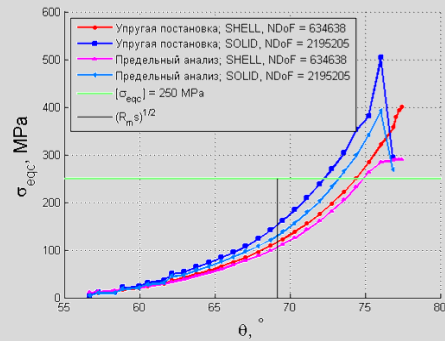
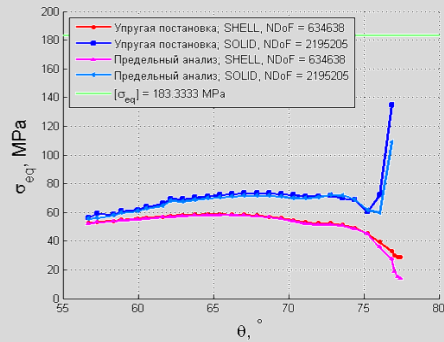


Сравнение с расчетом по категориям напряжений

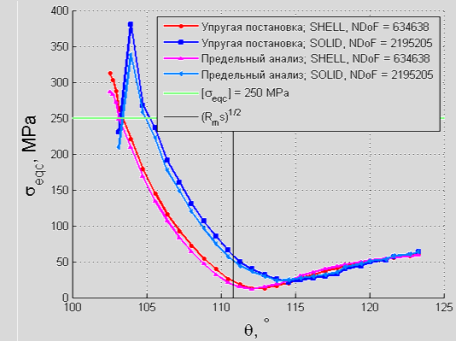
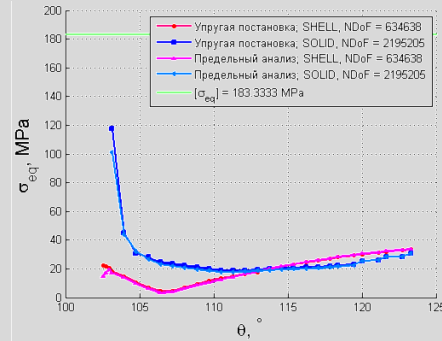


Основные размеры,
 план сравнения,
 пути осреднения
 напряжений по категориям

Сравнение с расчетом по категориям напряжений



Распределение напряжений по 1й и 2й категориям вдоль первого пути



Распределение напряжений по 1й и 2й категориям вдоль второго пути

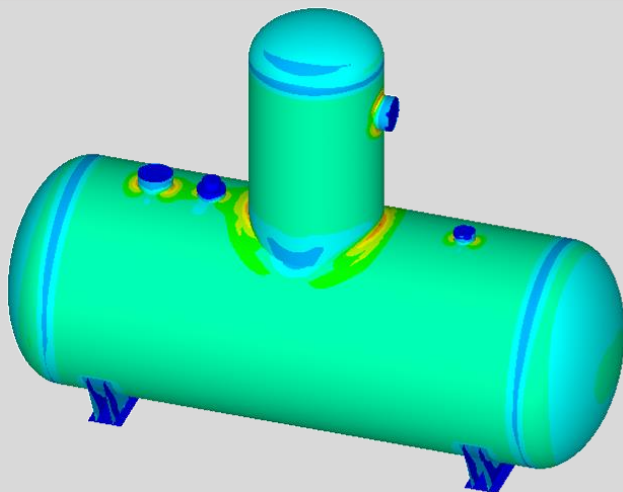
Осреднение напряжений по первому пути

| | $(\sigma_2)_{\min}, \text{МПа}$ | $(\sigma_2)_{\max}, \text{МПа}$ | $\langle \sigma_2 \rangle, \text{МПа}$ | $\bar{\sigma}_2, \text{МПа}$ | $[\sigma_2], \text{МПа}$ |
|--------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------------|------------------------------|--------------------------|
| SOLID | 166.2 | 505.3 | 290.1 | 296.9 | 250.0 |
| SHELL | 123.0 | 400.0 | 261.7 | 233.2 | |

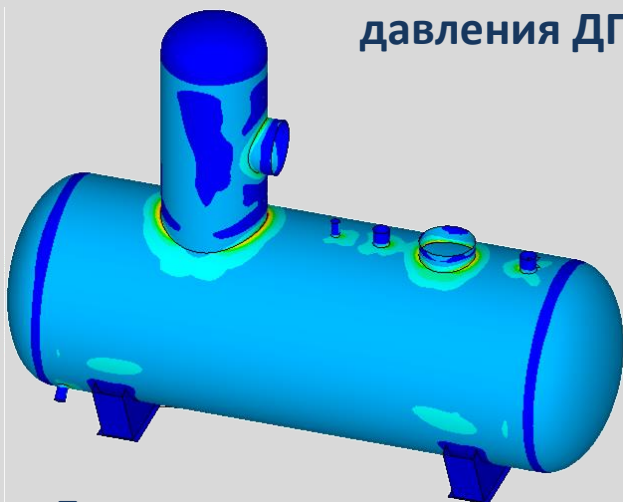
Осреднение напряжений по второму пути

| | $(\sigma_2)_{\min}, \text{МПа}$ | $(\sigma_2)_{\max}, \text{МПа}$ | $\langle \sigma_2 \rangle, \text{МПа}$ | $\bar{\sigma}_2, \text{МПа}$ | $[\sigma_2], \text{МПа}$ |
|--------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------------|------------------------------|--------------------------|
| SOLID | 65.67 | 380.6 | 185.4 | 189.5 | 250.0 |
| SHELL | 26.10 | 262.0 | 120.8 | 118.2 | |

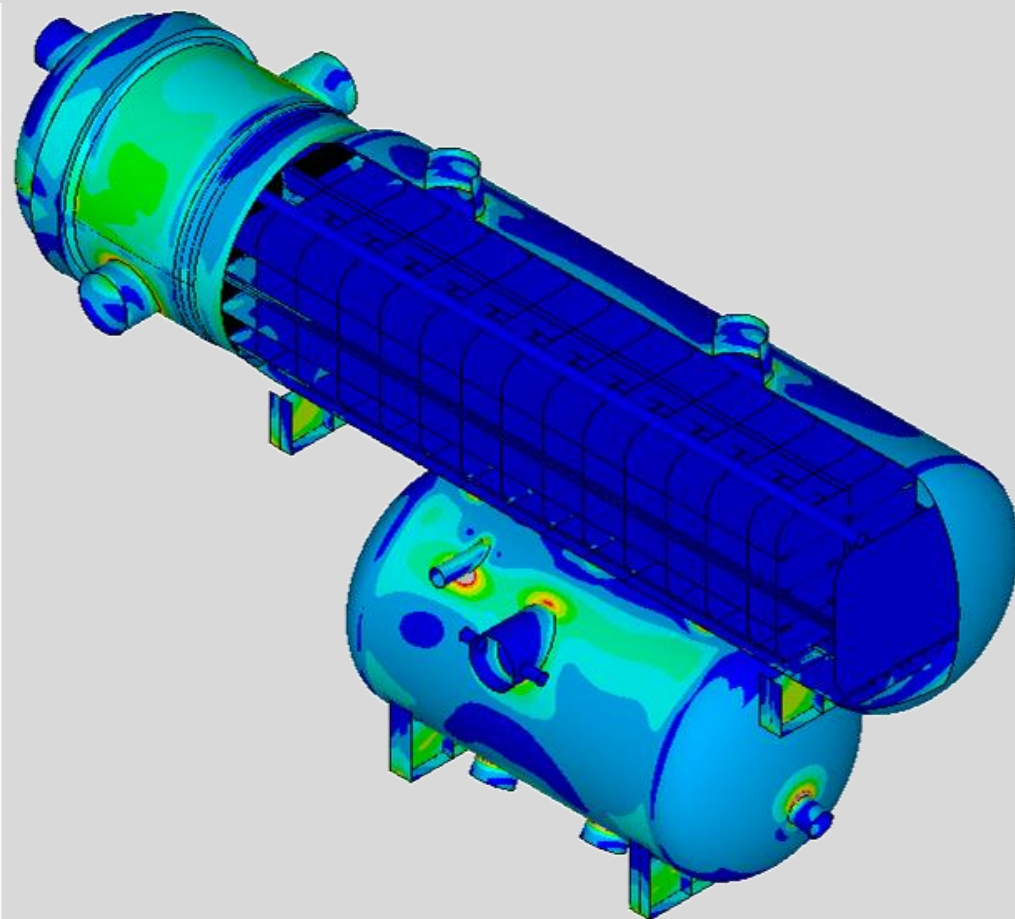
Примеры использования методики



Деаэратор повышенного давления ДП-500/65



Деаэратор повышенного давления ДП-30/15



Подогреватель низкого давления ПНД-4
турбоустановки К-1200-16/50

Выводы

- В работе проведен сравнительный анализ некоторых существующих критериев определения предельного состояния
- На примере тестовых задач показана малая погрешность (<3.5%) относительно аналитических решений
- Показана меньшая консервативность значений допускаемых нагрузок по сравнению с величинами, полученными согласно нормативным методам
- Показаны преимущества метода определения допускаемых нагрузок на основе предельного анализа относительно метода категоризации напряжений – нет зависимости от наличия исходных данных и от выбора зон контроля напряжений
- Показана принципиальная возможность получения менее консервативных решений задач статической прочности для элементов тепломеханического оборудования с учетом реальной геометрии