

**Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Физико-механический факультет
Кафедра «Механика и процессы управления»**

**Магистерская работа
по направлению 150300 «Прикладная механика»**

**Конечно-элементное моделирование и
исследование пространственного напряженно-
деформированного состояния блока
диагностики ИТЕР**

**Выполнил студент группы 6055/11
Руководитель, к. т. н., профессор
Соруководитель, ассистент**

**Буслаков И. В.
Боровков А. И.
Модестов В. С.**

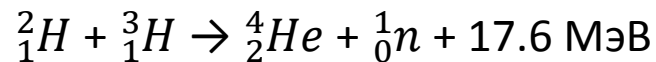
**Санкт-Петербург
2012 год**

СОДЕРЖАНИЕ

- ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ТЕРМОЯДЕРНОМ РЕАКТОРЕ ИТЕР;
- МОДЕЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ: ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ, ПОСТАНОВКА, РЕШЕНИЕ;
- БЛОК ДИАГНОСТИКИ ИТЕР: ТЕМПЕРАТУРНЫЙ АНАЛИЗ, АНАЛИЗ ТЕРМОНАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ;
- БЛОК ДИАГНОСТИКИ ИТЕР: ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ;
- ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Управляемый термоядерный синтез

ИТЕР (ITER) – Международный экспериментальный термоядерный реактор



D (${}^2\text{H}$)



T (${}^3\text{H}$)



Реакция дейтерий-тритий

Токамак – ТОроидальная КАмера с МАгнитными Катушками. Предназначен для магнитного удержания плазмы

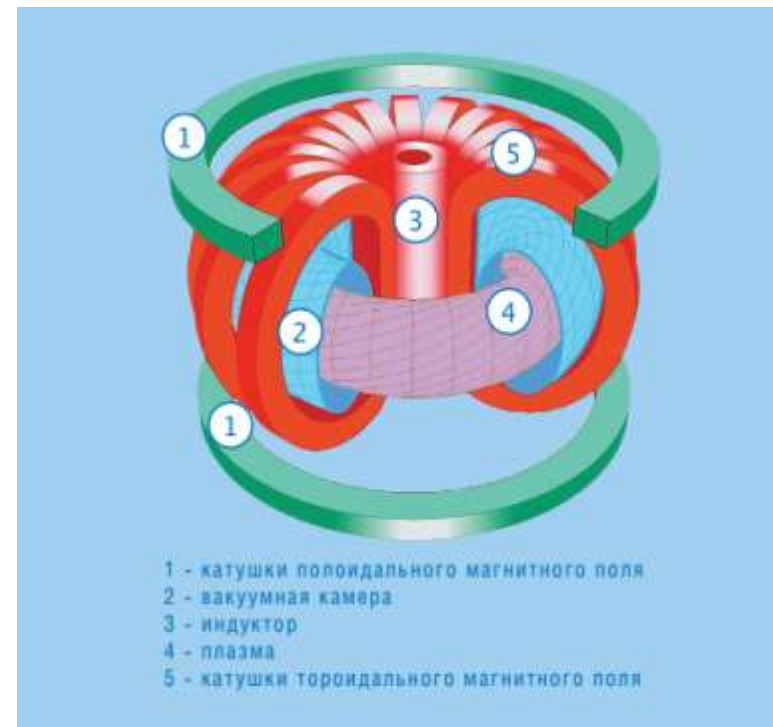
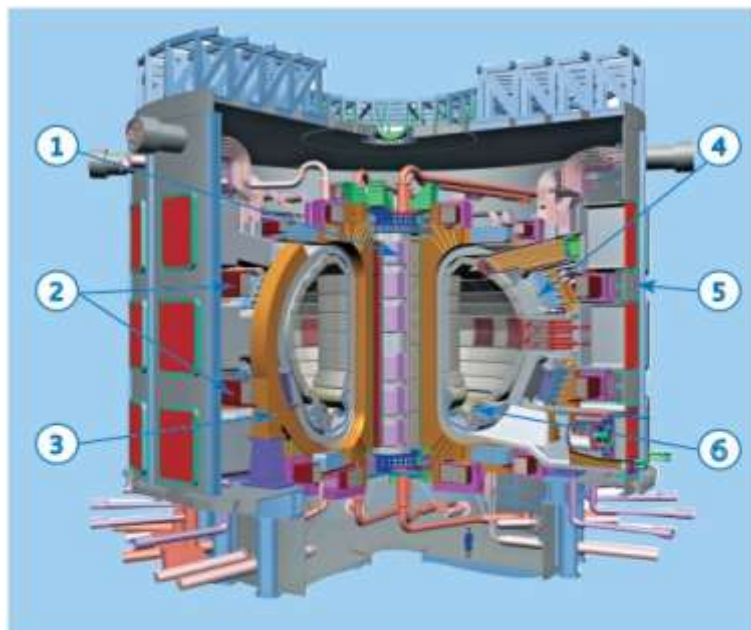


Схема классического токамака

Сведения об ИТЕР и его компонентах



габаритные размеры реактора - 40 × 40 метров

1 – центральный соленоид (индуктор);

2 – катушки полоидального магнитного поля;

3 – катушка тороидального магнитного поля;

4 – вакуумная камера;

5 – криостат

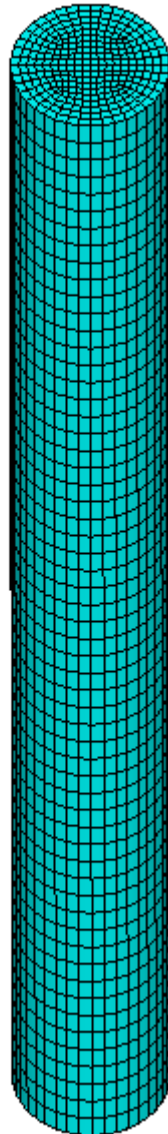
6 – дивертор

Термоядерный реактор ИТЕР
с указанием основных составляющих



Кремниевые зеркала – диагностический
элемент блока диагностики томсоновского
рассеяния

Модельная задача об охлаждении цилиндра



$$u_t = a^2 \Delta u \quad u = u(r, \varphi, t) \quad a^2 = \frac{k}{c\rho}$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \varphi^2} = \frac{1}{a^2} \frac{\partial u}{\partial t}$$

$$u = ?$$

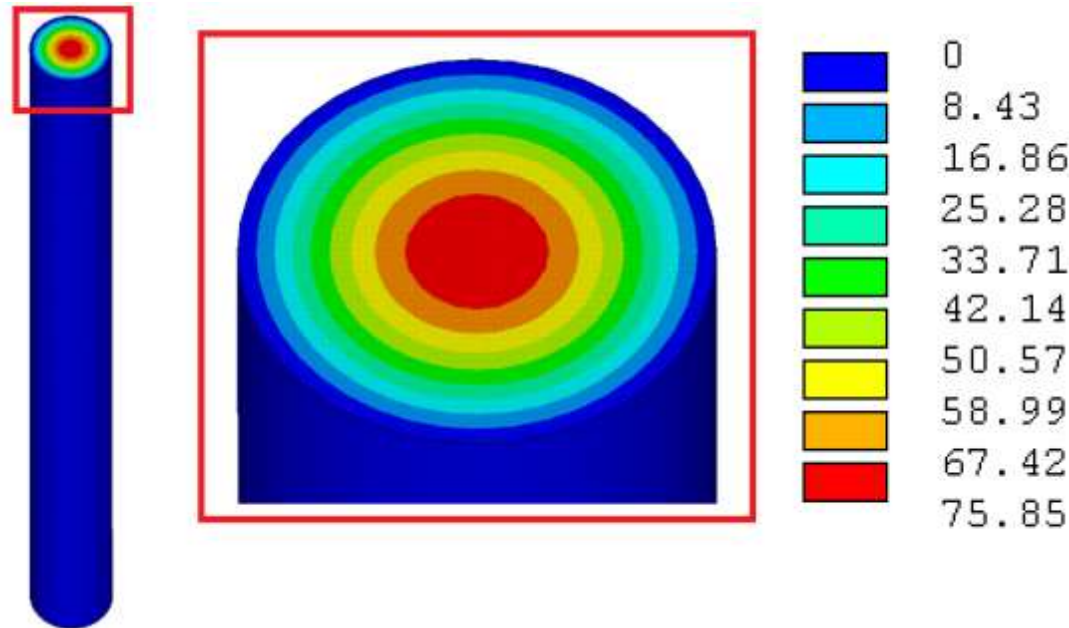
Начальное условие: $u(r, \varphi, 0) = 100^\circ\text{C}$

Граничное условие: $u(r_0, \varphi, t) = 0^\circ\text{C}$

$r_0 = 0.1$ м – радиус цилиндра

NELEM	NNOD	NDOF
17 700	75 399	226 197

Модельная задача об охлаждении цилиндра



$$\frac{u(r,t)}{u_0} = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2J_0(\mu_m^{(0)} p)}{\mu_m^{(0)} J_1(\mu_m^{(0)})} e^{-(\mu_m^{(0)})^2 \vartheta};$$

Здесь J – цилиндрические функции,
 $\mu_m^{(0)}$ – m -й корень уравнения $J_0(\mu)=0$;

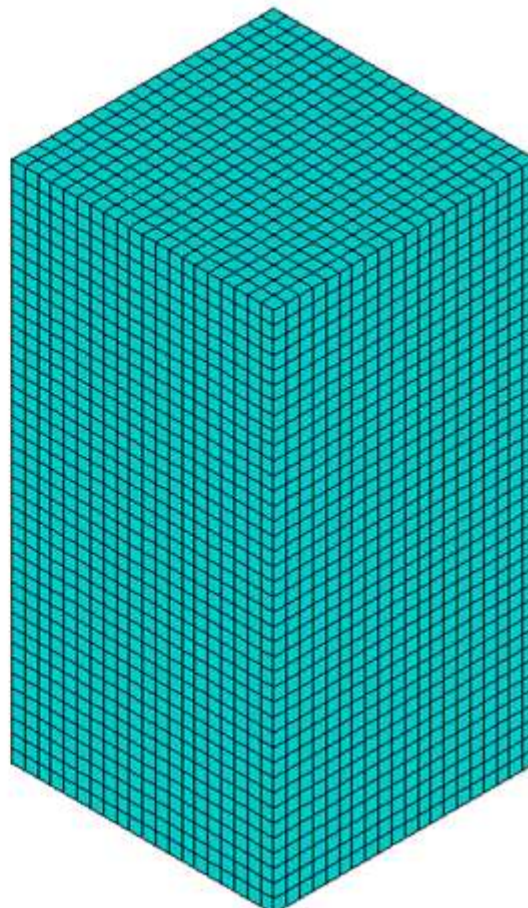
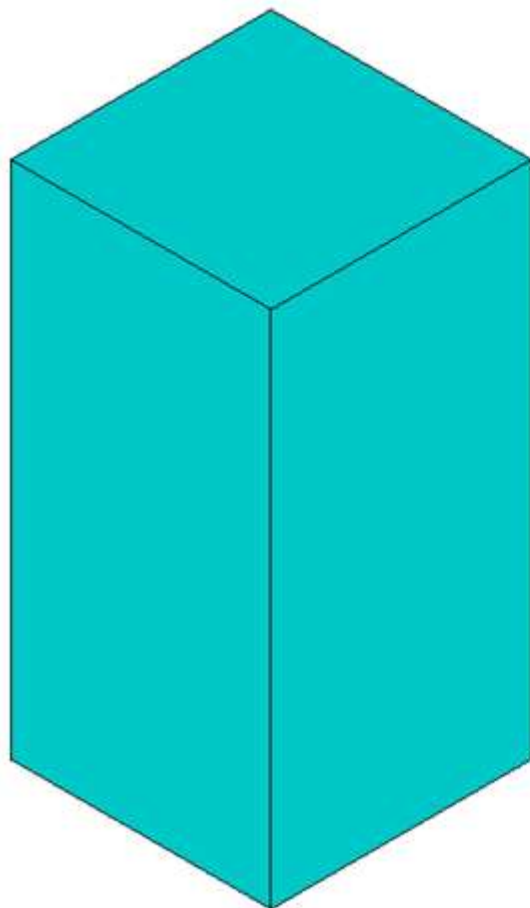
Коэффициенты $p = \frac{r}{r_0}$; $\vartheta = \frac{a^2 t}{r_0^2}$.

На оси цилиндра получаем:

$$\frac{u(r,t)}{u_0} = 1.6 e^{-5.76\vartheta} - 1.07 e^{-30.47\vartheta}$$

Температура (КЭ постановка), °C	Температура (аналитическое решение), °C	Расхождение, °C	Расхождение, %
75,85	75,94	0,09	0.1

Модельная задача об охлаждении призмы



$T_{\text{призмы}} (t=0) = 2000^{\circ}\text{R};$

$T_{\text{окруж. среды}} = 530^{\circ}\text{R};$

$\varepsilon = 1$ - коэффициент черноты

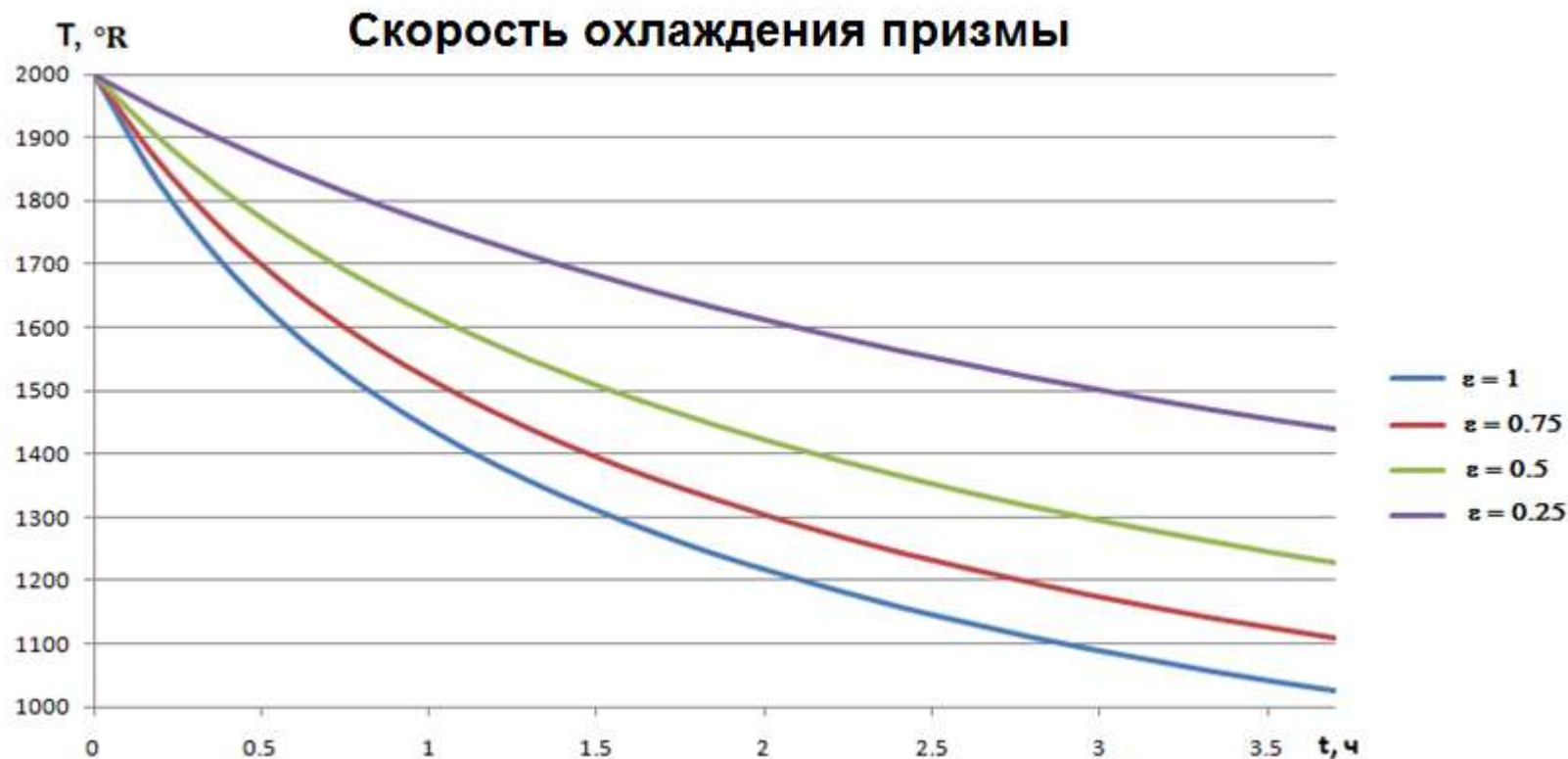
Согласно источнику (*),

$T_{\text{призмы}} (t=3.7\text{ч}) = 1000^{\circ}\text{R};$

NELEM	NNOD	NDOF
16 000	70 162	210 486

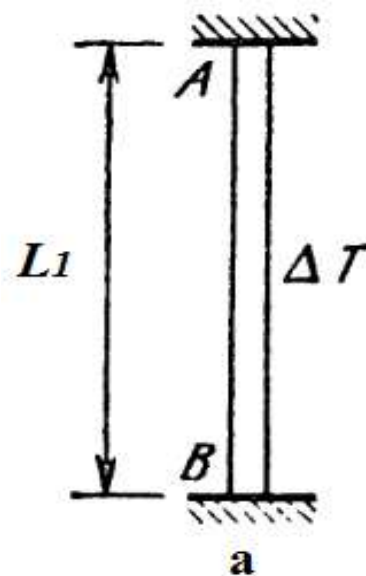
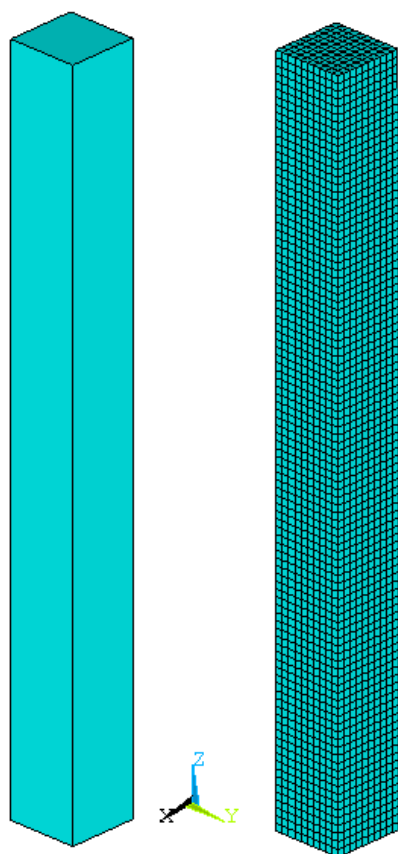
(*) – R. Siegel, J.R. Howell. Thermal Radiation Heat Transfer, Taylor & Francis, 1992

Модельная задача об охлаждении призмы

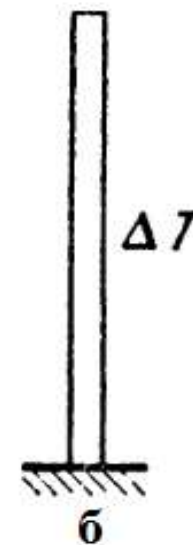


$T(t=3.7ч)$ (КЭ постановка), $^\circ C$	$T(t=3.7ч)$ (аналитическое решение), $^\circ C$	Расхождение, $^\circ C$	Расхождение, %
1027	1000	27	2.7

Модельная задача о тепловом расширении



а: статически
неопределимый
стержень



б: статически
определимый
стержень

NELEM	NNOD	NDOF
10 000	46 541	139 623

Модельная задача о тепловом расширении

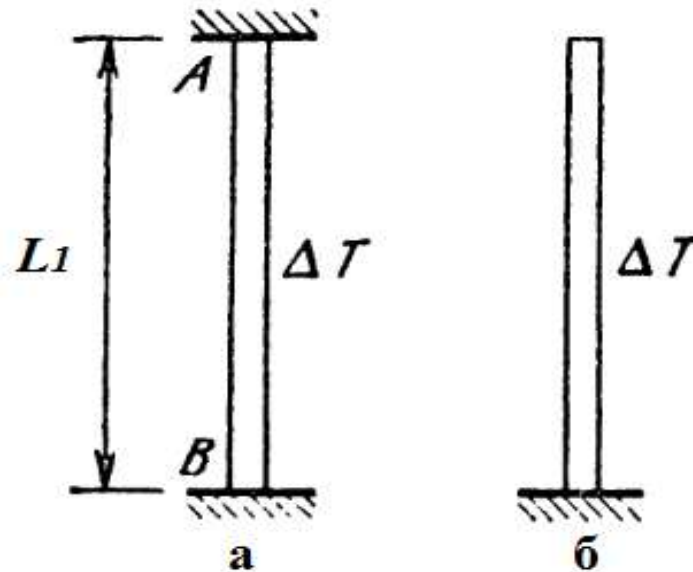
Сжимающая сила:

$$\sigma = \frac{E(L_2 - L_1)}{L_1}$$

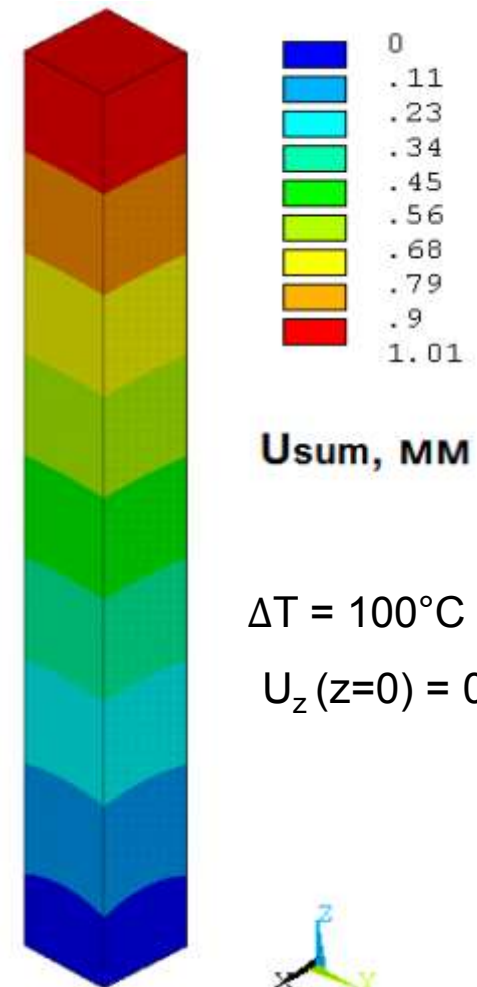
E – модуль упругости материала.

$$\Delta T = 100^\circ\text{C}$$

$$U_z(z=0, z=L_1) = 0$$



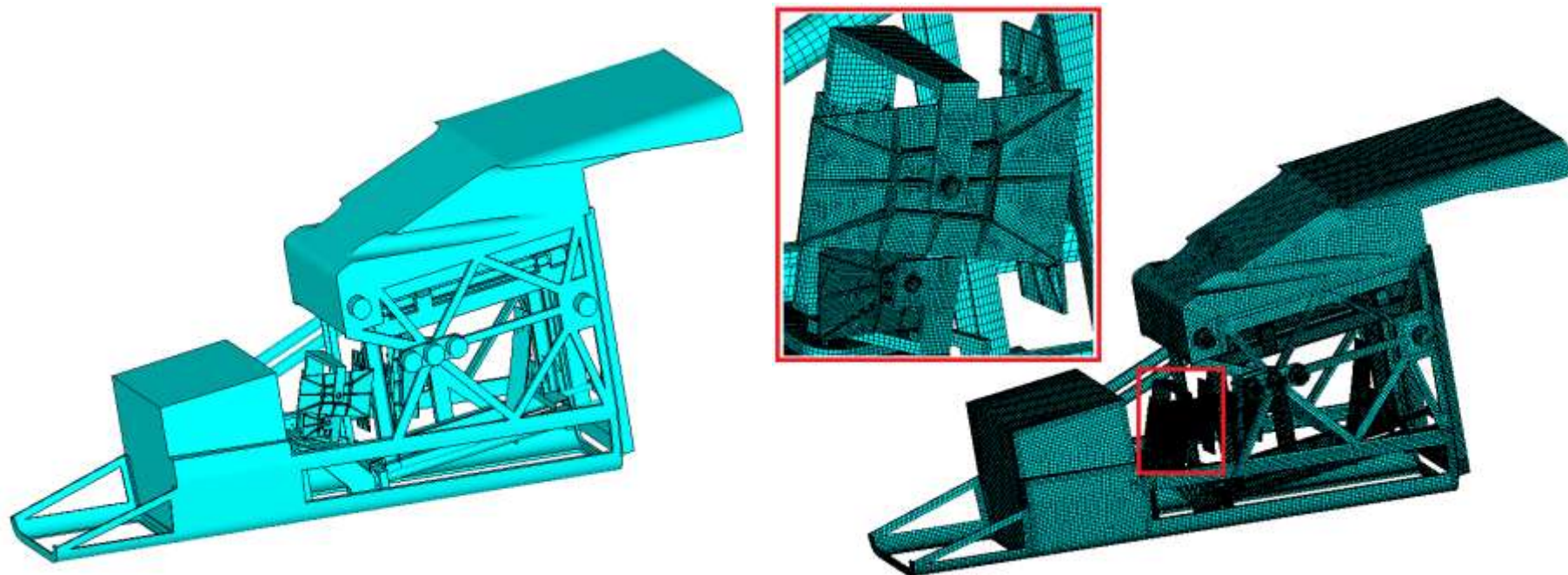
Новая длина:
 $L_2 = L_1 (1 + \alpha(T_2 - T_1))$, где $T_2 - T_1 = \Delta T$



$\Delta T = 100^\circ\text{C}$
 $U_z(z=0) = 0$

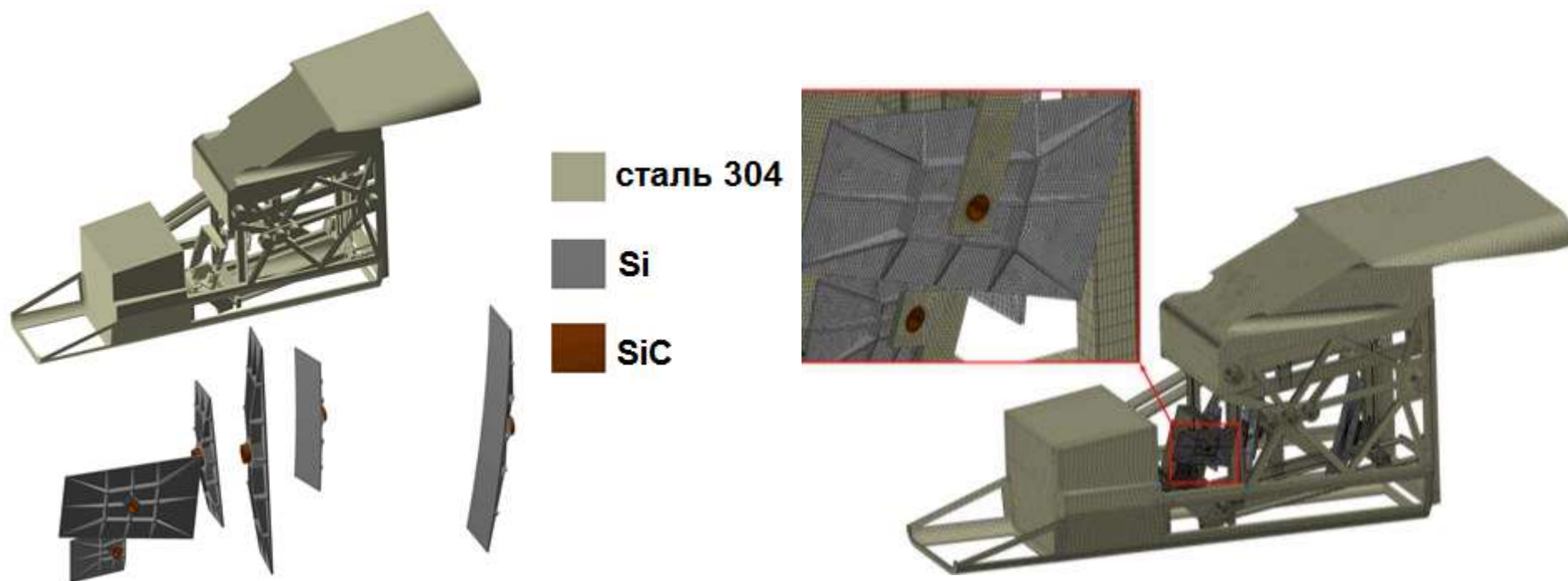
σ (КЭ постановка), МПа	σ (аналитическое решение), МПа	$L_2 - L_1$ (КЭ постановка), мм	$L_2 - L_1$ (аналитическое решение), мм
200	200	1.01	1

Блок диагностики ИТЕР: геометрическая и КЭ модели



NELEM	NNOD	NDOF
508 182	581 928	1 524 546

Блок диагностики ИТЕР: распределение материалов и их свойства

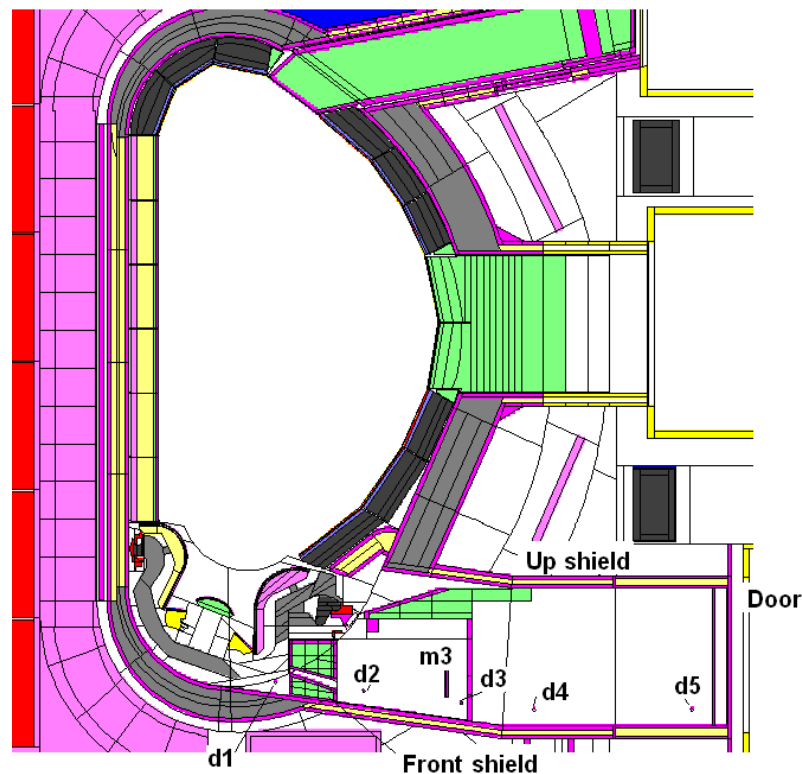


Свойства материалов при 100 °С

Материал	ρ , кг/м ³	E, ГПа	μ	k , $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}$	μ	$\alpha \cdot 10^{-6}$, $^\circ\text{C}^{-1}$
SS304	7869	190	0.3	16	509	16.2
Si	2330	150	0.3	155	690	2.5
SiC	2500	215	0.2	160	690	2.4

Блок диагностики: температурный анализ

d1, d2, d3, d4, d5 – зоны, в которых известна мощность излучения



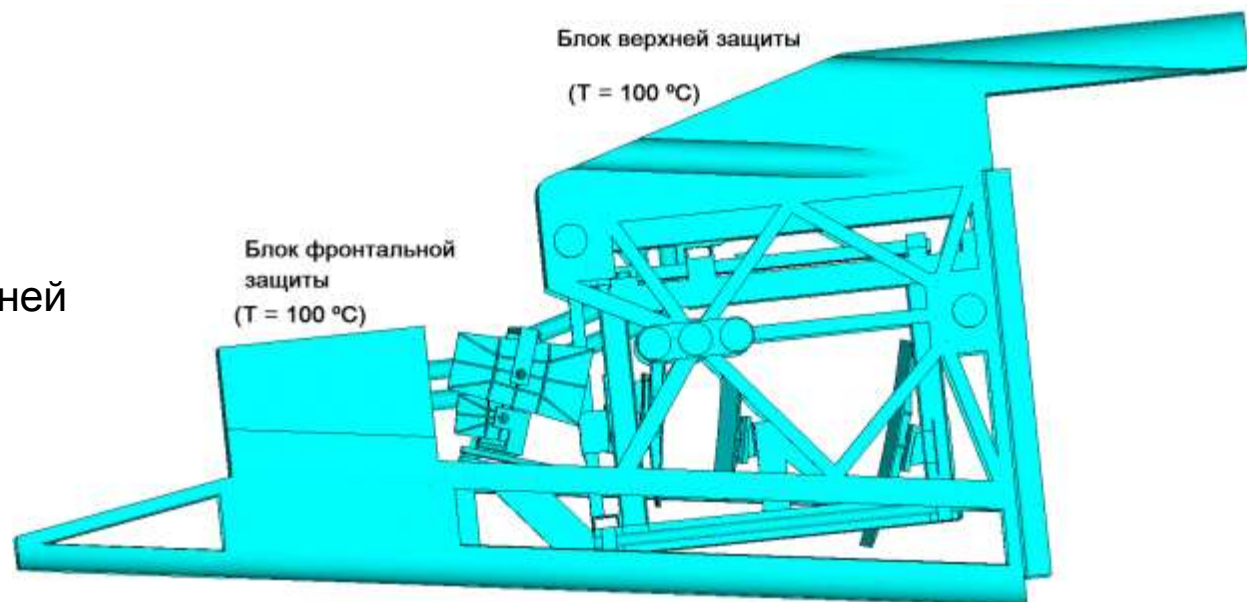
Значения плотности мощности излучения, МВт/см³

	d1	d2	d3	d4	d5
SS304	45	1.6	1.4	0.12	0.08
Si	21	0.38	0.28	0.059	0.011

Блок диагностики: температурный анализ



$T = 100^{\circ}\text{C}$ на блоках
фронтальной и верхней
защиты приложена
постоянно



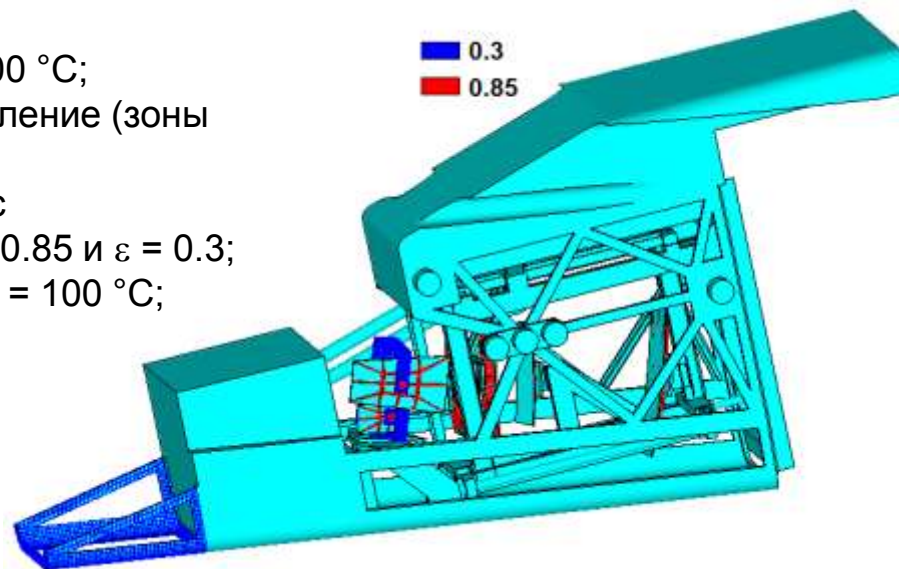
Блок диагностики: температурный анализ

Постановка с учетом
теплового излучения

НУ: $T_{нач} = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$

Основные ГУ (нагрев):

- T блоков защиты = $100\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- объемное тепловыделение (зоны d1-d5)
- тепловое излучение с коэффициентами $\varepsilon = 0.85$ и $\varepsilon = 0.3$;
- T окружающей среды = $100\text{ }^{\circ}\text{C}$;



*Элементы конструкции
с примененными ГУ теплового
излучения*

ГУ (охлаждение):

- T блоков защиты = $100\text{ }^{\circ}\text{C}$
- тепловое излучение с коэффициентами $\varepsilon = 0.85$ и $\varepsilon = 0.3$;

Постановка без учета
теплового излучения

НУ: $T_{нач} = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$

Основные ГУ (нагрев):

- T блоков защиты = $100\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- объемное тепловыделение (зоны d1-d5);

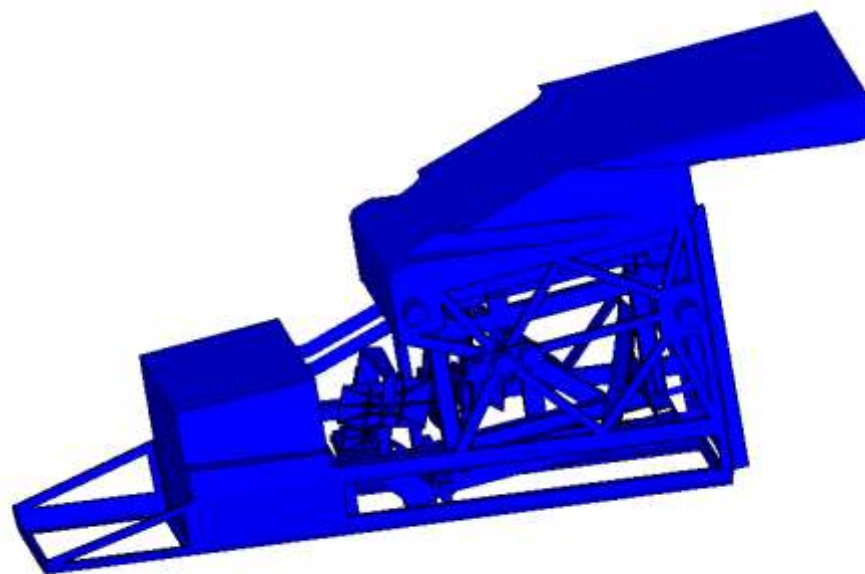
ГУ (охлаждение):

- T блоков защиты = $100\text{ }^{\circ}\text{C}$

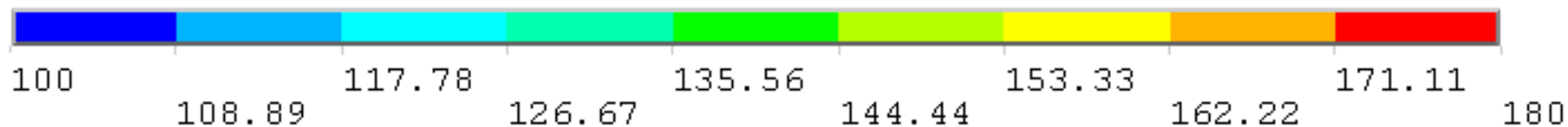
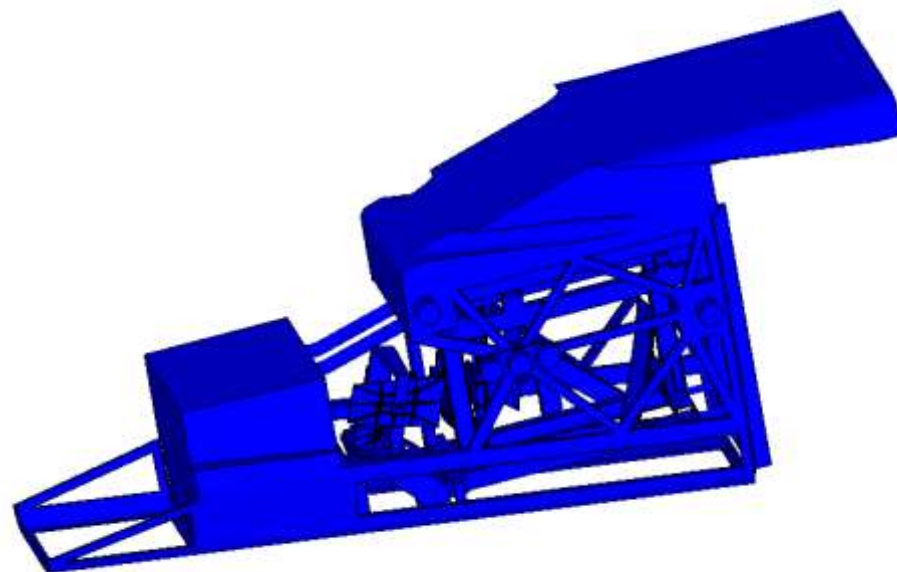
Блок диагностики: температурный анализ

Динамика изменения температуры в конструкции в течение рабочего дня, °C

С учетом излучения



Без учета излучения

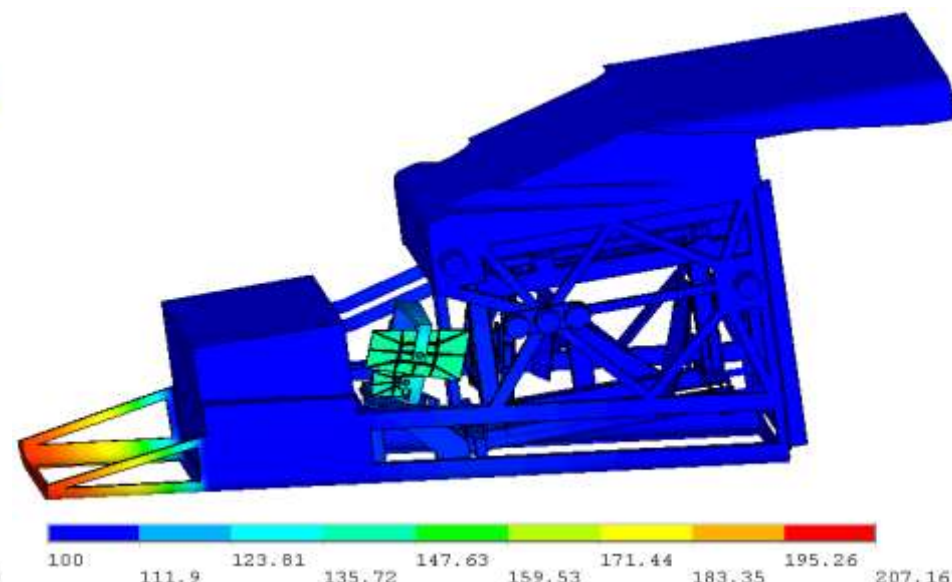
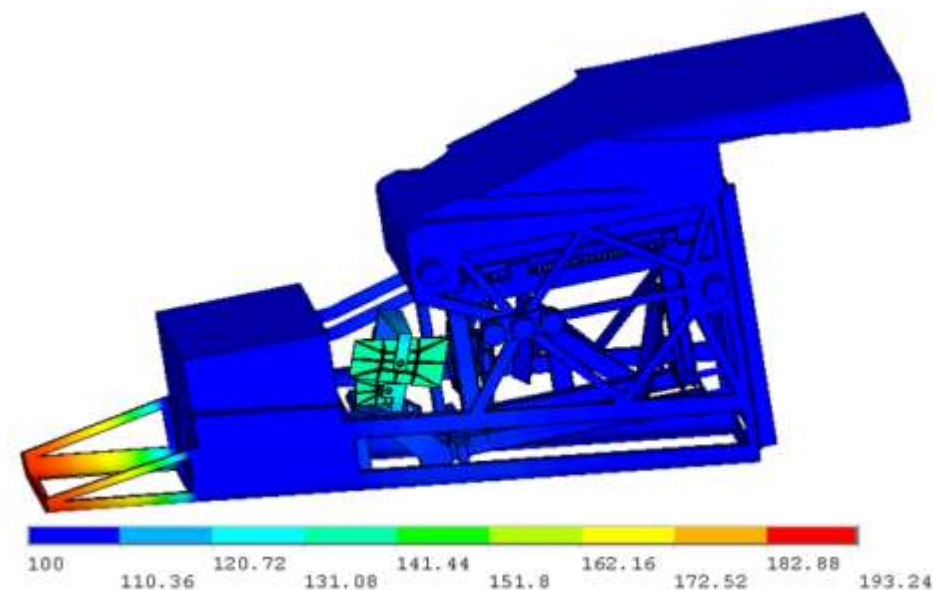


Блок диагностики: температурный анализ

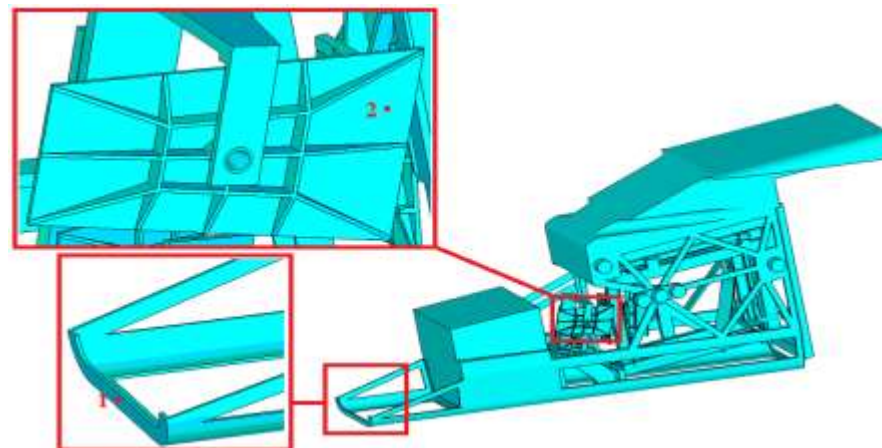
Распределение температуры в конструкции в конце последнего нагрева, °C

С учетом излучения

Без учета излучения

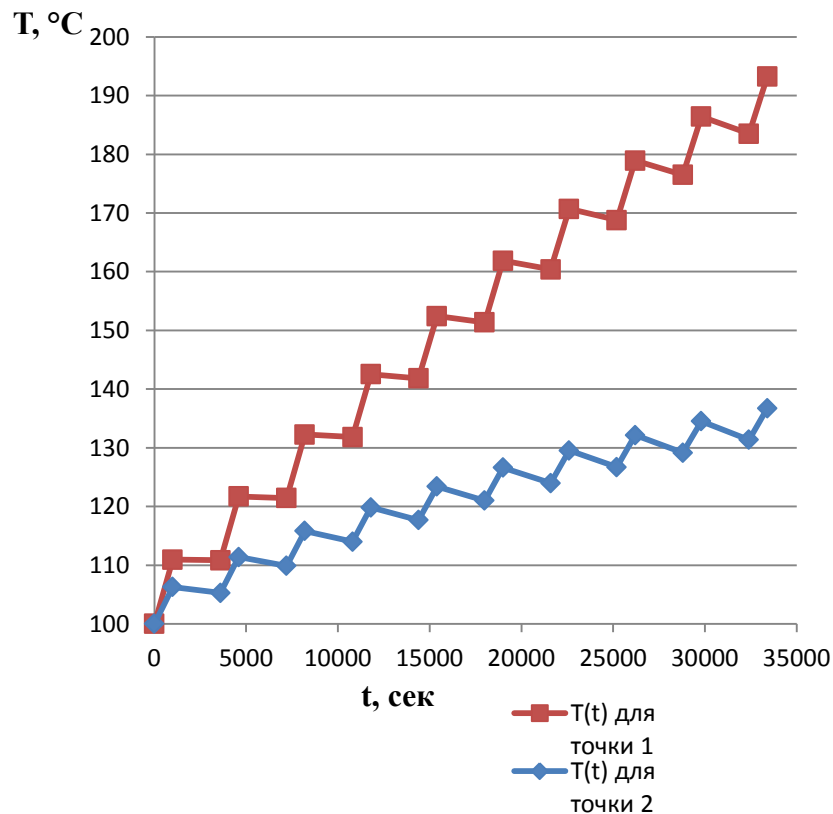


Местоположение двух точек, в которых проводится более подробное исследование зависимости $T(t)$:

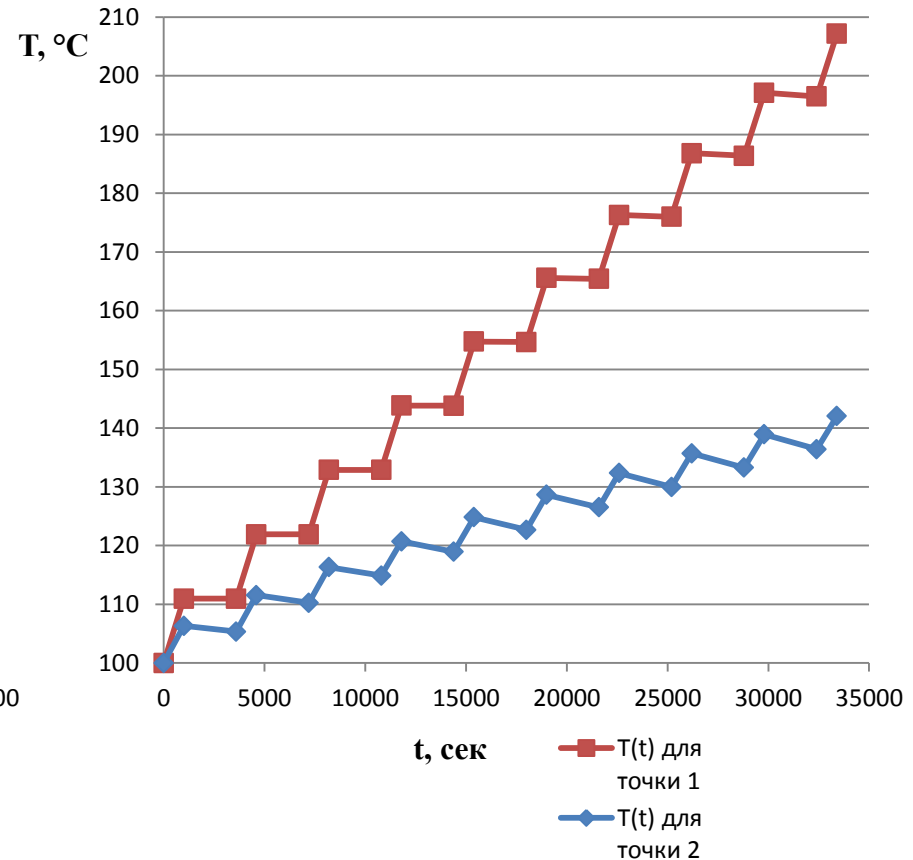


Блок диагностики: температурный анализ

$T(t)$ для точек 1, 2 с учетом излучения



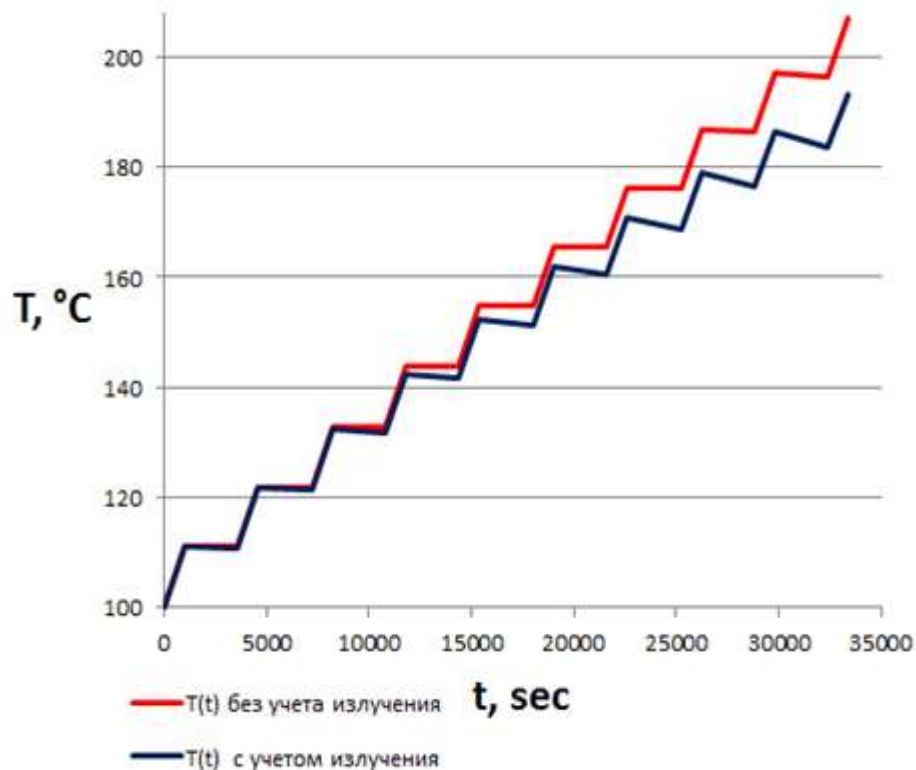
$T(t)$ для точек 1, 2 без учета излучения



Блок диагностики: температурный анализ

Точка 1

Диапазон значений температуры для точки 1



Максимальное
 значение T без учета
 излучения, $^\circ\text{C}$

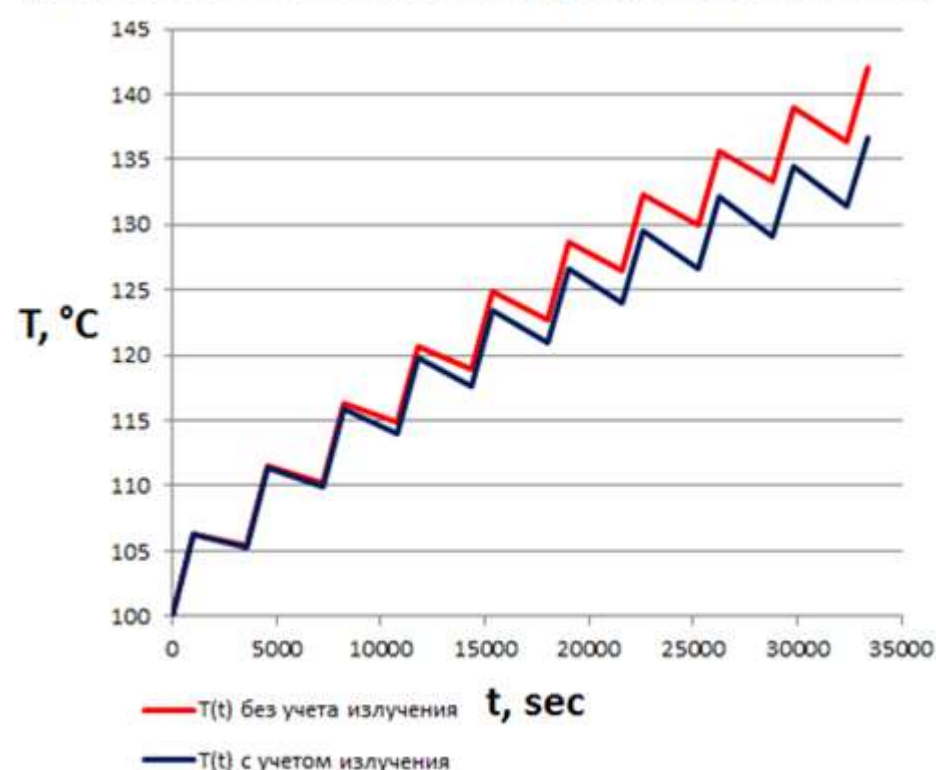
207.16

Максимальное
 значение T с учетом
 излучения, $^\circ\text{C}$

193.24

Точка 2

Диапазон значений температуры для точки 2



Максимальное
 значение T без учета
 излучения, $^\circ\text{C}$

142.04

Максимальное
 значение T с учетом
 излучения, $^\circ\text{C}$

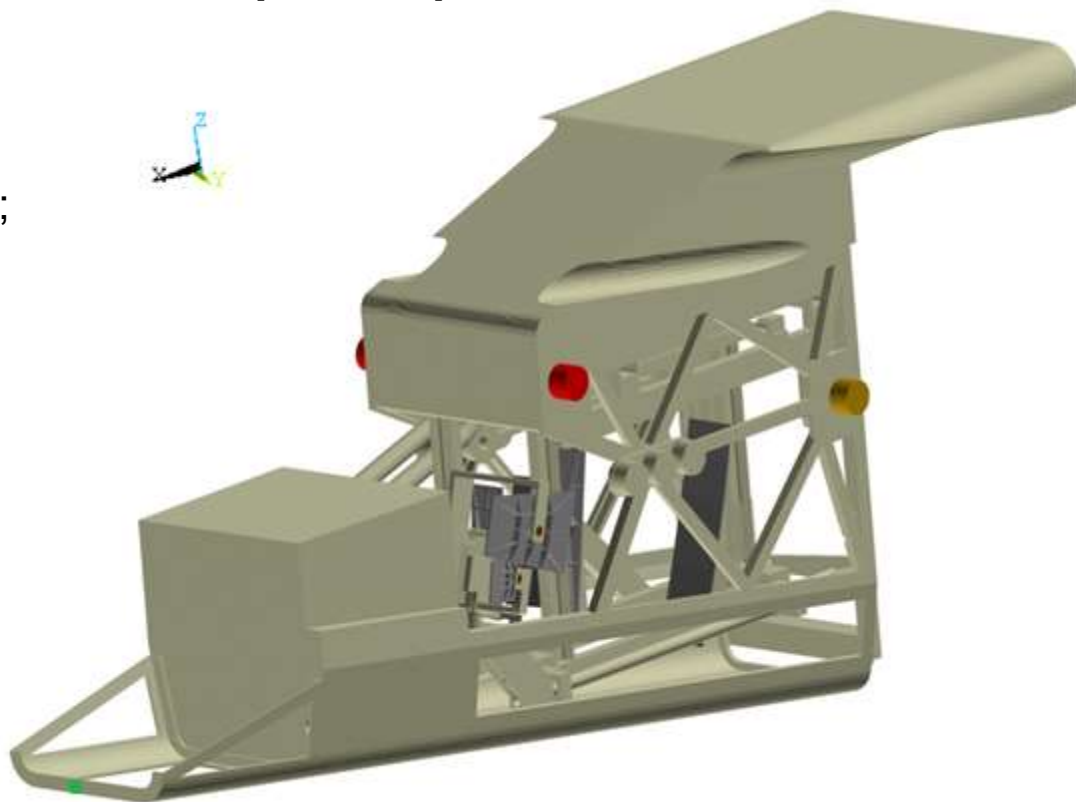
136.72

Блок диагностики: анализ термонапряженного состояния

Граничные условия:

- **Фронтальные ролики:** $U_y = 0, U_z = 0$;
- **Боковые ролики:** $U_z = 0$;
- **«Носик» конструкции:** $U_x = 0$.
- Температура: соответствует распределению на последнем шаге температурного анализа

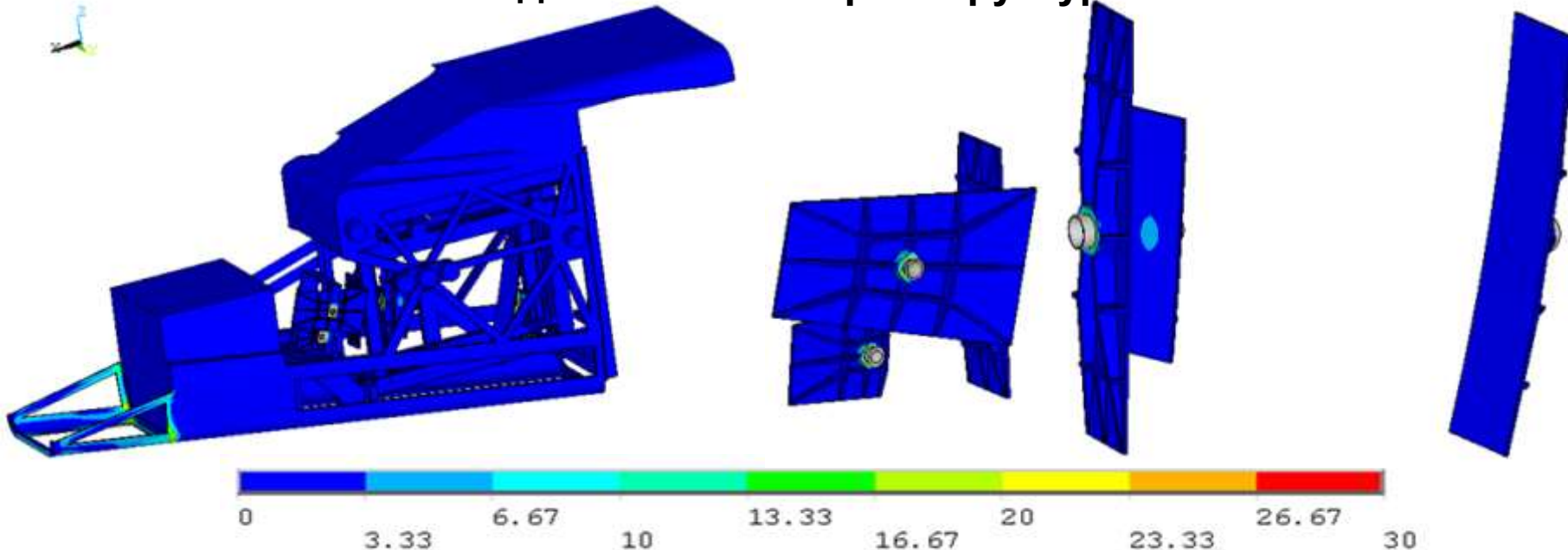
Предел текучести для стали 304
при $T = 200^\circ\text{C}$ равен: $\sigma_y = 144 \text{ МПа}$



Критерий пластичности Мизеса: $\sigma_i > \sigma_y$

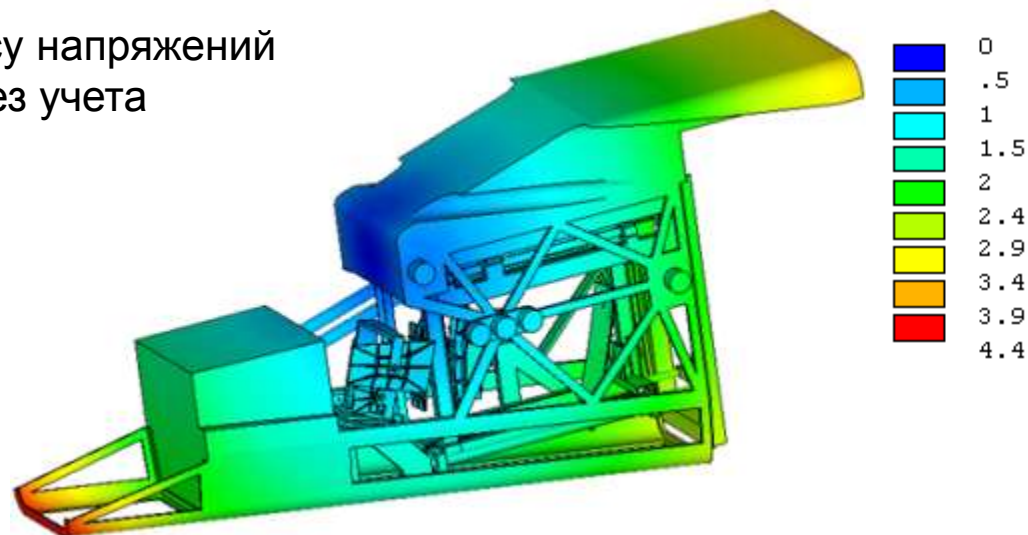
$$\sigma_i = \sqrt{3J_2} = \sqrt{\frac{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2)}{2}}$$

Блок диагностики: термоструктурный анализ



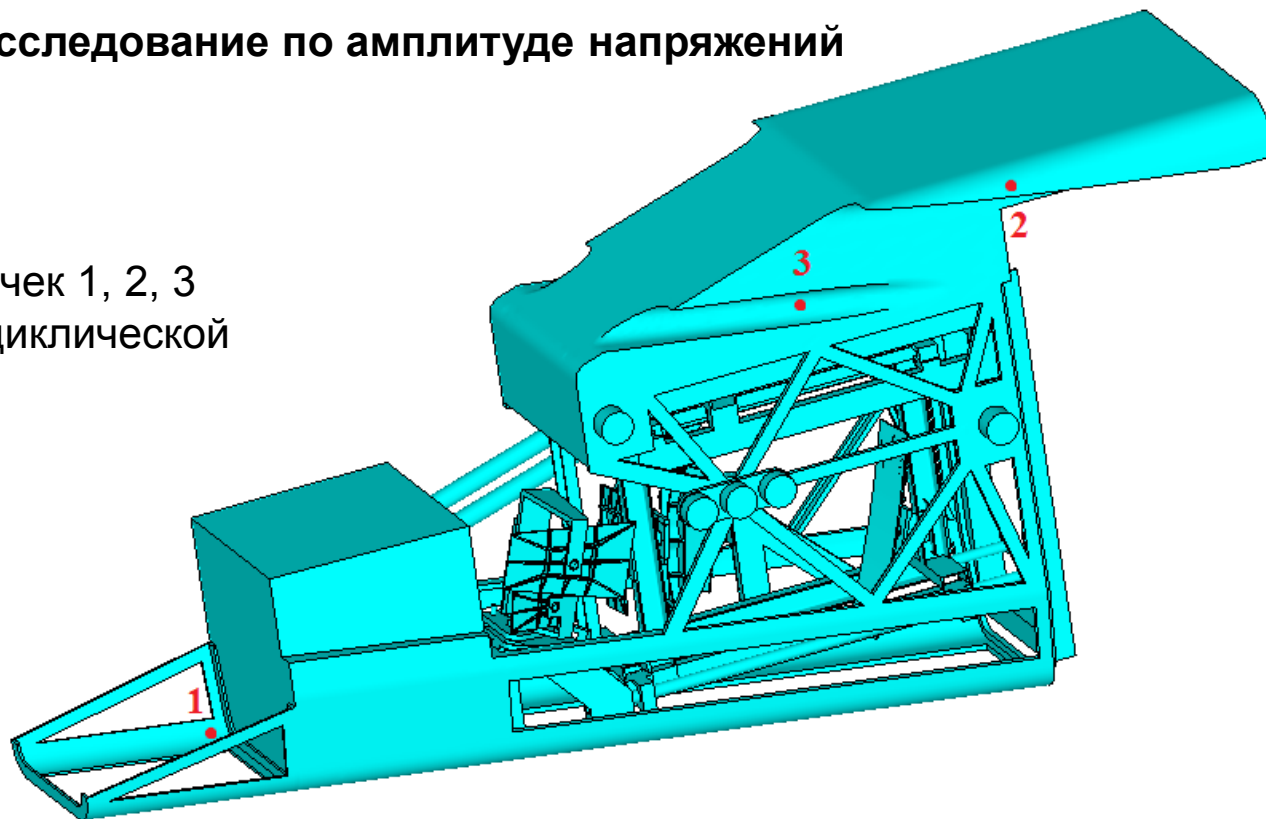
Сверху: поле эквивалентных по Мизесу напряжений в конце последнего нагрева (расчет без учета излучения), МПа

Справа: поле перемещений в конце последнего нагрева (расчет без учета излучения), мм



Блок диагностики: исследование циклической прочности Исследование по амплитуде напряжений

Местоположение точек 1, 2, 3
 для исследования циклической
 прочности

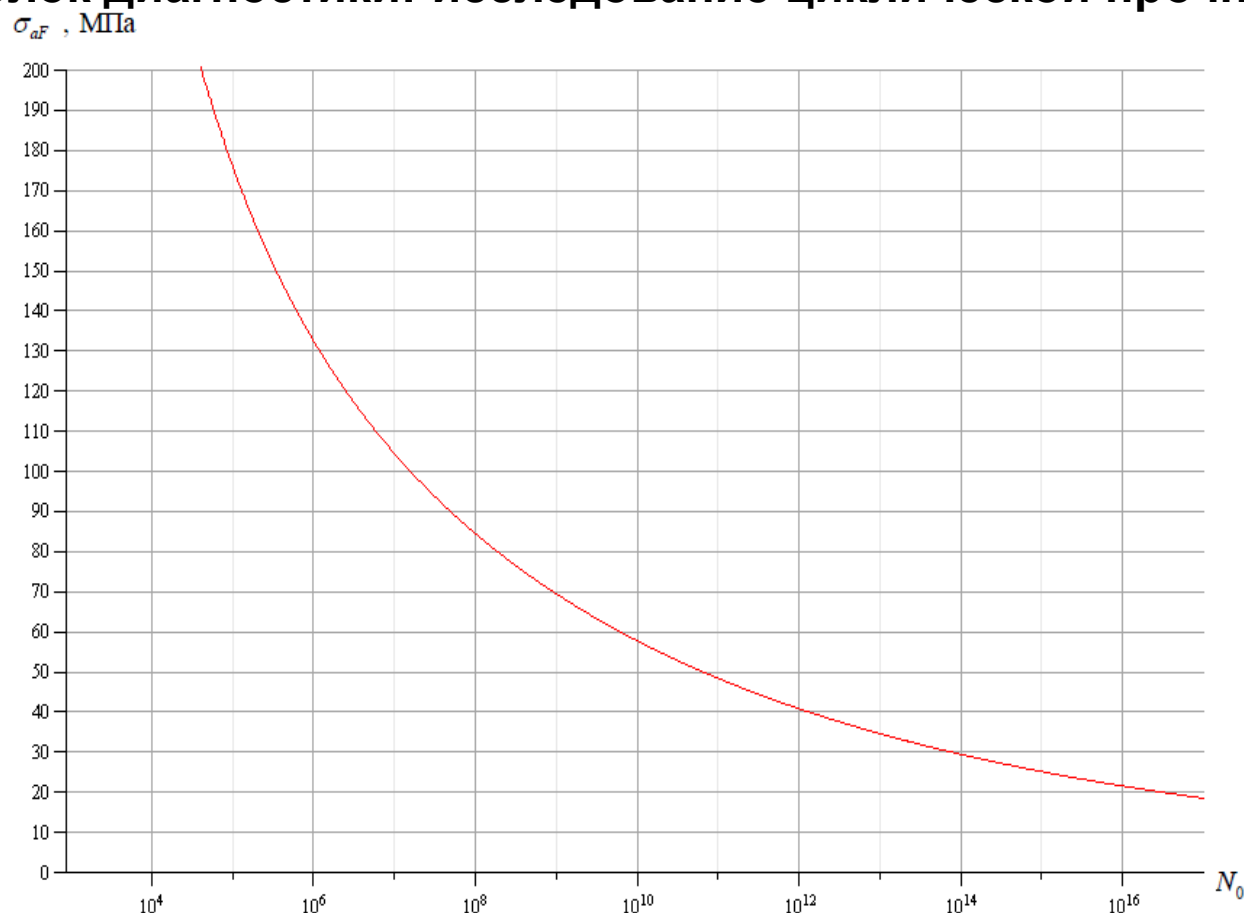


$$1. [\sigma_{aF}] = E^T e_c^T (4n_N [\mathbf{N}_0])^{-m} + (R_c^T - [\sigma_{Fmax}] i_\sigma) [(4n_N [\mathbf{N}_0])^{mc} - i_\sigma]^{-1}$$

$$2. [\sigma_{aF}] = \{E^T e_c^T (4 [\mathbf{N}_0])^{-m} + (R_c^T - n_\sigma [\sigma_{Fmax}] i_\sigma) [(4 [\mathbf{N}_0])^{mc} - i_\sigma]^{-1} \} n_\sigma^{-1}$$

$[\sigma_{aF}]$ – допускаемое значение амплитуды напряжения; $[\mathbf{N}_0]$ - допускаемое число циклов; $\sigma_{aF} = 0.5 \cdot (\sigma_{Fmax} - \sigma_{Fmin})$, где σ_{Fmax} и σ_{Fmin} – соответственно максимальное и минимальное значения главных напряжений цикла;

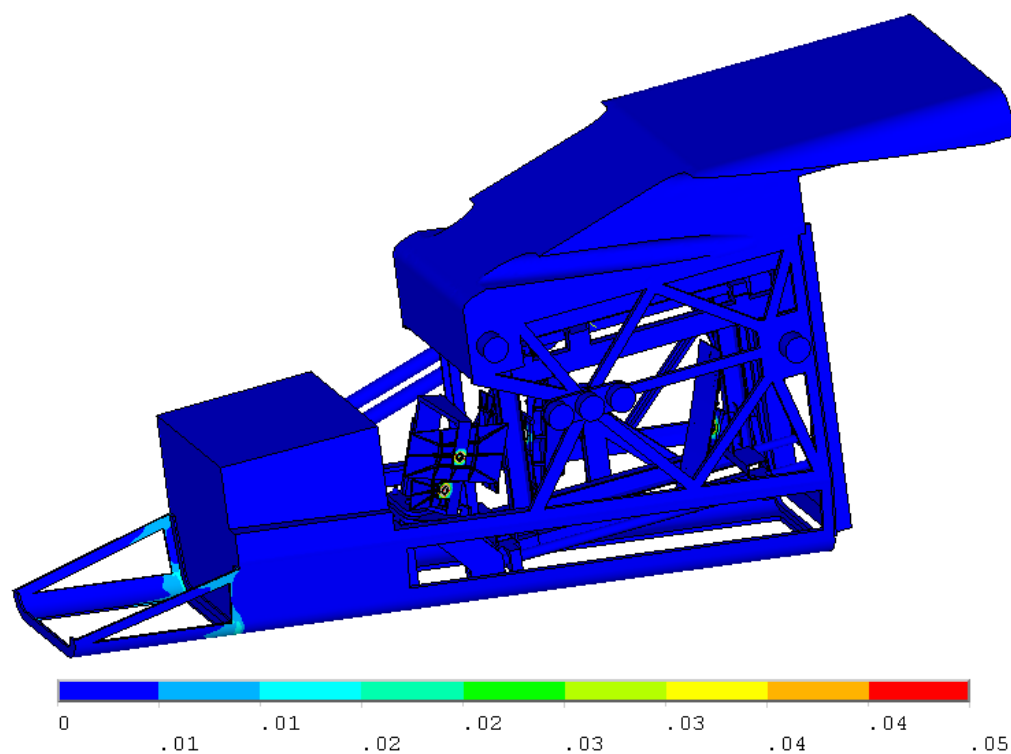
Блок диагностики: исследование циклической прочности



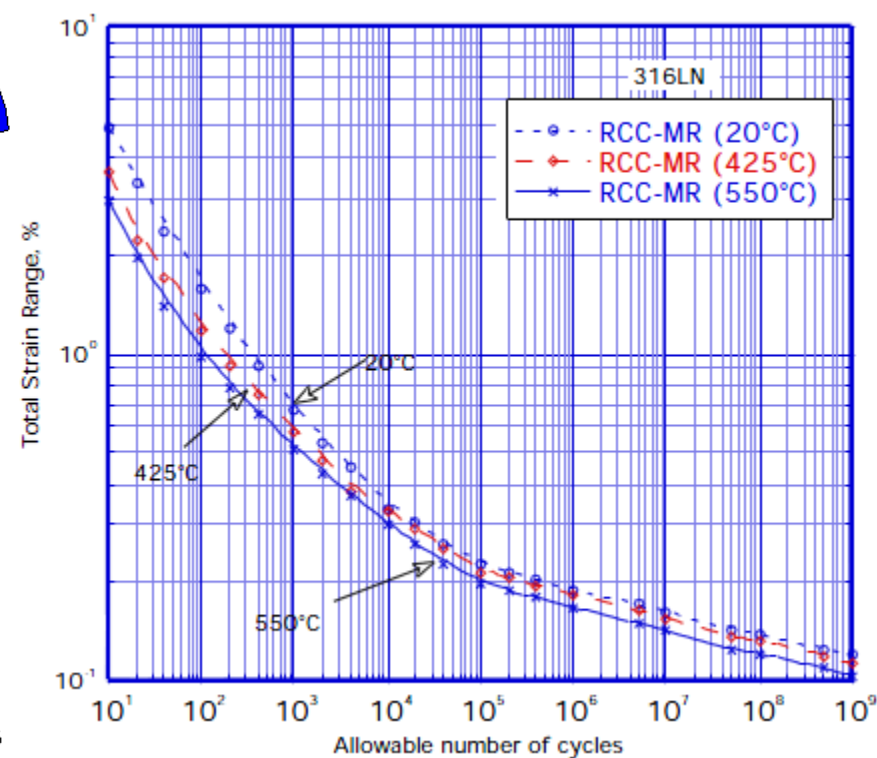
Зависимость
 $\sigma_{aF}(N_0)$
 по формуле 2

№ точки	$[N_0]$ по формуле 1	$[N_0]$ по формуле 2
1	$\gg 10^{15}$	$\gg 10^{15}$
2	$\gg 10^{15}$	$6.75 \cdot 10^{13}$
3	$1.42 \cdot 10^{15}$	$1.48 \cdot 10^{11}$

Блок диагностики: исследование циклической прочности Исследование по относительной деформации

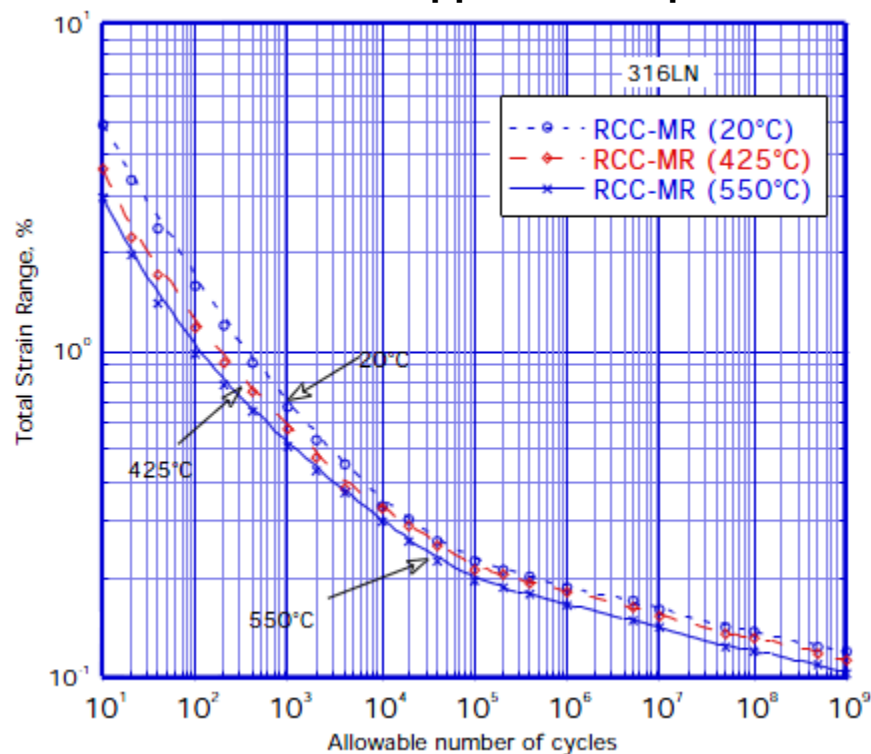


Поле относительных деформаций в конце последнего нагрева (без учета теплового излучения), %



Зависимость относительной деформации стали SS304 от числа циклов

Блок диагностики: исследование циклической прочности



№ точки	Относительная деформация, %	Допускаемое число циклов $[N_0]$
1	0.020	$>10^9$
2	0.071	$>10^9$
3	0.036	$>10^9$

Допускаемое число циклов работы конструкции, согласно расчету по относительной деформации, составляет не менее $[N_0]=10^9$.

Блок диагностики: прогноз накопленного усталостного повреждения

Условие прочности при наличии циклических нагрузок:

$$\sum_{i=1}^k \frac{N_i}{[N_0]_i} = a \leq [a_N]$$

где N_i – число циклов i -го типа за время эксплуатации;

k – общее число типов циклов;

$[N_0]_i$ – допускаемое число циклов i -го типа;

a – накопленное усталостное повреждение, предельное значение: $[a_N] = 1$.

Число циклов за срок в 10 лет принимается равным:

$$N = 365 \cdot 10 \cdot 10 = 36\,500 \text{ (10 циклов в сутки в течение 10 лет).}$$

С учетом расчетов по амплитуде напряжений и по относительным деформациям, для всех трех исследуемых точек имеем:

Допускаемое число циклов $[N_0]$	Накопленное усталостное повреждение a
10^9	0.0000365

Заключение

- В работе были даны общие сведения о термоядерном реакторе ИТЕР и принципе его работы;
- Были проделаны три модельные задачи: проведено обоснование их необходимости, постановка, решение;
- Для блока диагностики томсоновского рассеяния ИТЕР: проведены температурный анализ, анализ термонапряженного состояния;
- Двумя способами проведено исследование циклической прочности блока диагностики и дан прогноз накопленного усталостного повреждения;
- По итогам всех расчетов сделаны соответствующие выводы



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!