



КПІ ім. Ігоря Сікорського
Харківський політехнічний інститут



Оцінка можливості продовження безпечної експлуатації турбоустановки К-1000-60/3000 енергоблоку ЛМЗ після пошкодження ротора ЦВТ

Черноусенко Ольга Юріївна, д.т.н., проф.
Усатий Олександр Павлович, д.т.н., проф.
Пешко Віталій Анатолійович, к.т.н., доц.

Київ 2023

Актуальність дослідження

У ДП НАЕК «Енергоатом» в експлуатації знаходиться 15 енергоблоків АЕС встановленою потужністю 13835 МВт.

Частина турбінного обладнання потужністю 1000 МВт виготовлена на ЛМЗ.

Це Рівненська АЕС №3 введена в експлуатацію в 1986 р, №4 – в 2004 р., Хмельницька АЕС №1 – 1987 р., № 2 – 2004 р., Південноукраїнська АЕС №3 – 1989 р. Всього 5 енергоблоків.

Досвід експлуатації даного обладнання на АЕС України та деяких закордонних АЕС показав наявність конструктивного недоліку кріплення діафрагм 4-го і 5-го ступенів ЦВТ, який може призвести до обриву елементів соплового апарату даних ступенів.

Таким чином, у випадку відриву елементів діафрагми 5-го ступеня ЦВТ турбіни К-1000-60/3000 існує ризик пошкодження проточної частини (ПЧ) турбіни, що призведе до необхідності демонтажу робочих лопаток 5-го ступеня. Можливість продовження експлуатації турбіни К-1000-60/3000 з відповідними пошкодженнями потребує обґрунтування.

Мета, задачі та методи дослідження

Метою роботи є оцінка можливості продовження безпечної експлуатації турбоустановки К-1000-60/3000 енергоблоку АЕС після пошкодження ротора ЦВТ.

Основні завдання, що вирішуються в роботі:

- Дослідження впливу відсутності робочих лопаток 5-го ступеня ротора ЦВТ при наявності діафрагм п'ятого ступеня та без них на газодинамічні характеристики та інтегральні показники якості роботи проточної частини ЦВТ турбіни К-1000-60/3000;
- Виконання повірного розрахунку ресурсних характеристик ротора ЦВТ турбоустановки К-1000-60/3000 щодо допустимості подальшої експлуатації без робочих лопаток 5-го ступеня при різних конструктивних виконаннях ЦВТ.

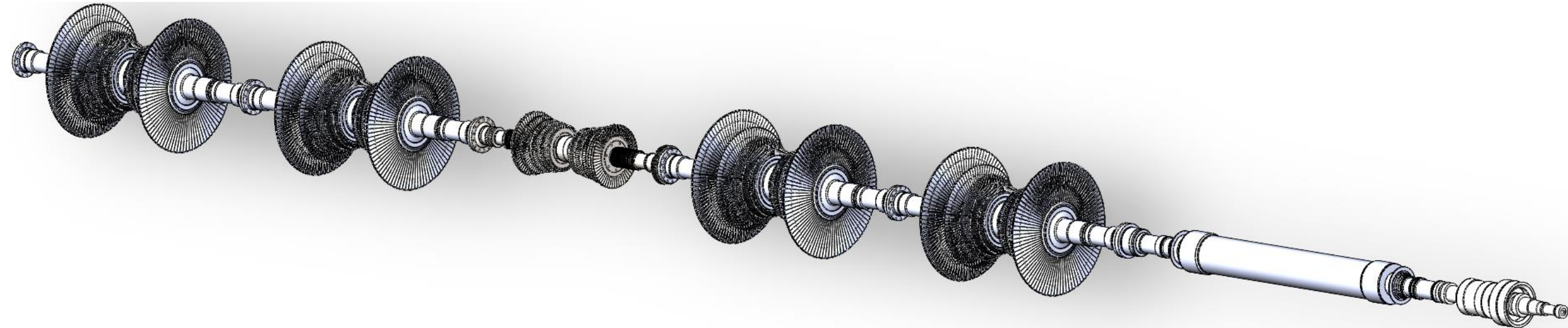
Методи дослідження включають моделі розрахунку проточної частини осьових турбін, числове дослідження теплового та напружено-деформованого станів та накопиченого пошкодження ротора високого тиску парової турбіни К-1000-60/3000 з використанням сучасних методів математичного моделювання, які базуються на основних положеннях гідродинаміки, нестационарної теплопровідності та механіки твердих тіл, з використанням аналітичних методів вирішення задач математичної фізики та розрахункових методів інженерного аналізу.

Циліндр високого тиску турбіни К-1000-60/3000

Турбіна К-1000-60/3000 – конденсаційна, з нерегульованими відборами пари, з проміжною сепарацією вологи і одноступінчастим паровим проміжним перегрівом. Турбіна розрахована для роботи в блоці з реактором типу ВВЕР-1000. Циліндр високого тиску розташований в середній частині турбіни, а циліндри низького тиску – симетрично по обидві сторони ЦВТ (по два ЦНТ з кожної сторони).

Ротор ЦВТ – суцільно кованої та двопоточної конструкції (пара заходить в центрі ЦВТ та симетрично розділяється на два потоки). Ротор має по 5 ступенів в кожному потоці з постійним кореневим діаметром. Робочі лопатки кріпляться до ступенів за допомогою хвостовиків виделкового типу. В кожному зі ступенів наявні 7 розвантажувальних отворів по колу. Також ротор має наскрізний осьовий отвір.

Для зменшення перетоку пари, в зазорах між тілом діафрагми та валом виконані діафрагмові ущільнення. Аналогічно вал обладнаний кінцевими ущільненнями лабіринтового типу для запобігання витoku пари в навколишнє середовище. Матеріал кованої частини ротора – легована сталь 38ХНЗМ1ФА.



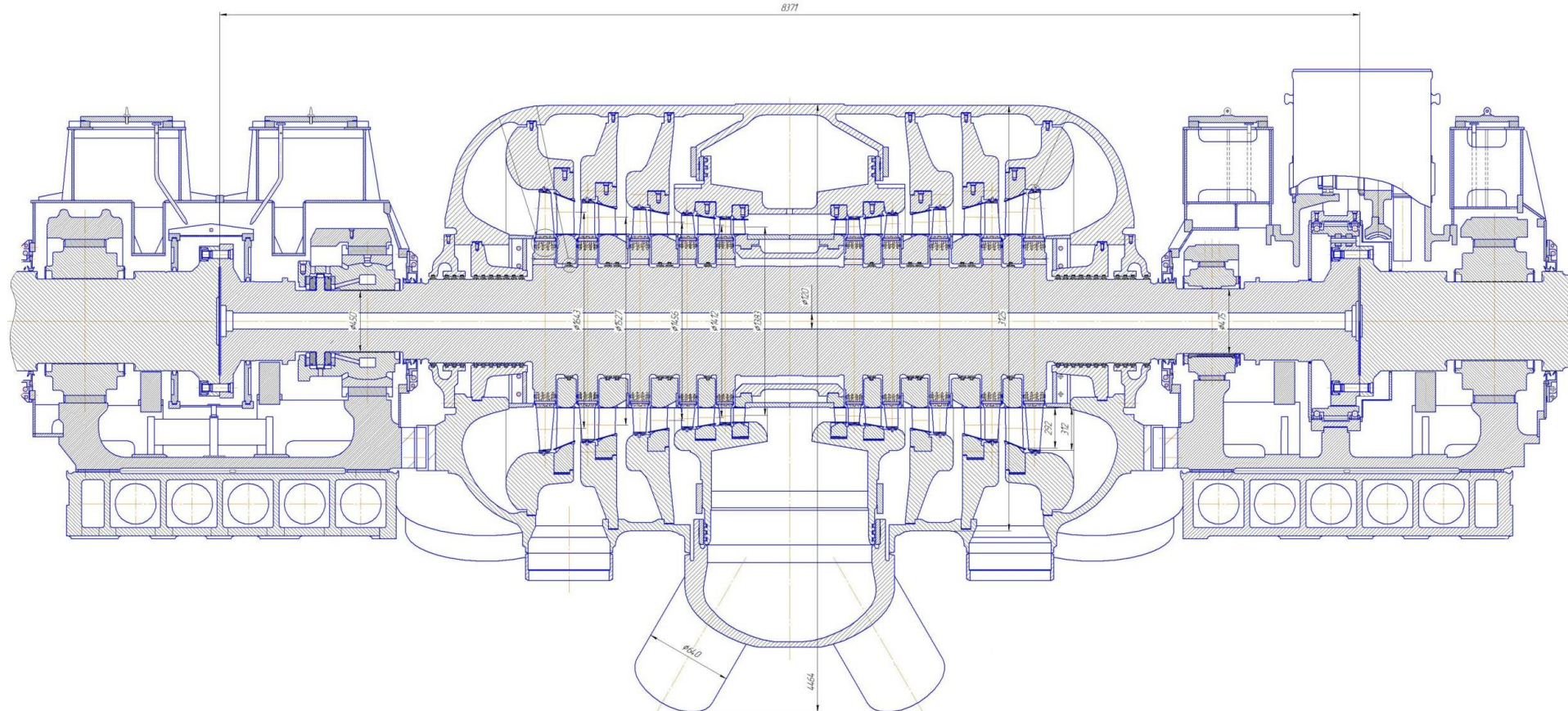
Циліндр високого тиску турбіни К-1000-60/3000

Конструктивне виконання ЦВТ

Проектна конструкція
заводу-виробника

Без робочих лопаток 5-го
ступеня обох потоків, але зі
штатними соплами

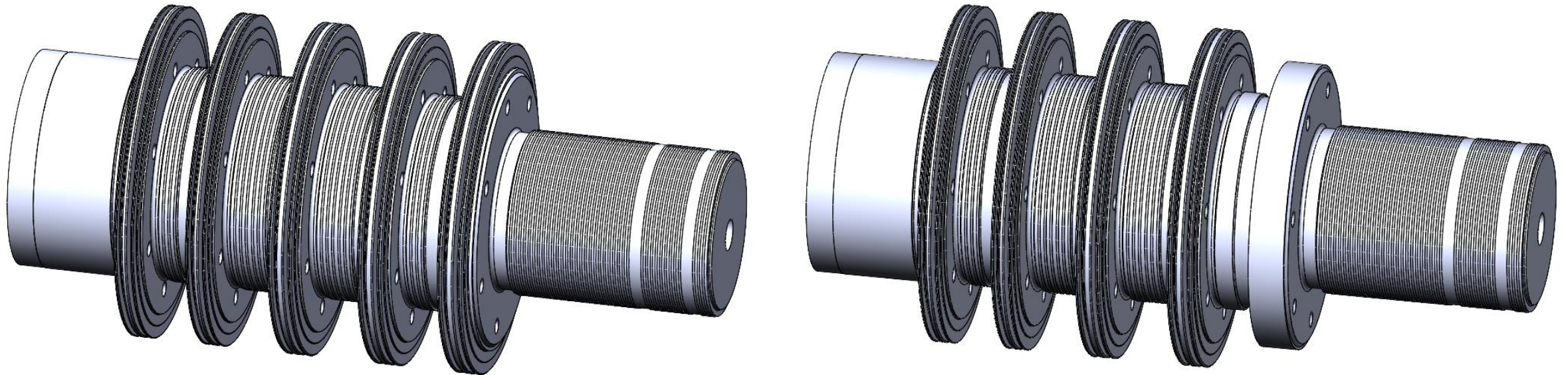
Без всього 5-го ступеня обох
потоків, включаючи
сопловий та робочий апарат



Ротор високого тиску турбіни К-1000-60/3000

Обидва потоки ротора високого тиску працюють в однакових умовах. Тому для потреб даного дослідження пропонується розглянути частину ротора від центральної площини симетрії до останнього сегменту кінцевих ущільнень правого потоку.

Поруч представлено модель ротора з внесеними ремонтними відновленнями після пошкодження. Основними змінами, внесеними в проектну конструкцію, є проточка гребнів хвостових кріплень робочих лопаток 5-го ступеня до їх повного видалення та проточка лабіринтового ущільнення діафрагми 5-го ступеня на валу, зачистка та шліфування торців дисків 5-го і 4-го ступенів, тощо.



Математична модель синтезу проточної частини ЦВТ турбіни К-1000-60/3000

Течію пари в проточній частині турбіни можна описати системою рівнянь, що складається з:

- 1) рівнянь енергії і нерозривності течії в перерізі за нерухомим сопловим апаратом;
- 2) рівнянь енергії і нерозривності течії в перерізі за робочим колесом, що обертається;
- 3) рівнянь процесу і стану для перерізів за сопловою решіткою і за робочим колесом;
- 4) кінематичних співвідношень, що пов'язують кути і швидкості потоку в абсолютному і відносному русі;
- 5) замикаючих співвідношень.

Для прикладу, система рівнянь, що описує течію пари в одному зі ступенів турбіни виглядає наступним чином.

У перерізі за сопловим апаратом рівняння нерозривності з врахуванням рівнянь енергії, процесу і стану має вигляд:

$$G_1 = \rho_1 C_{1z} F_1 = \rho_1 \left(p_1 \left(\bar{h}_0 - \frac{C_1^2}{2\varphi^2}; S_0^*(\bar{p}_0; \bar{h}_0) \right); h_0^* - \frac{C_1^2}{2} \right) C_1 \sin \alpha_1 F_1$$

Математична модель синтезу проточної частини ЦВТ турбіни К-1000-60/3000

Аналогічно, у перерізі за робочою решіткою:

$$G_2 = \rho_2 W_{2z} F_2 = \rho_2 \left(p_2 \left(H + \frac{u^2 - W_2^2}{2\psi^2}; S_1(p_1; h_1) \right); H + \frac{u^2 - W_2^2}{2\psi^2} \right) W_2 \sin \beta_2 F_2$$

Для задачі прямого одновимірного розрахунку в даній постановці, замикаючі співвідношення мають наступний вигляд:

$$p_2 \left(H + \frac{u^2 - W_2^2}{2\psi^2}, S_1^* \right) = p_{2set}$$

Таким чином, отримана система з трьох рівнянь з трьома невідомими G , C_1 , W_2 . Для зручності, отриману систему рівнянь можна записати в символічному вигляді:

$$\Delta_{g1}(G, C_1) = 0; \quad \Delta_{g2}(G, C_1, W_2) = 0; \quad \Delta_h(G, C_1, W_2) = 0$$

Наведена система рівнянь розв'язується чисельно, шляхом мінімізації суми квадратів нев'язок $\Delta_{g1}^2 + \Delta_{g2}^2 + \Delta_h^2$ методом сполучених градієнтів Флетчера-Рівза.

Математична модель дослідження ресурсних показників ротора високого тиску

Розподіл температур в основному металі ротора визначається на основі вирішення крайової задачі нестационарної теплопровідності:

$$\operatorname{div}[\lambda(T) \cdot \operatorname{grad}(T)] = c(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau}$$

Напружено-деформований стан встановлюється на базі рівнянь рівноваги, сумісності деформацій і закону пружності.

Рівняння рівноваги в тензометричній формі:

$$\{\sigma_i\}_j + \rho X_i = 0; \quad i, j = 1, 2, 3; \quad P_i = f(x, y, z, 0);$$

Рівняння сумісності деформацій і закону пружності в матричній формі:

$$\{\varepsilon_{ij}\} = [a]\{\sigma_i\}_j + \{V \cdot \Delta T\}$$

Математична модель дослідження ресурсних показників ротора високого тиску

Допустиме число циклів навантаження при змінних режимах роботи турбіни:

$$N_p = \left[1 - \left| \frac{1,25 \cdot \sigma_s}{\sigma_{l.s.}} \right|^q \right] \cdot \min \left\{ \frac{N_1}{n_N}; N_2 \right\}$$
$$N_{1,2} = \left[\frac{\frac{1}{4} \cdot \ln \frac{100}{100 - \psi_{l.s.}}}{C \cdot \left(n_{1,2} \cdot \varepsilon_{a.r.} + \frac{1 - 2 \cdot \nu}{3 \cdot E} \cdot \sigma_i \right) - \frac{\overline{\sigma_N}}{E}} \right]^{0,6}$$

Амплітуда інтенсивності деформації протягом циклу навантаження:

$$\varepsilon_{a.r.} = \frac{1 + \nu}{1,5 \cdot E} (C \cdot \sigma_a + \min(\sigma_{-1}; \sigma_{l.s.}) - \overline{\sigma_N})$$

Накопичене в основному металі пошкодження:

$$D' = D'_{static} + D'_{cyclic} = \sum_{j=1}^{q'} \frac{t'_j}{t'_{pj}} + \sum_{l=1}^{k'} \frac{n'_l}{N'_{pl}}$$

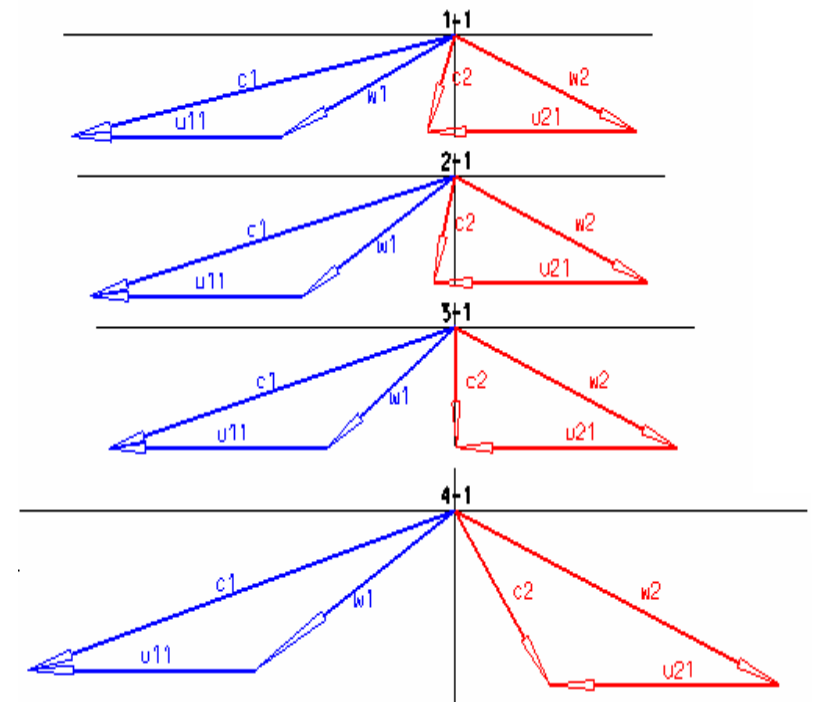
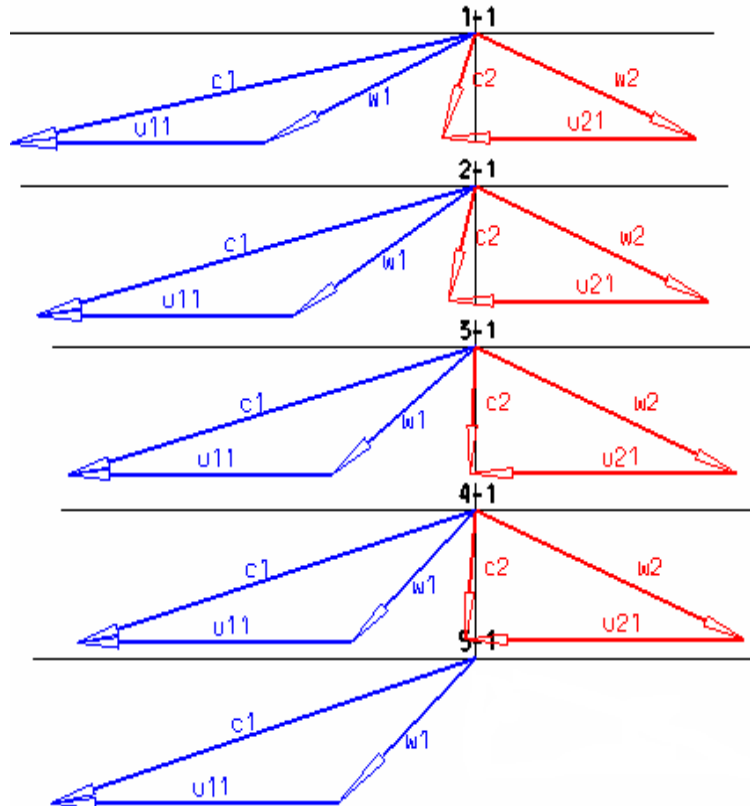
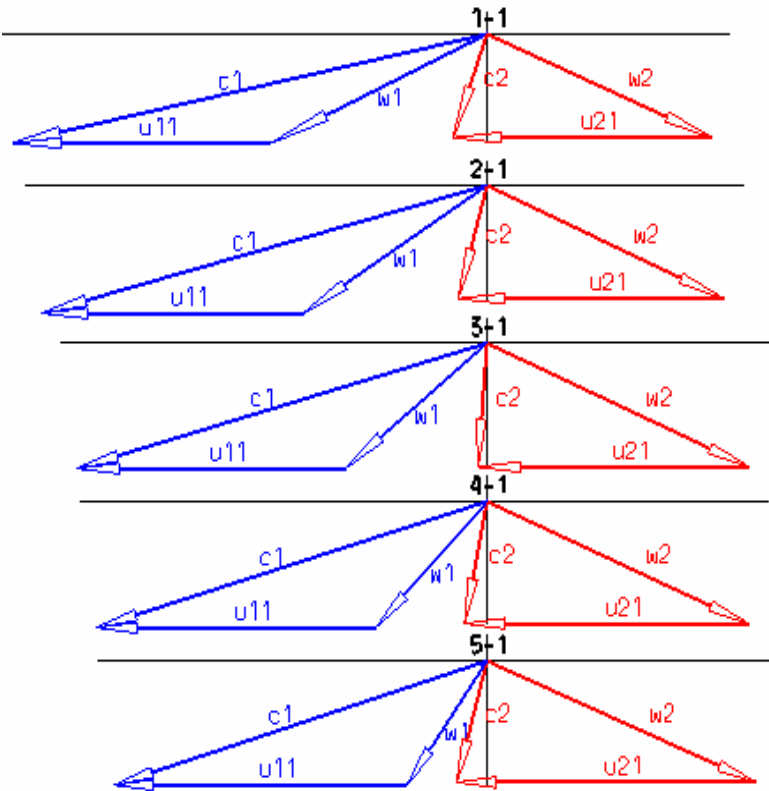
Інтегральні показники якості роботи проточної частини ЦВТ турбіни К-1000-60/3000 при різній конструкції

Трикутники швидкості для ступенів ЦВТ турбіни К-1000-60/3000

Проектна конструкція

Без РЛ 5-го ступеня

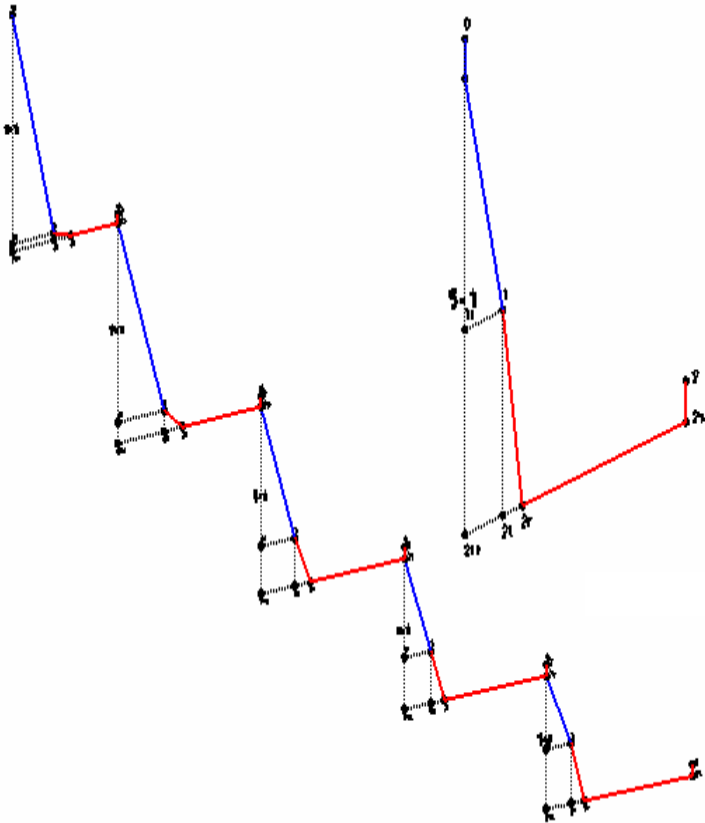
Без всього 5-го ступеня



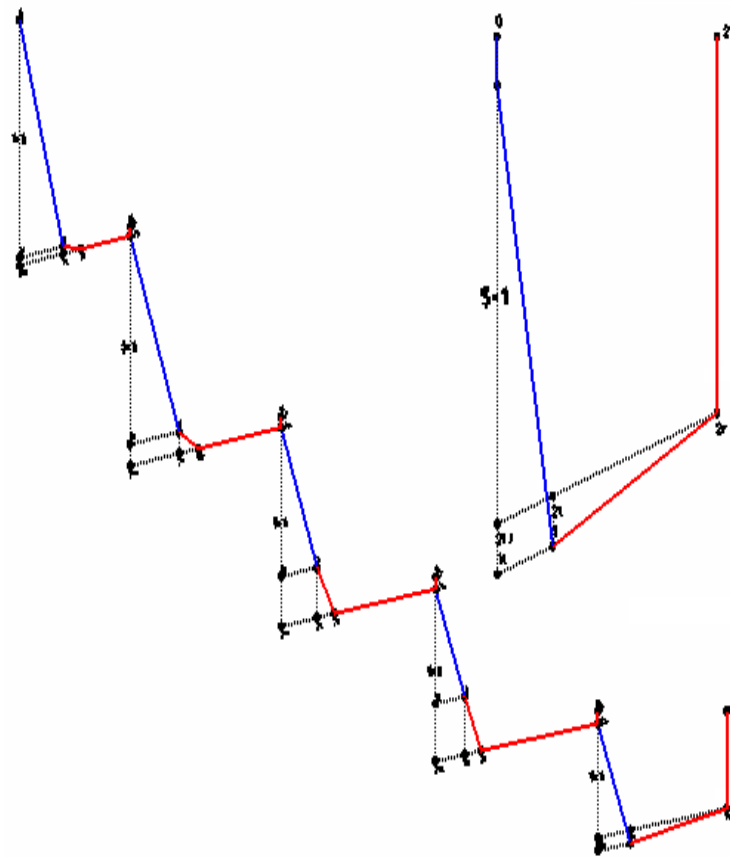
Інтегральні показники якості роботи проточної частини ЦВТ турбіни К-1000-60/3000 при різній конструкції

Процес розширення пари в ЦВТ турбіни К-1000-60/3000

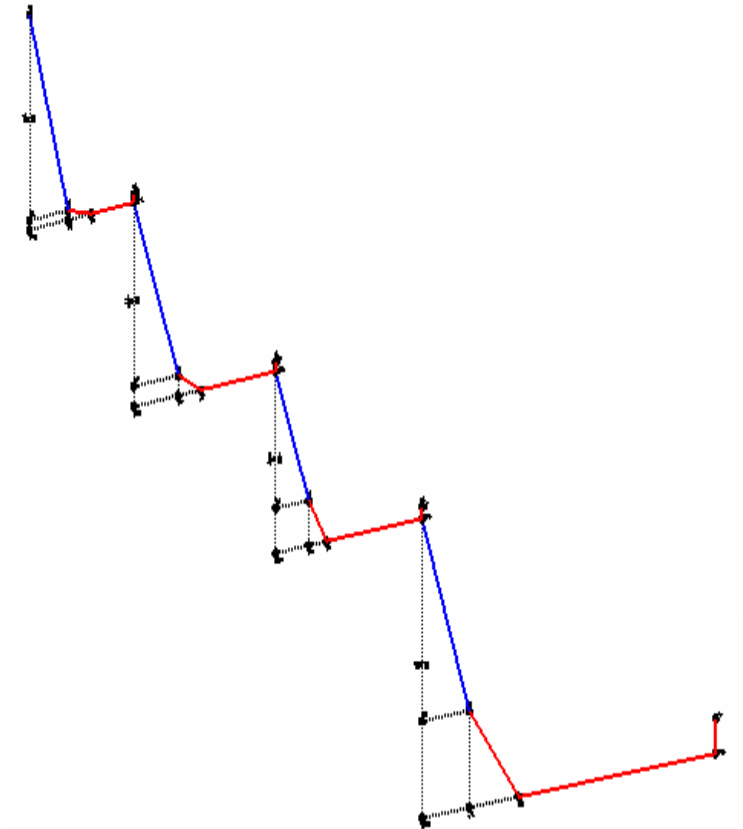
Проектна конструкція



Без РЛ 5-го ступеня

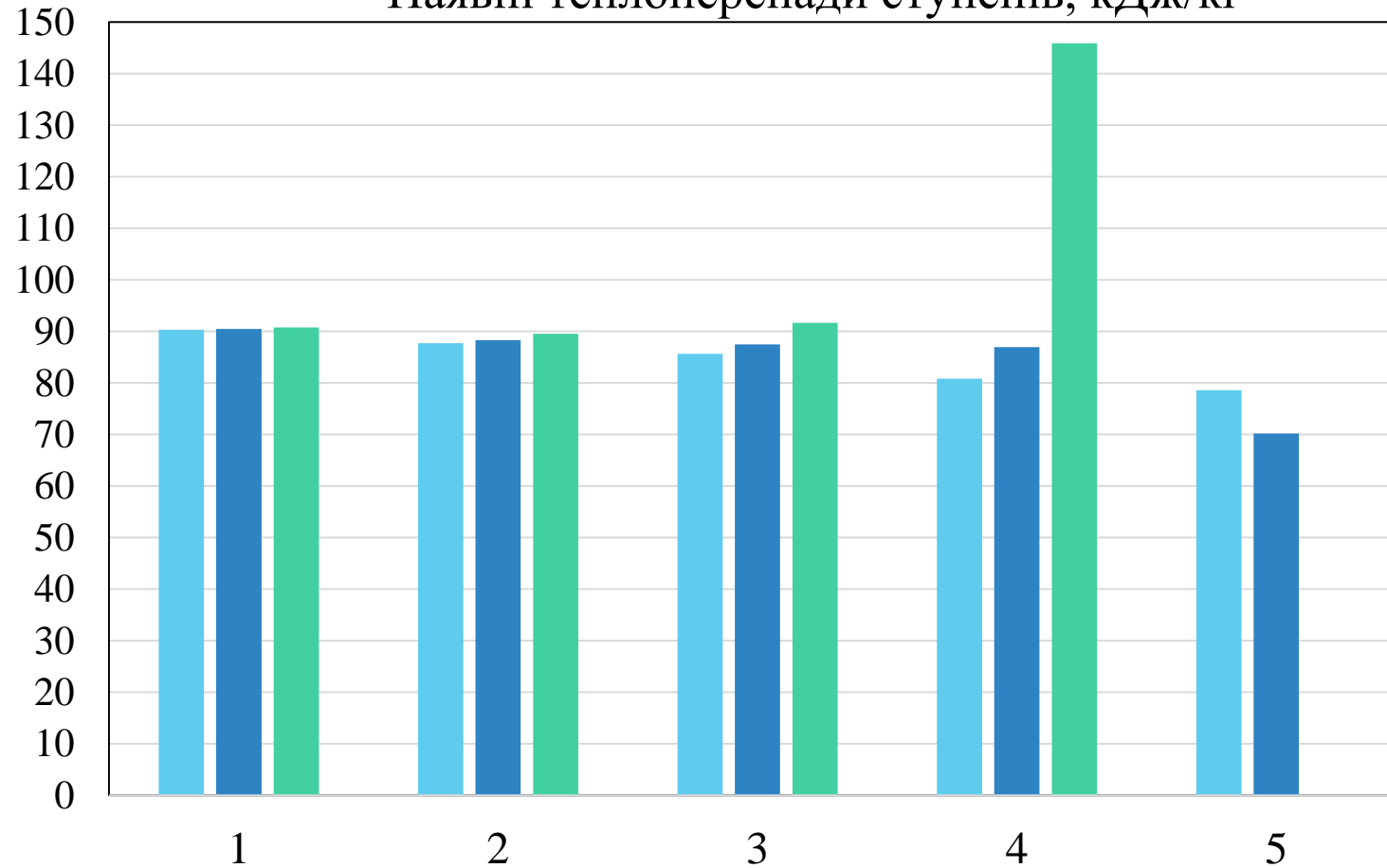


Без всього 5-го ступеня



Інтегральні показники якості роботи проточної частини ЦВТ турбіни К-1000-60/3000 при різній конструкції

Наявні теплоперепади ступенів, кДж/кг



■ Проектна конструкція

■ Без РЛ 5-го ступеня

■ Без всього 5-го ступеня

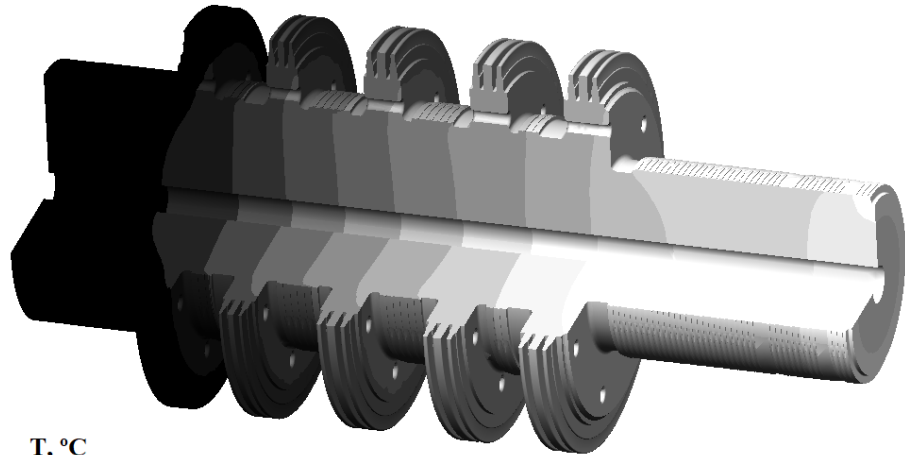
Інтегральні показники якості роботи проточної частини ЦВТ турбіни К-1000-60/3000 при різній конструкції

#	Технічні характеристики	Проектна конструкція ЦВТ	ЦВТ без робочих лопаток 5-го ступеня	ЦВТ без всього 5-го ступеня
1	Тиск пари на вході в ЦВТ, кПа	5737	5737	5737
2	Тиск пари на виході з ЦВТ, кПа	573,7	573,7	573,7
3	Тиск пари у відборі I, кПа	2261	2253	2236
4	Температура гальмування у відборі I, °С	219,8	219,6	219,2
5	Тиск пари у відборі II, кПа	1428	1410	1367
6	Температ. гальмування у відборі II, °С	197,2	196,6	195,2
7	Тиск пари у відборі III, кПа	912,4	871,3	573,7
8	Температ. гальмування у відборі III, °С	177,1	175,2	160,7
9	Тиск пари у відборі IV, кПа	573,7	573,7	573,7
10	Температ. гальмування у відборі IV, °С	157,1	166,4	160,7
11	Внутрішня потужність ЦВТ, МВт	474,12	402,97	460,8
12	Внутрішній відносний ККД, %	77,9	66,1	75,8

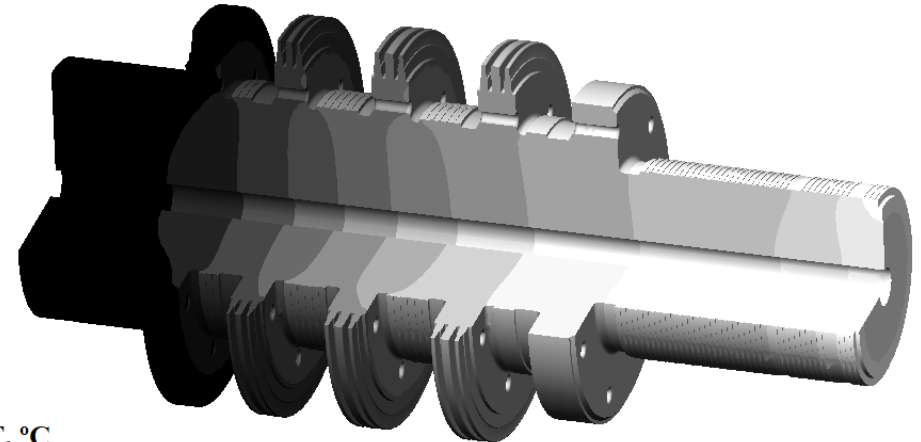
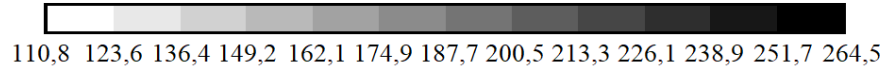
Тепловий стан ротора високого тиску при роботі на номінальній потужності

Без РЛ 5-го ступеня

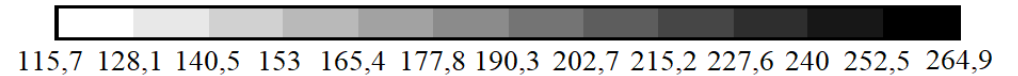
Проектна конструкція



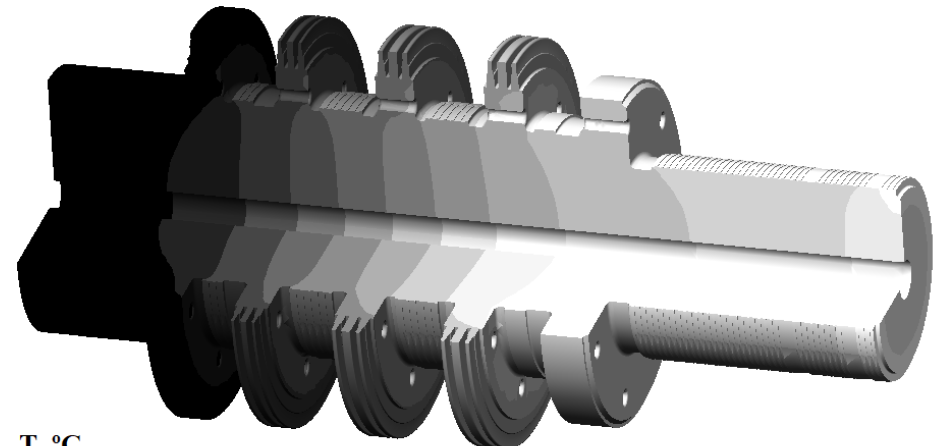
T, °C



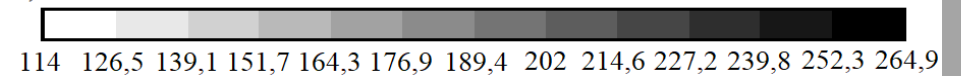
T, °C



Без всього 5-го ступеня



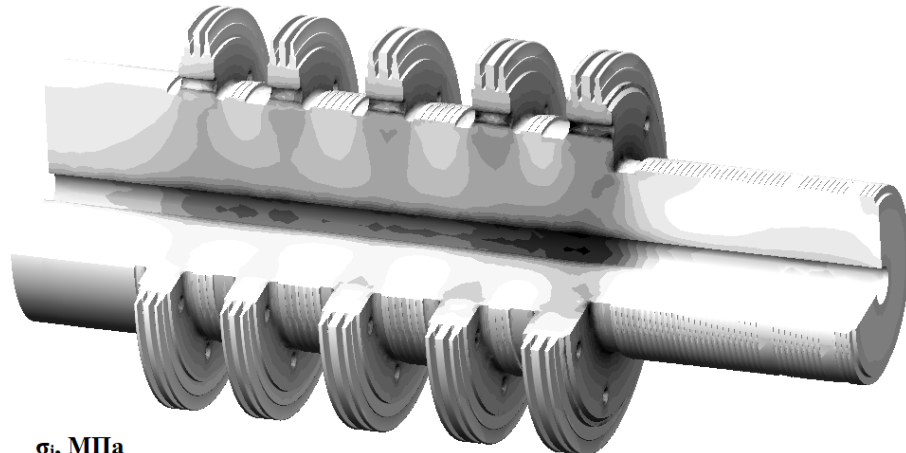
T, °C



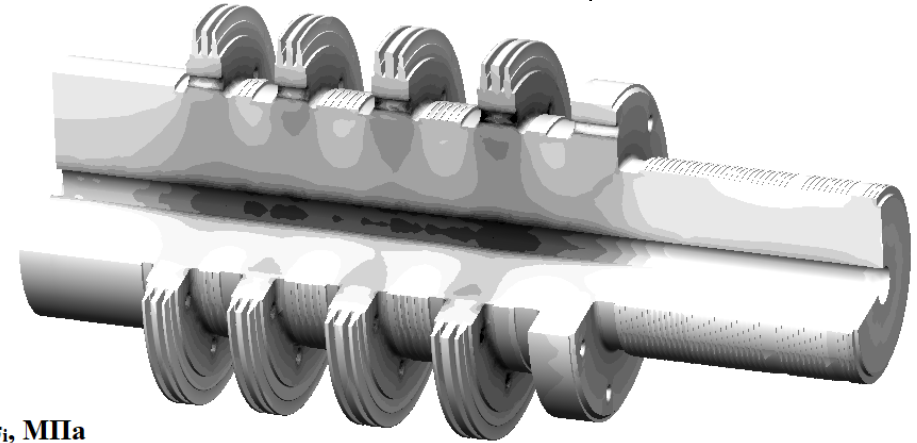
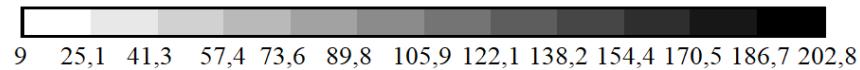
Напружено-деформований стан ротора високого тиску при роботі на номінальній потужності

Без РЛ 5-го ступеня

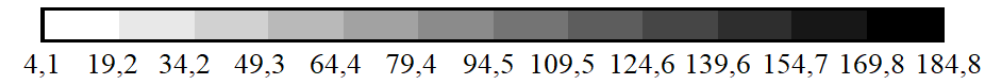
Проектна конструкція



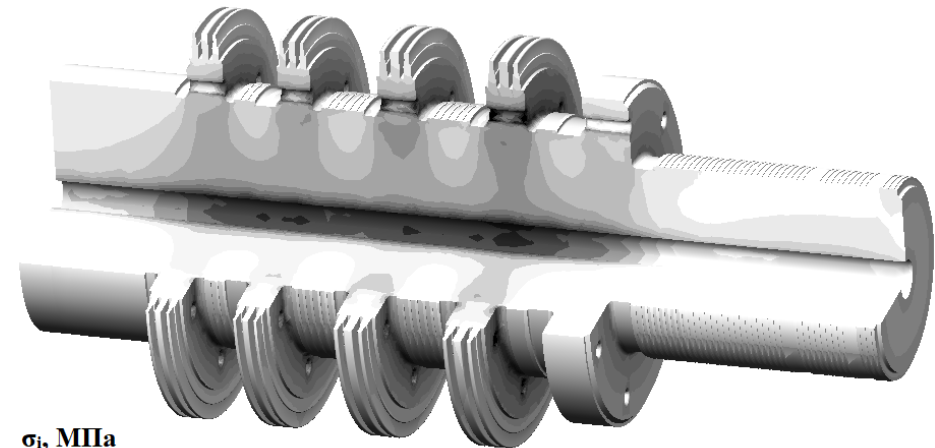
σ_i , МПа



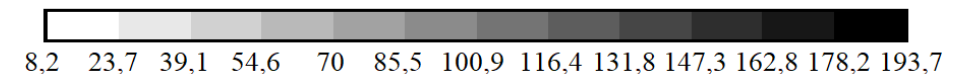
σ_i , МПа



Без всього 5-го ступеня



σ_i , МПа



Ресурсні показники ротора високого тиску турбіни К-1000-60/3000 при різній конструкції

Досліджуваний параметр	Позначення, розмірність	ЦВТ без РЛ 5 ступеня	ЦВТ без всього 5 ступеня
Поточне напрацювання енергоблоку	T , год	113652	
Поточне сумарне число пусків	n	52	
Кількість пусків з гарячого стану металу	$n_{ГС}$	25	
Кількість пусків з холодного стану металу	$n_{ХС}$	27	
Коефіцієнти запасу міцності по числу циклів / по деформаціях	n_N / n_ϵ	10 / 1,5	
Інтенсивність напружень на номінальному режимі роботи	$\sigma_{i\text{ном}}$, МПа	184,8	193,7
Амплітуда інтенсивності напружень при пуску з гарячого стану металу	$\sigma_{a\text{ГС}}$, МПа	155,4	167,1
Амплітуда інтенсивності напружень при пуску з холодного стану металу	$\sigma_{a\text{ХС}}$, МПа	145,95	164,55
Допустимий час роботи металу	$T_{Д}$, год	220000	220000
Допустима кількість пусків з гарячого стану металу	$N_{Д\text{ГС}}$	1061	891
Допустима кількість пусків з холодного стану металу	$N_{Д\text{ХС}}$	1219	1050

Ресурсні показники ротора високого тиску турбіни К-1000-60/3000 при різній конструкції

Досліджуваний параметр	Позначення, розмірність	ЦВТ без РЛ 5 ступеня	ЦВТ без всього 5 ступеня
Поточне напрацювання енергоблоку	T , год	113652	
Поточне сумарне число пусків	n	52	
Кількість пусків з гарячого стану металу	$n_{ГС}$	25	
Кількість пусків з холодного стану металу	$n_{ХС}$	27	
Коефіцієнти запасу міцності по числу циклів / по деформаціях	n_N / n_ϵ	10 / 1,5	
Статичне пошкодження основного металу ротора	$\Pi'_{СТ}$, %	51,66	51,66
Циклічне пошкодження основного металу ротора	$\Pi'_{Ц}$, %	4,57	5,38
Сумарне пошкодження основного металу ротора	Π'_{Σ} , %	56,23	57,04
Індивідуальний залишковий ресурс ротора	$G_{зал}$, год	88400	85600

Висновки

1. Можливість продовження експлуатації ротора високого тиску турбіни К-1000-60/3000 з демонтованими робочими лопатками 5-го ступеня після їхнього пошкодження потребує обґрунтування. Для цього необхідно розглянути вплив відсутності даного робочого апарату на термодинамічні та ресурсні показники роботи турбіни.

2. Розроблено модель проточної частини ЦВТ турбіни К-1000-60/3000 проектної конструкції, без робочих лопаток 5-го ступеня та без всього 5-го ступеня.

3. Встановлено, що відсутність лопаткового апарату 5-го ступеня майже не має впливу на перші три ступеня турбіни та значно змінює параметри пари 4 і 5 ступенів. Такі зміни матимуть негативний вплив на умови функціонування регенеративної схеми енергоблоку, оскільки параметри пари у 3-ому та 4-ому відборі змінюють дуже значно. Зокрема тиск пари у 3-ому відборі зменшується на 5 % при відсутності робочих лопаток 5-го ступеня та на 37 % при відсутності всього 5-го ступеня. Температура гальмування пари перед СПП збільшується на 6 % при відсутності робочих лопаток 5-го ступеня та на 2 % при відсутності всього 5-го ступеня.

4. Внутрішня потужність ЦВТ турбіни проектної конструкції складає 474,12 МВт, без робочих лопаток 5-го ступеня – 402,97 МВт (зменшується на 15 %), без всього ступеня – 460,8 МВт (зменшується на 3 %).

Висновки

5. Розроблено модель розрахунку термонапруженого стану ротора високого тиску. Відмічено зменшення загального рівня напружень в роторі при відсутності робочих лопаток 5-го ступеня та при відсутності всього ступеня на всіх режимах експлуатації. Зокрема на стаціонарному режимі роботи максимум напружень зменшується на 9 % для конструкції ЦВТ без РЛ 5-го ступеня та на 5 % для конструкції без всього 5-го ступеня.

6. Як наслідок збільшується допустиме число циклів навантаження ротора та підвищується опірність до накопичення пошкодження в основному металі за статичними та циклічними механізмами. Сумарне пошкодження основного металу ротора високого тиску турбіни К-1000-60/3000 без робочих лопаток 5-го ступеня складає 56,2 % та 57 % - без всього 5-го ступеня. Таким чином, згідно до вимог нормативного документу СОУ-Н МЕН 40.1-21677681-52:2011 «Визначення розрахункового ресурсу та оцінки живучості роторів та корпусних деталей турбін» стан ротора високого тиску є задовільним та може бути допущений до подальшої експлуатації з повторним уточненням ресурсних показників через 50 тис. год експлуатації.