



ОЦІНКА НАПРУЖЕНОГО СТАНУ КОРПУСУ РЕГУЛЮЮЧОГО КЛАПАНА

Доповідач: Колядюк Андрій Сергійович

Начальник лабораторії аналізу міцності
обладнання АЕС

ДП «Державний науково-інженерний центр
систем контролю та аварійного реагування»

Основне завдання:

Визначення причин появи тріщин в корпусі регулюючого клапана при його експлуатації.

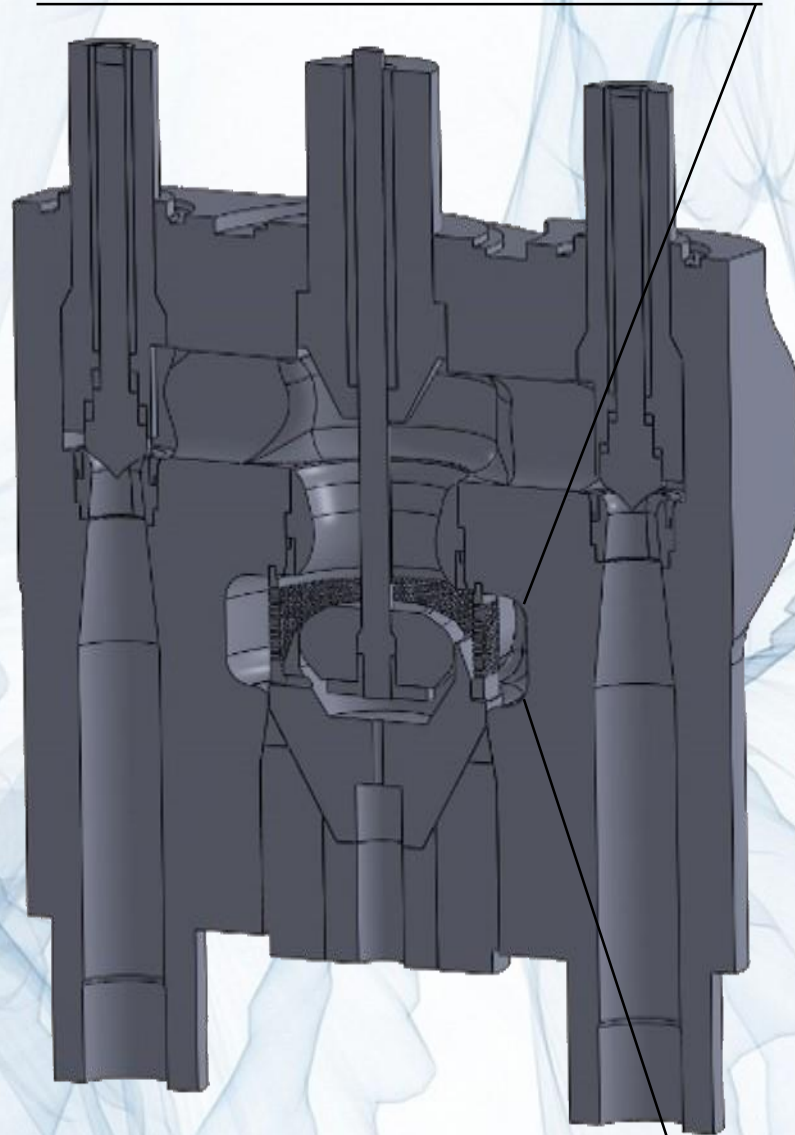
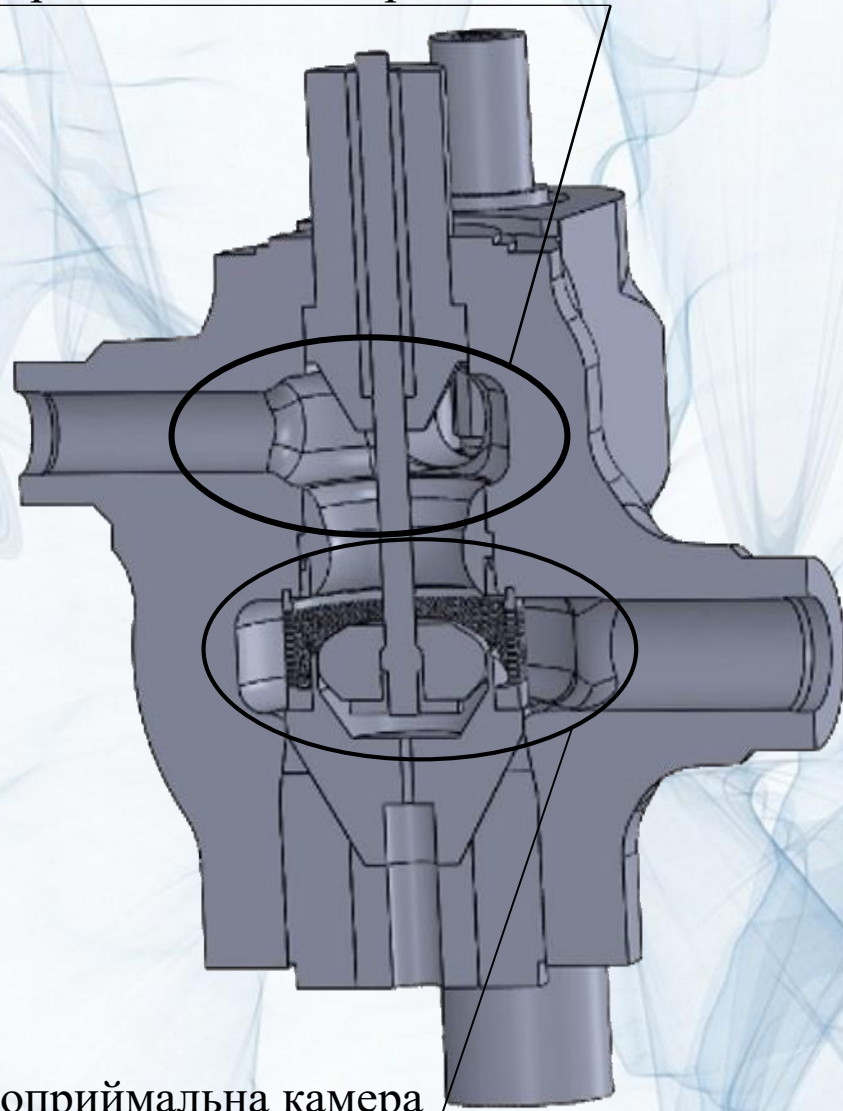
Мета роботи

Визначення параметрів течії пари в системі паророзподілу турбіни. Оцінка термопружного стану та повзучості корпусу клапана та аналіз впливу основних режимів експлуатації на характеристики міцності корпусу.

Конструкція регулюючого клапана парової турбіни

Паророзподільна камера

Верхній перехідний радіус



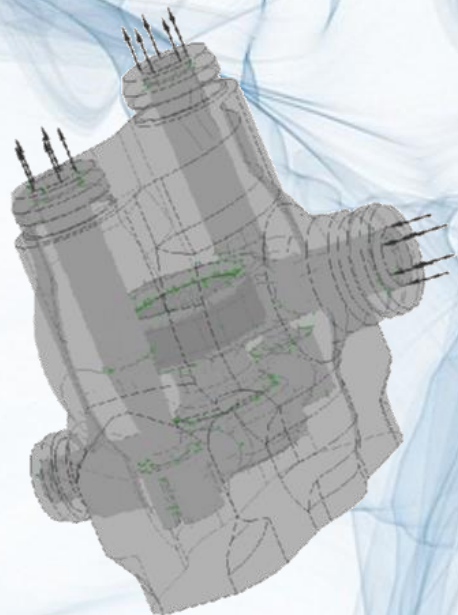
Нижній перехідний радіус



Пароприймальна камера

Вирішені завдання в тривимірній постановці

- Течія пари і теплопровідність в корпусі на стаціонарних режимах роботи
- Пружний напружено-деформований стан корпусу клапана
- Повзучість корпусу клапана на стаціонарному режимі роботи, при потужності турбіни 320МВт
- Повзучість корпусу клапана на стаціонарному режимі роботи з підвищенням температури пари до 560°С
- Течія пари і теплопровідність на стаціонарних режимах роботи зі зміненою пароприймальною камерою
- Пружний напружено-деформований стан і повзучість корпусу зі зміненою пароприймальною камерою
- Нестационарний пружно-пластичний стан корпусу клапана під час пуску турбіни з холодного стану



Розрахункова схема клапана в CFD

Потужність, МВт	Витрата через клапан, кг/с	Відкриття РК1, мм	Відкриття РК3, мм	Тиск за РК1, МПа	Тиск за РК3, МПа
30	9.23611	1,2	0	2,16307	12,4781
100	48.2639	9,4	0	11,2238	12,4781
176	94.625	18,6	0	21,9794	12,4781
180	99.4306	19,1	0,6	22,031	12,4781
220	147.736	26,4	7,6	22,5256	19,1167
240	162.889	30,1	13,2	22,6462	22,1157
320	140.389	40,2	34,6	22,7985	22,7998

Вхідні дані розглянутих стаціонарних режимів

Методичне забезпечення рішення завдань в тривимірній постановці:

**Визначення ГУ для завдань міцності:
Рішення завдання течії пари і теплопровідності
корпусу та теплоізоляції в регулюючому клапані**

Осереднені за Рейнольдсом рівняння Нав'є-Стокса

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j) = 0;$$

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_i U_j) = -\frac{\partial p'}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right];$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h_{tot}) - \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j h_{tot}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} (U_i \tau_{ij}).$$

Напівемпірична модель $k-\omega$ SST Ментера

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k3}} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \beta^* \rho k \omega + P_k$$

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega 3}} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] - 2(1-F) \rho \frac{1}{\sigma_{\omega 2} \omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} + \alpha_3 \frac{\omega}{k} P_k - \beta_3 \rho \omega^2$$

Теплопередача в корпусі і теплоізоляції

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m c_p T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda_m \frac{\partial T}{\partial x_j} \right)$$

Пружний напружено-деформований стан і повзучість

Повні деформації

$$\{\varepsilon_n\} = \{\varepsilon^{th}\} + [D]^{-1} \{\sigma_e\}$$

Пружні деформації

$$\{\varepsilon'_n\} = \{\varepsilon_n\} - \{\varepsilon_n^{pl}\} - \{\varepsilon_n^{th}\} - \{\varepsilon_{n-1}^{cr}\}$$

Еквівалентні деформації

$$\varepsilon_{et} = \frac{1}{\sqrt{2(1+\nu)}} \left[(\varepsilon'_x - \varepsilon'_y)^2 + (\varepsilon'_y - \varepsilon'_z)^2 + (\varepsilon'_z - \varepsilon'_x)^2 + \frac{3}{2} (\gamma'_{xy})^2 + \frac{3}{2} (\gamma'_{yz})^2 + \frac{3}{2} (\gamma'_{zx})^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Пружні напруги

$$\sigma_e = 3G\varepsilon_{et}$$

Еквівалентні деформації повзучості

$$\varepsilon^{cr} = \frac{C_1 \sigma_e^{C_2} t^{C_3+1} e^{-C_4/T}}{C_3+1} + C_5 \sigma_e^{C_6} t e^{-C_7/T}$$

Збільшення компонент деформації повзучості

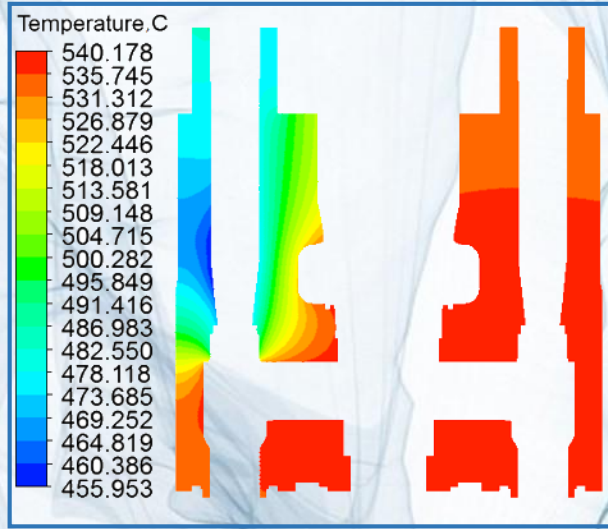
$$\Delta \varepsilon_x^{cr} = \frac{\Delta \varepsilon^{cr}}{\varepsilon_{et}} \frac{(2\varepsilon'_x - \varepsilon'_y - \varepsilon'_z)}{2(1+\nu)}; \quad \Delta \varepsilon_y^{cr} = \frac{\Delta \varepsilon^{cr}}{\varepsilon_{et}} \frac{(2\varepsilon'_y - \varepsilon'_z - \varepsilon'_x)}{2(1+\nu)}; \quad \Delta \varepsilon_z^{cr} = -\Delta \varepsilon_x^{cr} - \Delta \varepsilon_y^{cr};$$

$$\Delta \varepsilon_{xy}^{cr} = \frac{\Delta \varepsilon^{cr}}{\varepsilon_{et}} \frac{3}{2(1+\nu)} \gamma'_{xy}; \quad \Delta \varepsilon_{yz}^{cr} = \frac{\Delta \varepsilon^{cr}}{\varepsilon_{et}} \frac{3}{2(1+\nu)} \gamma'_{yz}; \quad \Delta \varepsilon_{xz}^{cr} = \frac{\Delta \varepsilon^{cr}}{\varepsilon_{et}} \frac{3}{2(1+\nu)} \gamma'_{xz}.$$

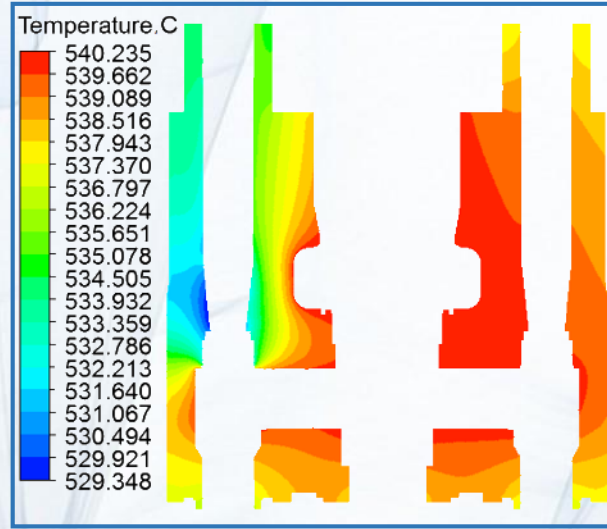
Пружні деформації і сумарні деформації повзучості

$$\begin{aligned} (\varepsilon_x^{el})_n &= (\varepsilon'_x)_n - \Delta \varepsilon_x^{cr}; & (\varepsilon_y^{el})_n &= (\varepsilon'_y)_n - \Delta \varepsilon_y^{cr}; & (\varepsilon_z^{el})_n &= (\varepsilon'_z)_n - \Delta \varepsilon_z^{cr}; \\ (\varepsilon_x^{cr})_n &= (\varepsilon_x^{cr})_{n-1} + \Delta \varepsilon_x^{cr}; & (\varepsilon_y^{cr})_n &= (\varepsilon_y^{cr})_{n-1} + \Delta \varepsilon_y^{cr}; & (\varepsilon_z^{cr})_n &= (\varepsilon_z^{cr})_{n-1} + \Delta \varepsilon_z^{cr}. \end{aligned}$$

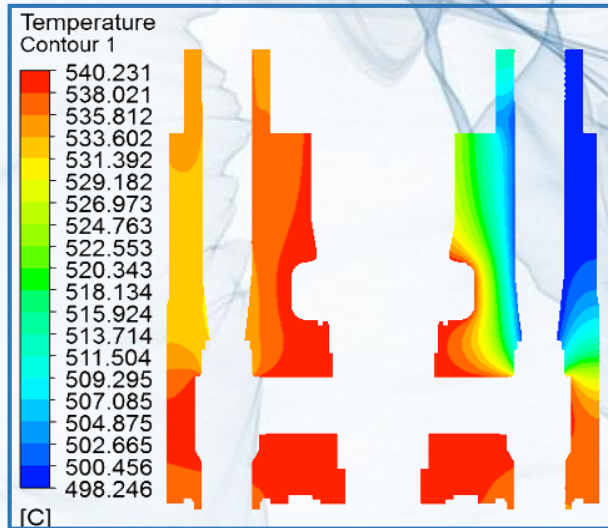
Течія пари в системі паророзподілу і температура корпусу клапана



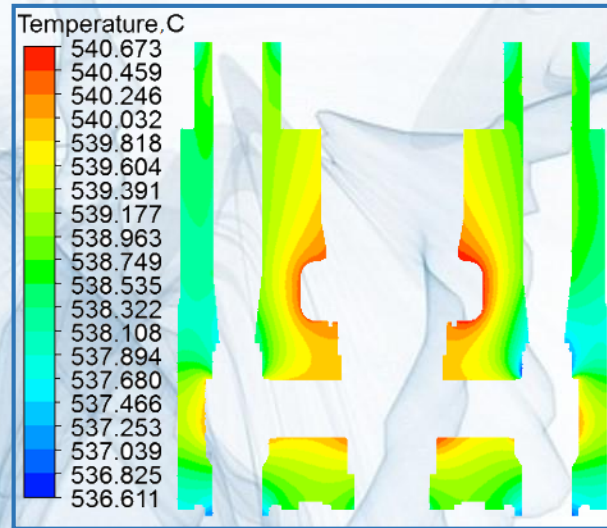
Температура корпусу на режимі роботи 30МВт



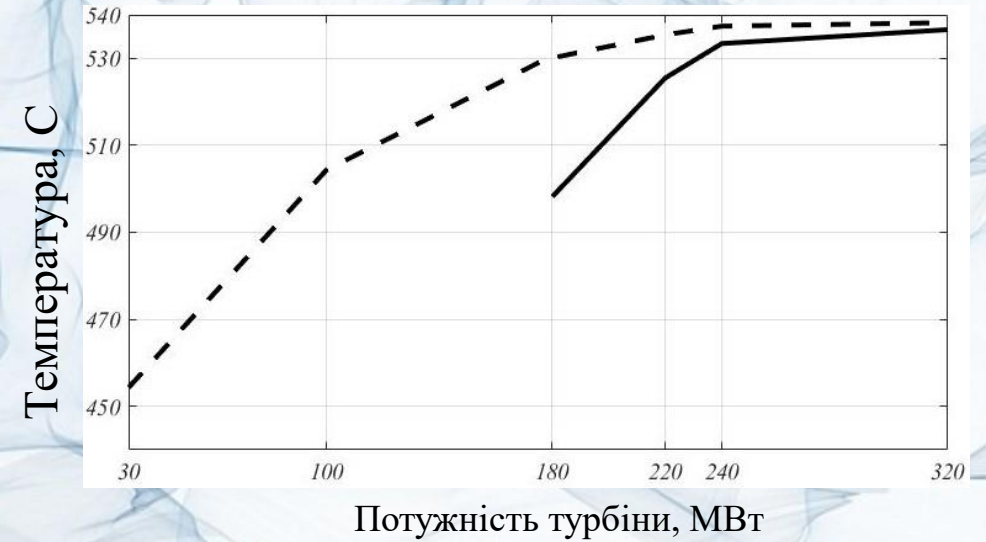
Температура корпусу на режимі роботи 176МВт



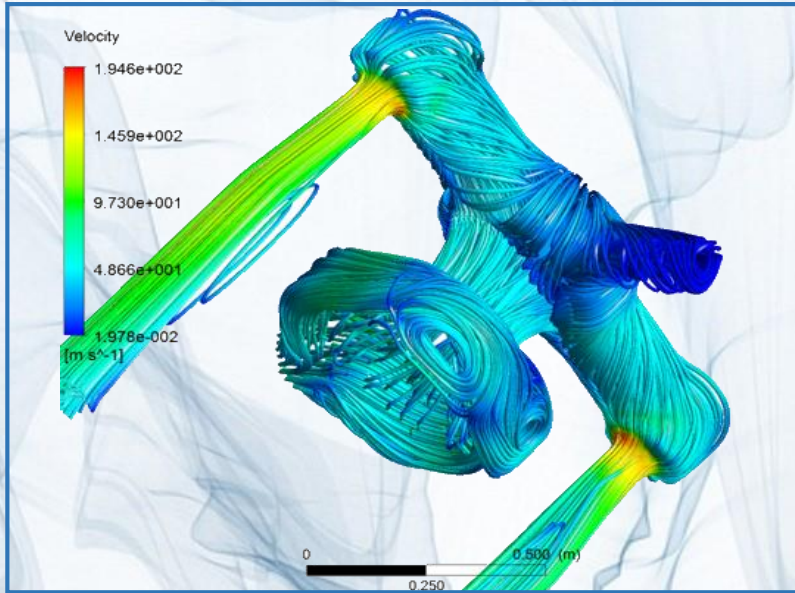
Температура корпусу на режимі роботи 180МВт



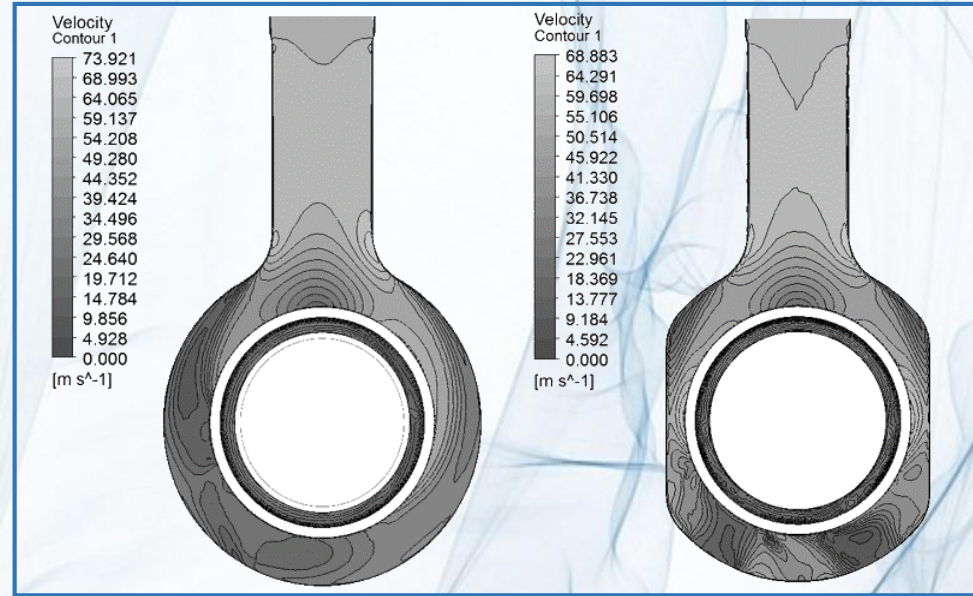
Температура корпусу на режимі роботи 320МВт



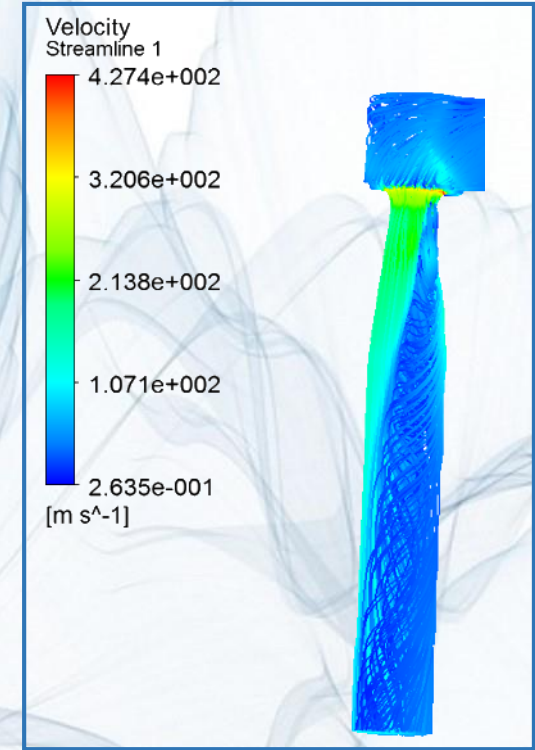
Течія пари в системі паророзподілу і температура корпусу клапана



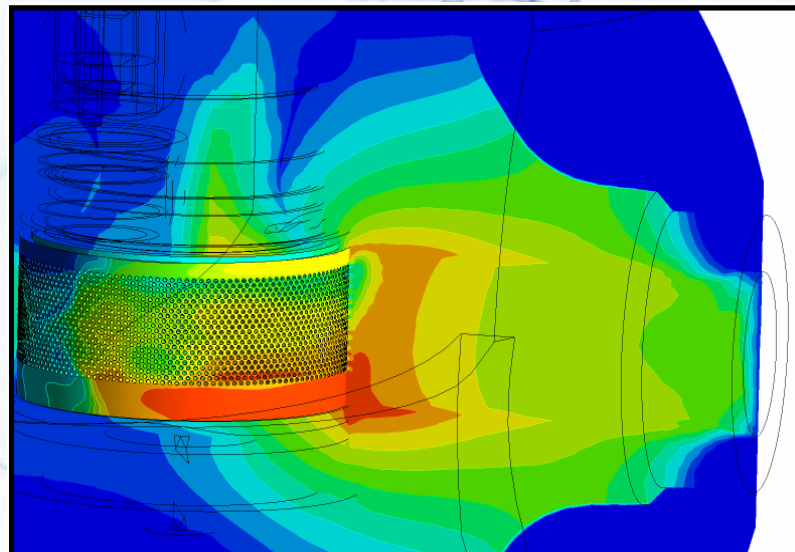
Лінії течії пари в клапані



Швидкості течії пари в пароприймальній камері з різним виконанням



Відрив течії пари за регулюючим клапаном



Область підвищення температури пари і корпусу



Лінії течії пари в пароприймальній камері з різним виконанням

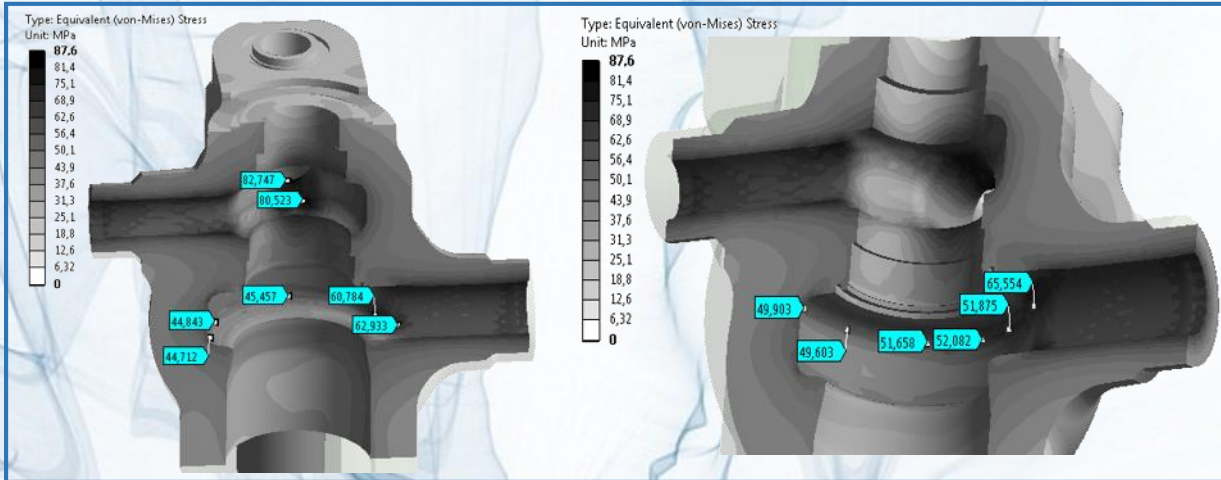
	PK1, т/час	PK3, т/час	PK1, %	PK3, %
Циліндрична камера	80,525	59,658	57,44	42,55
Циліндрична камера з потовщеннями стінки	74,605	64,454	53,64	46,35

Розподіл витрати пари з різними пароприймальними камерами

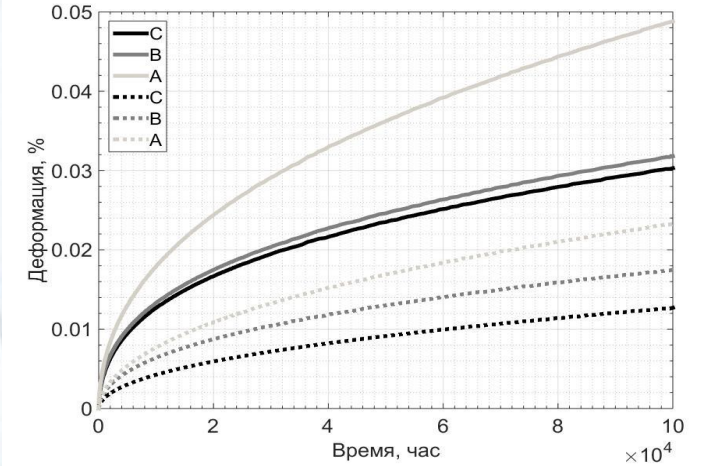
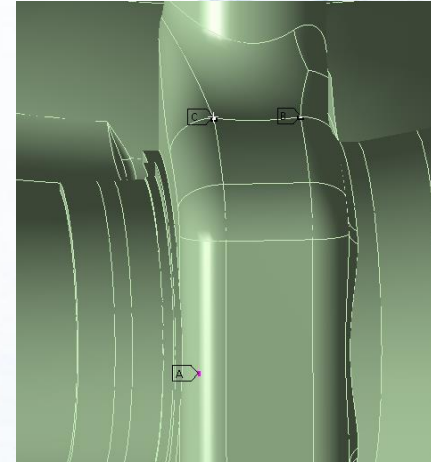
Вплив форми пароприймальної камери на характеристики міцності корпусу

Пружні напруги в корпусі клапана

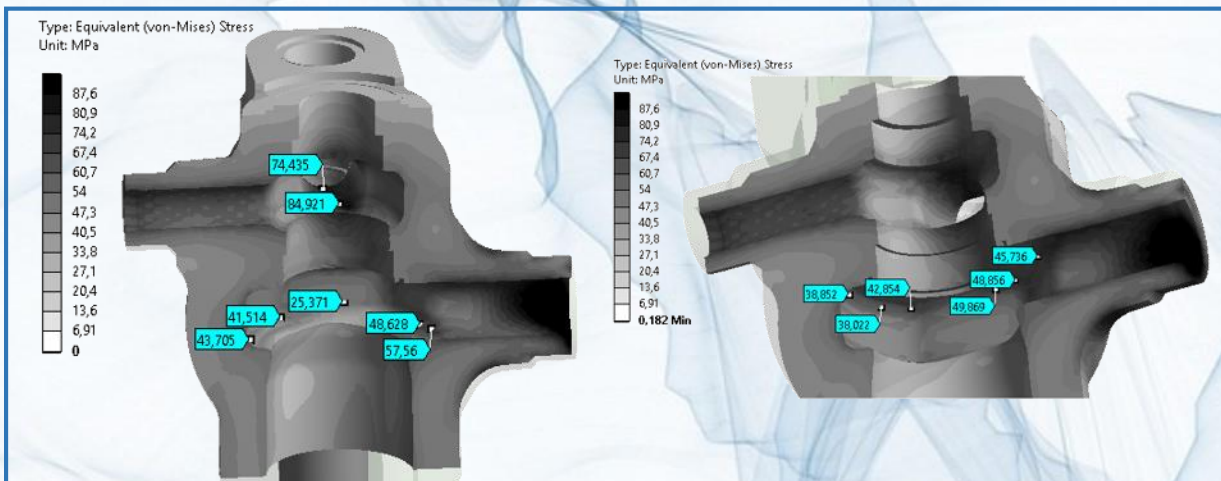
Деформації повзучості



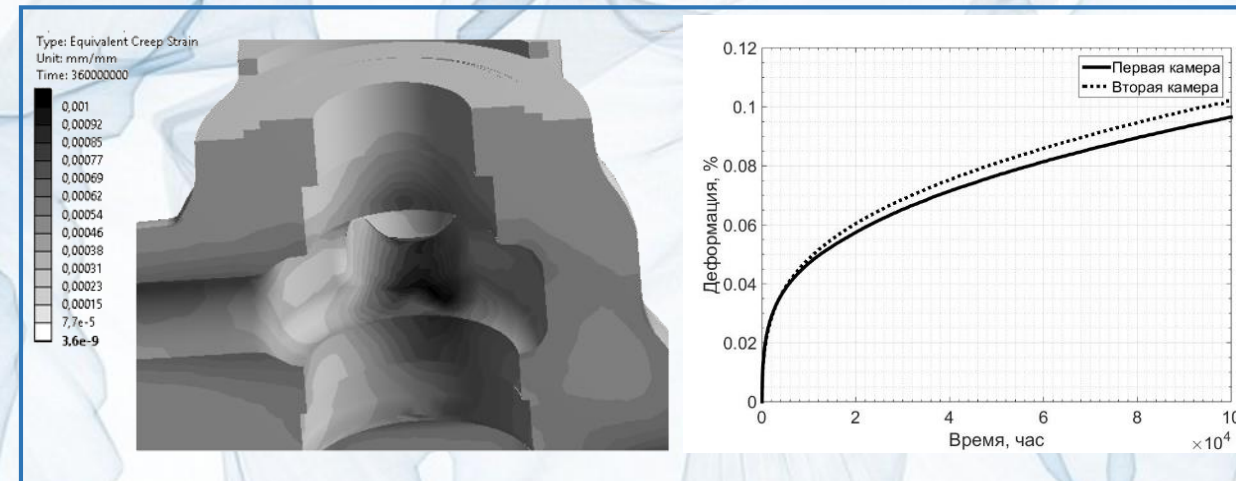
Циліндрична пароприймальна камера



Пароприймальна камера

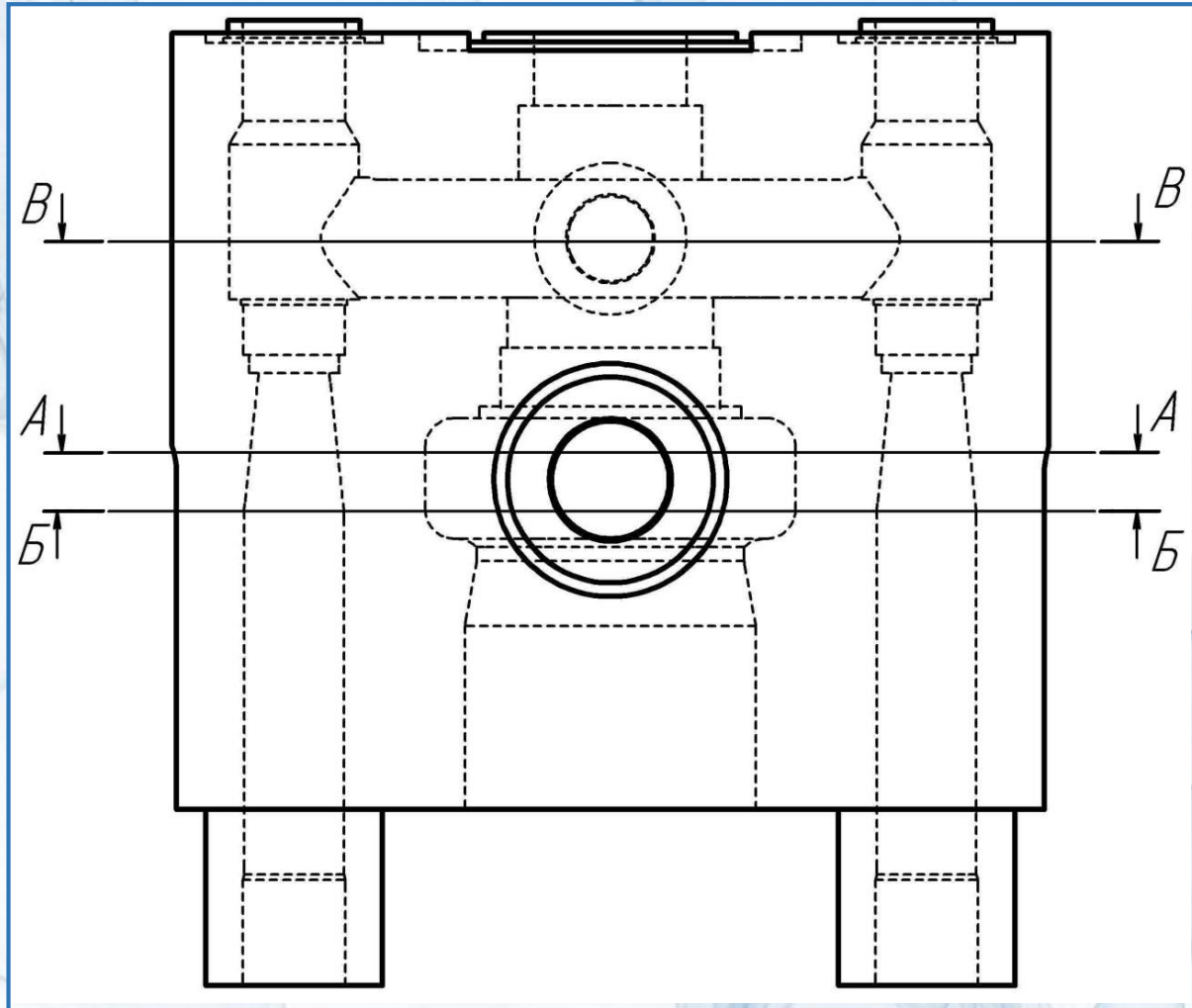


Циліндрична пароприймальна камера з потовщеннями стінок



Перехідні патрубки від паророзподільної камери перед РК1, РК3

Пружний напружено-деформований стан на стаціонарних режимах роботи



Загальний вигляд блоку регулюючих клапанів

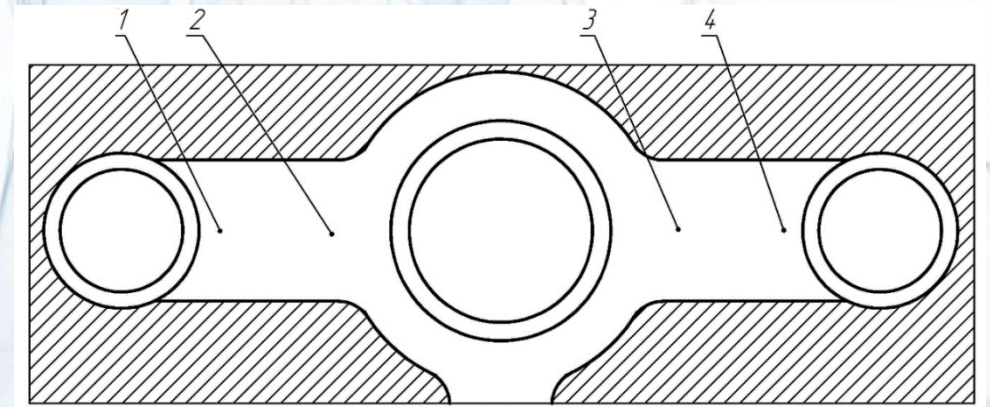
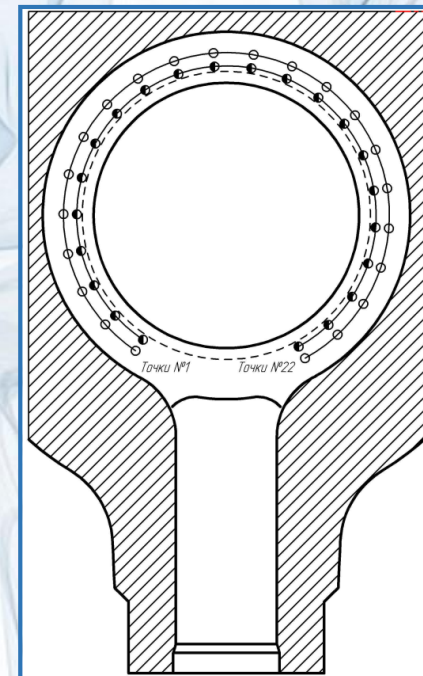
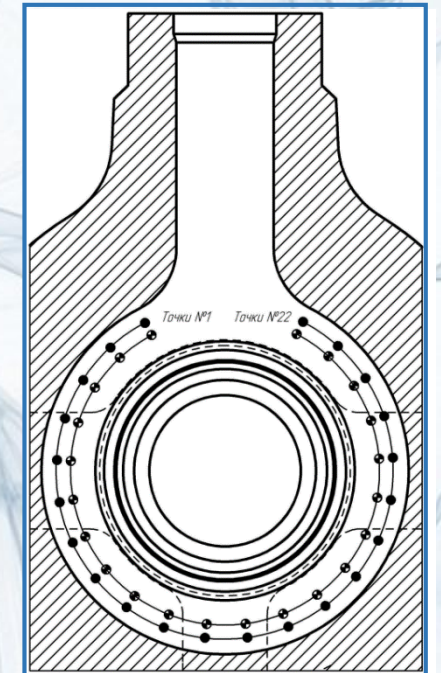


Схема патрубків перед регулюючими клапанами

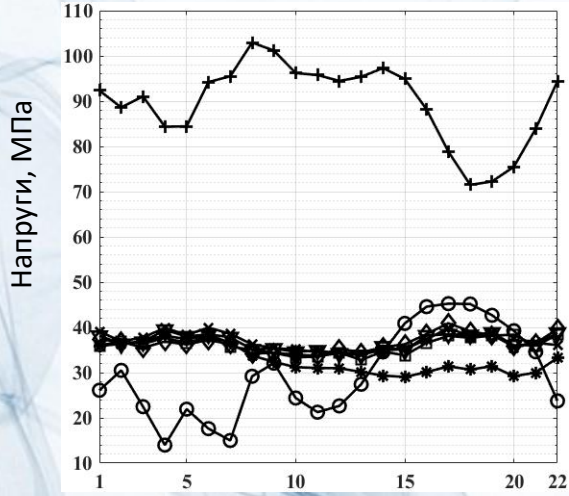


Нижня частина пароприймальної камери

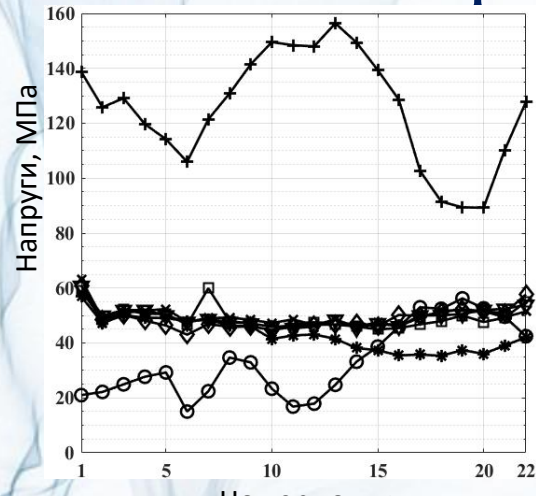


Верхня частина пароприймальної камери

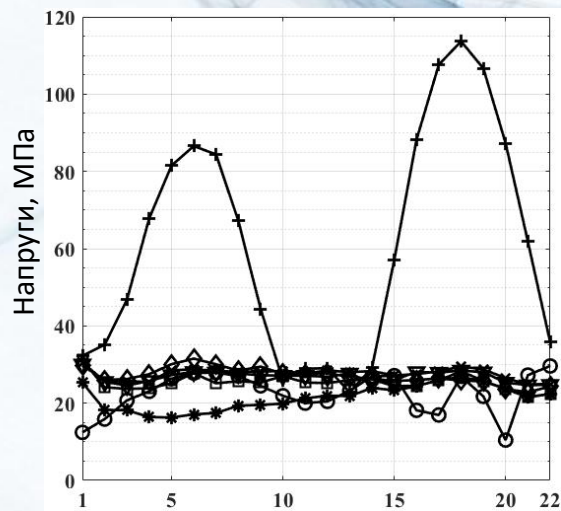
Пружний напружено-деформований стан на стаціонарних режимах роботи



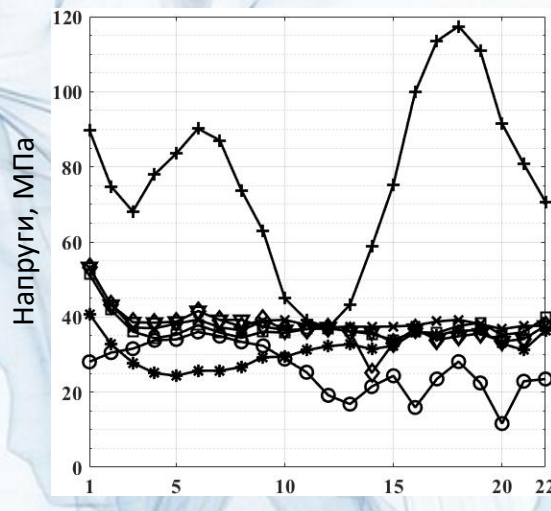
Напруги в 1 контурі



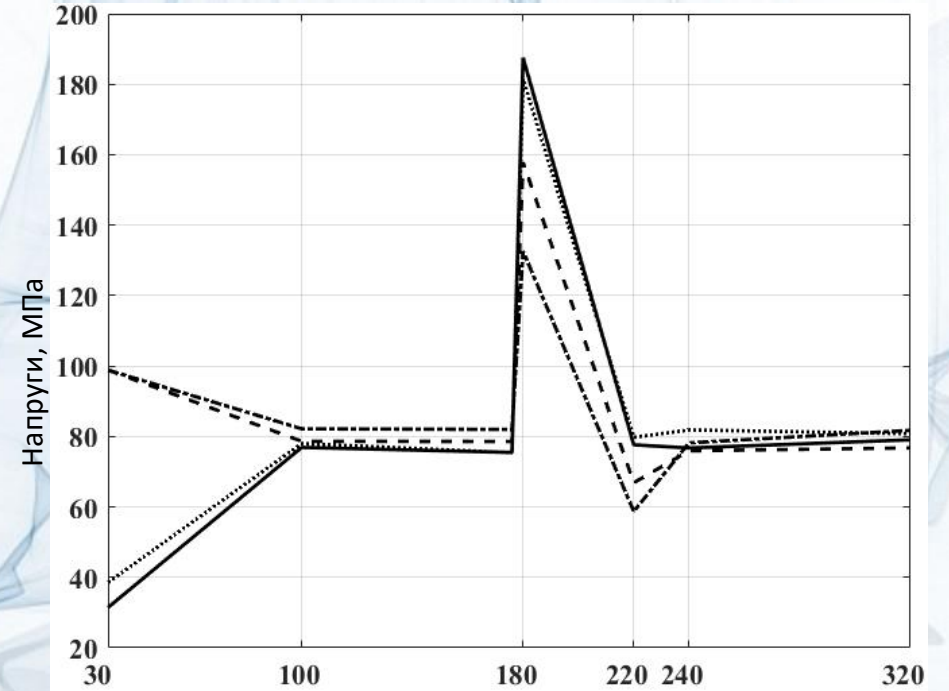
Напруги в 2 контурі



Напруги в 3 контурі



Напруги в 4 контурі



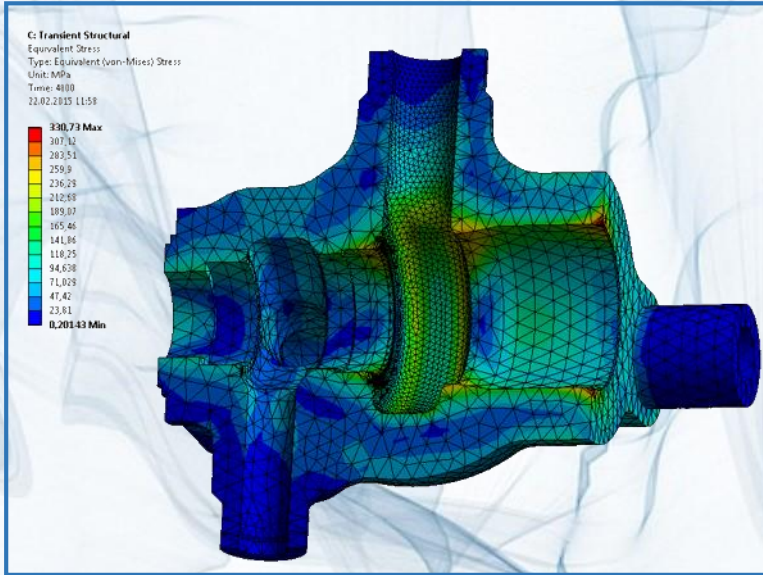
Напруги в точках 1-4

- - 1;
- . - - 2;
- - 3;
- - 4

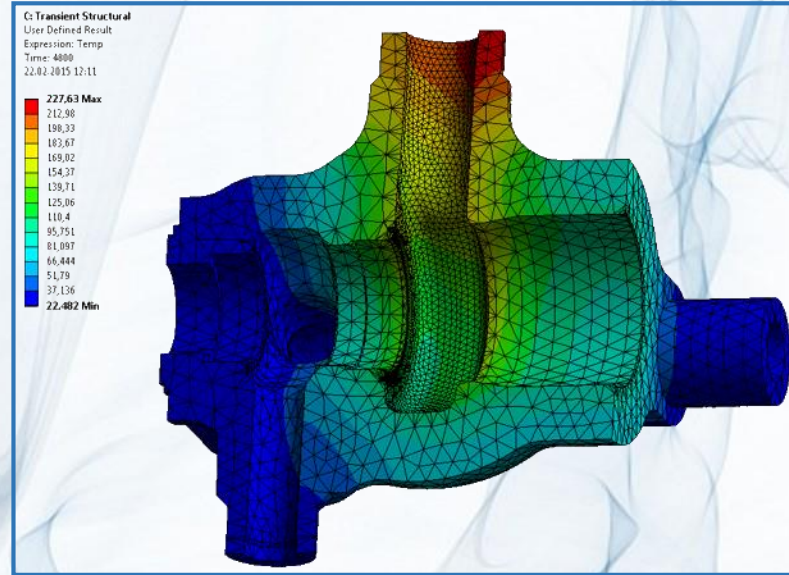
Потужність турбіни:

- - 30МВт;
- ▽ - 100МВт;
- ◇ - 176МВт;
- + - 180МВт;
- * - 220МВт;
- - 240МВт;
- ✕ - 320МВт

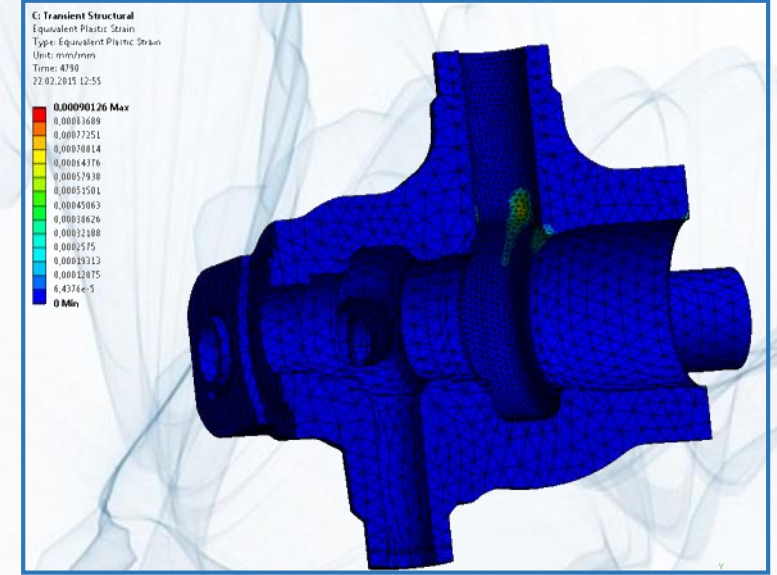
Нестационарний пружно-пластичний стан корпусу клапана під час пуску турбіни з холодного стану



Напруження в корпусі клапана

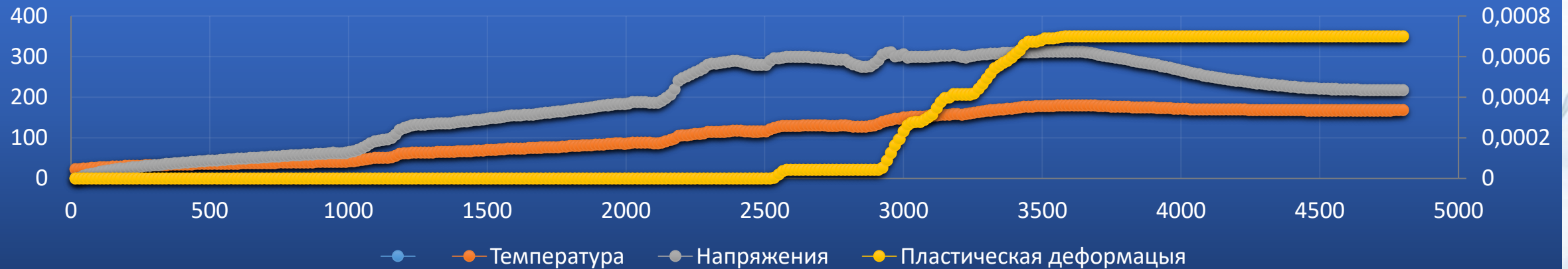


Температура корпусу



Пластичні деформації корпусу

Значення температури, напруги та пластичної деформації



Вперше визначено

- **Значна нерівномірність течії пари в проточній частині регулюючого клапана**
- **Області, в яких утворюються відриви течії і завихрення**
- **Нерівномірності проходження пари через сито**
- **Перегрів сита на 12°C в порівнянні з температурою пари на вході**
- **На сідлах за регулюючими клапанами градієнт температур може становити більш 100°C**
- **При визначенні граничних умов для вирішення завдань міцності на стаціонарних режимах роботи турбіни можна не враховувати теплопровідність через стінки корпусу клапана**
- **Вплив форми пароприймальної камери на розподіл витрати пари через РК1 і РК3**
- **Вплив форми пароприймальної камери на характеристики міцності корпусу**
- **Явище повзучості на стаціонарних режимах роботи не є основним чинником, що викликає утворення тріщин в корпусі клапана**
- **Значні пружні напруги на режимі, що відповідає потужності турбіни 180МВт**
- **Наявність пластичних деформацій в корпусі клапана при пуску турбіни з холодного стану**