

УДК 621.165

**О. Г. КНАБЕ**, канд. техн. наук; доц. «УПА», Харків;  
**М. М. НЕЧУЙВІТЕР**, канд. техн. наук, с.н.с.; доц. «УПА», Харків;  
**І. Г. ШЕЛЕПОВ**, канд. техн. наук; проф. «УПА», Харків

## ДОЦІЛЬНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ЗВОРОТНОГО ФОРМУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНОЇ НЕРІВНОМІРНОСТІ ДЛЯ РОЗ'ЄМНИХ КОРПУСІВ ЦИЛІНДРІВ ПАРОВИХ ТУРБІН

У статті розглянута проблема енергетики України – підвищення економічності, маневреності, надійності електростанцій відносно продовження строку експлуатації теплоенергетичного встаткування енергетичних блоків (парових турбін), що перебувають в експлуатації, а також виявлення можливостей енергозберігаючих режимів з метою підвищення їх технічної ефективності. Визначено критерій забезпечення стабільності застосування методу зворотного формування температурної нерівномірності в пускових режимах парових турбін з різних теплових станів без обігріву фланців і шпильок і з обігрівом фланців і шпильок по відповідних програмах керування, а також його доцільність.

**Ключові слова:** парова турбіна, корпус циліндра парової турбіни, розкриття горизонтальних роз'ємів, управління тепловим станом, пускова мобільність.

### Вступ

Виявлення енергозберігаючих ресурсів, можливостей підвищення технічної ефективності елементів існуючих парових турбін, турбоустановок є основним напрямом досліджень однієї з актуальних проблем сучасної енергетики України – це підвищення економічності, маневреності, надійності, продовження терміну експлуатації теплоенергетичного оснащення існуючих енергетичних блоків.

Аналіз основних досягнень та літератури

Накопичений досвід удосконалення конструктивних рішень та експлуатації парових турбін на зверх критичні параметри пари на прикладі реконструйованого енергоблоку потужністю 300 МВт [1] з паровою турбіною ХТГЗ показав, що проектна потужність турбіни навіть після її реконструкції (остання дозволила підвищити технічну ефективність турбоустановки: внутрішній відносний коефіцієнт корисної дії турбіни, ККД, на 14,7 %) не досягає до проектної потужності фактично 15 МВт, а внутрішній відносний ККД циліндра низького тиску (ЦНТ) парової турбіни на 4 % нижчий розрахункового.

Для парових турбін, котрі працюють на зверх критичних та високих параметрах, при експлуатації їх в пускових режимах, режимах змінних навантажень з метою забезпечення вимог з економічності, маневреності, надійності, необхідним є застосування перспективних методів управління їх тепловим станом, прогнозування та підтримання щільності горизонтального розкриття зовнішніх, внутрішніх корпусів циліндрів. Останнє пов'язано з низкою вузлів парової турбіни, котрі стримують швидкість пускових операцій, тим самим знижують розрахункову економічність проточної частини, маневреність, надійність, пускову мобільність.

Перспективним методом управління тепловим станом корпусів циліндрів парових турбін для вирішення вищезазначеної задачі є застосування методу зворотного формування температурної нерівномірності (ЗФТН) роз'ємних корпусів циліндрів, так як при цьому досягається розрахункова економічність проточної частини турбіни, маневреність, надійність, пускова мобільність на низці вузлів турбіни. Останній вимагає забезпечення та виконання комплексу умов: для вузлів турбін, що експлуатува-

© О.Г. Кнабе, М.М. Нечуйвітер, І.Г. Шелепов, 2014

лись – відновлення концентричності вузла турбіни (правка з установкою кріплення, наплавлення, проточка); вирішення питань нового затягнення кріплення роз'єму та відносного розширення ротора турбіни; вирішення конструктивних особливостей установки болтів на фланці кріплення роз'єму; дотримання низки технологічних умов – вибору термодинамічних (температурного перепаду, коефіцієнтів тепловіддачі), параметрів, визначення стаціонарних та нестаціонарних температурних полів вузлів турбіни, зони застосування ЗФТН; постійного контролю концентричності вузлів турбіни після застосування ЗФТН; оцінки напруженості вузлів турбіни при електричному навантаженні  $N_e = 0$  МВт; для вузлів турбін, що виконуються для нових турбін – спрощення конструкції турбіни та вибору матеріалу для виготовлення вузлів корпусів турбіни.

**Мета дослідження, постановка задачі**

Метою даної статті є розкриття можливостей збільшення внутрішнього відносного ККД парової турбіни до розрахункового шляхом застосування методу зворотного формування температурної нерівномірності (ЗФТН).

Задачі дослідження: виявлення критерію стійкості при ЗФТН; визначення закону зміни розрахункової величини зазорів в проточній частині.

**Матеріали дослідження**

Аналіз розрахункових досліджень [1] показав наступне:

1) У циліндрі турбіни (див. рис. 1), що відповідає 2–5 ступеням з внутрішнім радіусом  $r_1$  (500 мм) та зовнішнім радіусом  $r_2$  (800 мм), у стані внутрішнього тиску середовища (пари)  $p_1$ ,  $[p_1 = \varphi_1(r_1, l)]$  з температурою  $T_1$ ,  $[T_1 = \vartheta_1(r_1, l)]$  та постійного зовнішнього тиску  $p_2 = c_1$  з постійною температурою  $T_2 = c_2$ , температурний перепад в стінці внутрішнього тиску – це середня температура зовнішньої поверхні ступені, має залежність по ступеням  $\Delta T_{2-5} = 204, 184, 164, 144$  °С, тобто спостерігається постійна величина зменшення температури пари по ступеням на 20 °С.

2) Сумарні тангенціальні напруження від різниці тисків на стінку корпусу циліндра високого тиску та температурних тангенціальних напружень при лінійному законі зміни температури по радіусу циліндра при номінальному навантаженні  $N_e = 300$  МВт – це  $[\sigma_\Theta]_{r_1}^{\Delta p+t'}$ ,  $[\sigma_\Theta]_{r_2}^{\Delta p+t'}$  та тангенціальні напруження після застосування зворотного формування температурної нерівномірності при номінальному навантаженні  $N_e = 300$  МВт – це  $[\sigma_\Theta]_{r_1}^f$ ,  $[\sigma_\Theta]_{r_2}^f$ , наприкладі, (див. рис. 2) дозволяють фіксувати, що їх різниці  $\Delta_1 = \{[\sigma_\Theta]_{r_1}^{\Delta p+t'} - [\sigma_\Theta]_{r_1}^f\}$ , та  $\Delta_2 = \{[\sigma_\Theta]_{r_2}^{\Delta p+t'} - [\sigma_\Theta]_{r_2}^f\}$  наближені до сталої величини, значення котрих представлені в табл. 1.

При вирішенні питань з підвищення маневрених характеристик парових турбін, на прикладі системи обігріву фланців та шпильок зовнішнього корпусу ЦВТ при застосуванні режиму ЗФТН, при задаванні до пуску, шляхом нагріву зі сторони фланців, температурного перепаду по ширині фланців  $\Delta T = T_1 - T_2 \approx 50$  °С (див. рис. 3) через 44 години після пуску при номінальному електричному навантаженні 300 МВт перепад температур становитиме по ширині фланцю (20–25) °С.

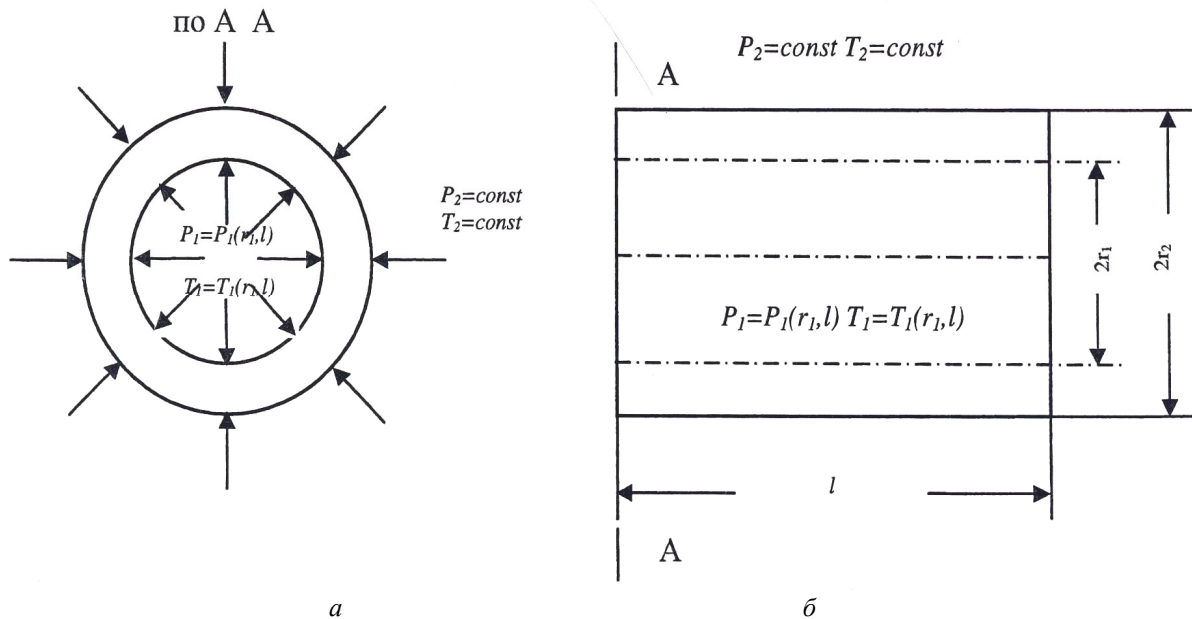


Рис. 1 – Циліндр з внутрішнім радіусом  $r_1$  та зовнішнім  $r_2$  радіусам:  
а – напрям підводу пари з тиском  $p_1$  та температурою  $T_1$ ;  
б – напрям підводу пари з параметрами  $p_1$ ,  $T_1$  у вісьовій проекції

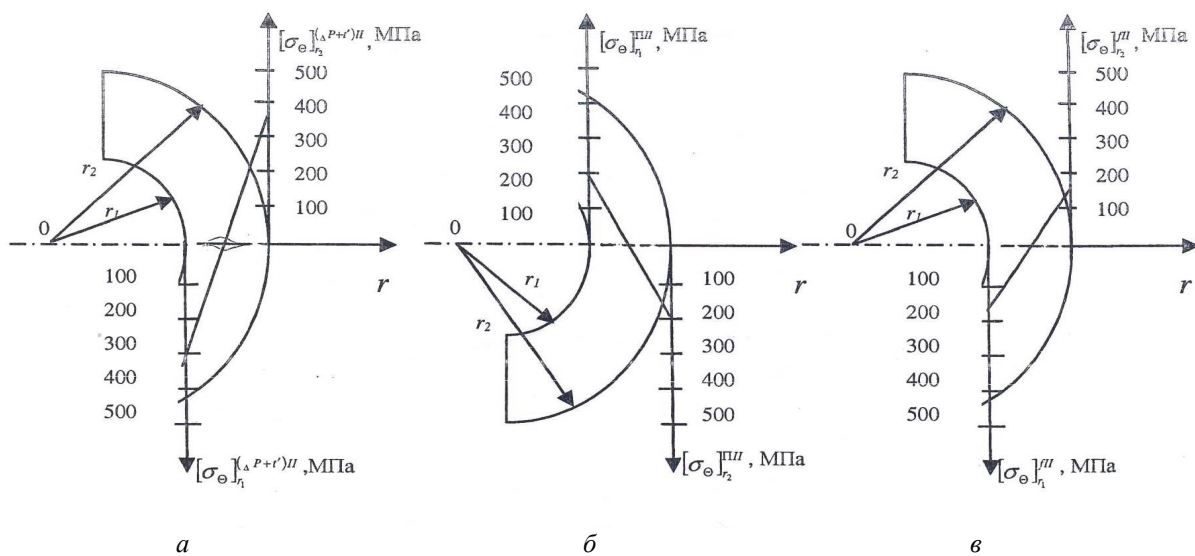


Рис. 2 – Тангенціальні сумарні напруження внутрішнього корпусу ЦВТ в зоні 2-го ступеня після застосування ЗФТН при навантаженні  $N_e = 300$  МВт:  
а – сумарні тангенціальні напруження в зоні 2-го ступеня до ЗФТН (на роз'ємі показана щілина протікання пари при  $N_e = 300$  МВт); б – температурні тангенціальні напруження в зоні 2-го ступеня при застосуванні ЗФТН та при  $N_e = 0$  МВт; в – сумарні тангенціальні напруження в зоні 2-го ступеня після застосування ЗФТН при  $N_e = 300$  МВт

### Результати дослідження

Аналіз даних температурних перепадів  $\Delta t_1$ ,  $\Delta t_2$ ,  $\Delta t_{3,2}$ ,  $\Delta t_{44}$  по відносній ширині фланцю із застосуванням ЗФТН та без обігріву фланців, шпильок в періоди 1; 2; 3,2; 44 години після пуску (див. рис. 4) свідчить про доцільність застосування ЗФТН при умові розробки програми ЗФТН для пусків турбіни з різних теплових станів.

Дані температурних перепадів  $\Delta t_1'$ ,  $\Delta t_2'$ ,  $\Delta t_{3,2}'$ ,  $\Delta t_{44}'$  по відносній ширині

фланцю із застосуванням ЗФТН, з обігрівом фланців та шпильок в періоди 1; 2; 3,2; 44 години після пуску, свідчать про доцільність управління тепловим станом корпусів турбін методом зворотного формування температурної нерівномірності, ЗФТН, (див. рис. 5), із застосуванням удосконалених сумісних програм ЗФТН з обігрівом фланців та шпильок при пусках турбіни з різних теплових станів.

Таблиця 1

Тангенціальні напруження 2–5 ступенів внутрішнього корпусу ЦВТ  
в загальноприйнятому режимі та режимі ЗФТН при  $N_e = 300$  МВт

Номер ступеня внутрішнього корпусу ЦВТ	Сумарні тангенціальні напруження		Тангенціальні напруження із застосуванням ЗФТН		Різниці сумарних тангенціальних напружень та тангенціальних напружень після застосування ЗФТН	
	$[\sigma_\Theta]_{r_1}^{\Delta p+t'}$ , МПа	$[\sigma_\Theta]_{r_2}^{\Delta p+t'}$ , МПа	$[\sigma_\Theta]_{r_1}^f$ , МПа	$[\sigma_\Theta]_{r_2}^f$ , МПа	$\Delta_1$ , МПа	$\Delta_2$ , МПа
2	-354,00	338,60	-139,00	133,10	-215,00	205,50
3	-322,07	303,30	-105,78	101,17	-216,29	202,13
4	-288,50	251,98	-72,720	69,550	-215,78	182,43
5	-254,86	235,66	-36,660	37,940	-218,20	197,72

В табл. 2 представлені значення температурних перепадів по відносній ширині фланцю із застосуванням ЗФТН без обігріву та з обігрівом фланців та шпильок.

Таблиця 2

Розрахункові значення температурних перепадів по відносній ширині фланцю  
із застосуванням ЗФТН без обігріву та з обігрівом фланців та шпильок

Відносна ширина фланцю, $\bar{\delta}$	Температурні перепади $\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_{3,2}, \Delta t_{44}$ , °С по відносній ширині фланцю із застосуванням ЗФТН та без обігріву фланців, шпильок в періоди 1; 2; 3,2; 44 години після пуску (випадок 1, див. рис. 2в,а)				Температурні перепади $\Delta t_1', \Delta t_2', \Delta t_{3,2}', \Delta t_{44}'$ , °С по відносній ширині фланцю із застосуванням ЗФТН та з обігрівом фланців та шпильок в періоди 1; 2; 3,2; 44 години після пуску (випадок 2, див. рис. 2в,б)			
	1 год.	2 год.	3,2 год.	44 год.	1 год.	2 год.	3,2 год.	44 год.
1,00	20	45	40	75	0	5	-40	15
0,66	0	20	45	50	5	15	0	10
0,33	-10	-15	25	25	-10	5	0	10
0	-25	-15	0	10	-25	5	0	0

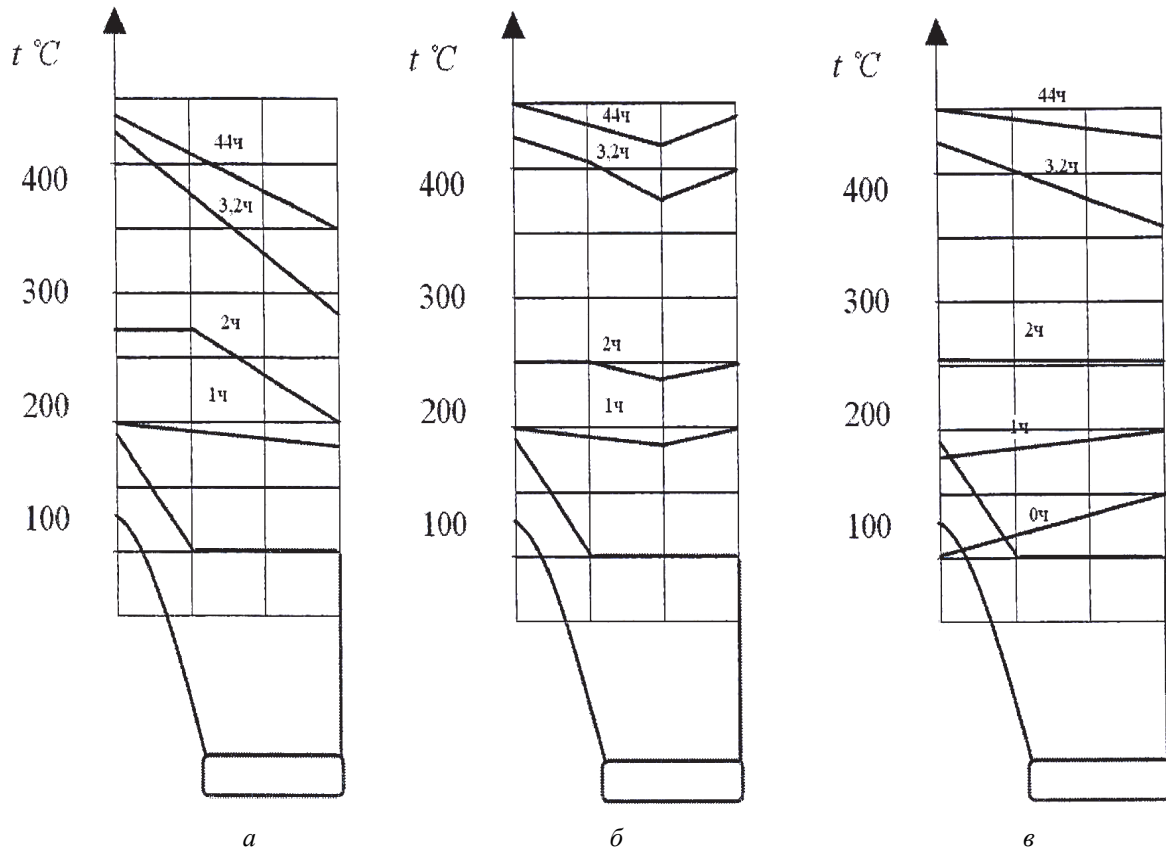


Рис. 3 – Графік зміни температур по ширині фланцю турбіни  
 а – без обігріву фланців та шпильок; б – з обігрівом фланців та шпильок;  
 в – без обігріву фланців та шпильок із застосуванням ЗФТН при  $\Delta T = T_1 - T_2 \approx 50^\circ \text{C}$

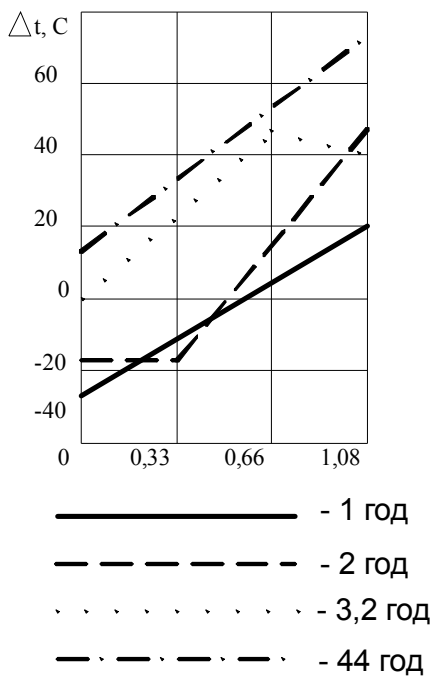


Рис. 4 – Розподіл температурних перепадів по ширині фланцю (випадок 1, див. рис. 2в,а) – із застосуванням ЗФТН та без обігріву фланців

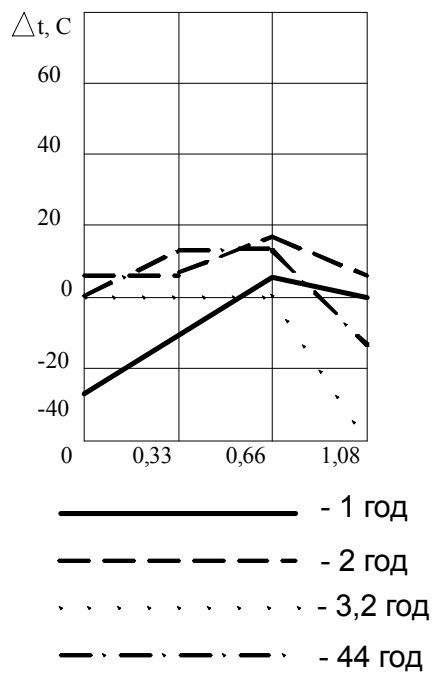


Рис. 5 – Розподіл температурних перепадів по ширині фланцю (випадок 2, див. рис. 2в,б) – із застосуванням ЗФТН та з обігрівом фланців та шпильок

**Висновки**

1) Стабільність ЗФТН на ступенях 2–5 ЦВТ забезпечується підтриманням постійної різниці сумарних тангенціальних напружень від різниці тисків на стінку корпусу ЦВТ, температурних тангенціальних напружень при лінійному законі зміни температури по радіусу циліндра та тангенціальних напружень після застосування зворотного формування температурної нерівномірності.

2) Доцільним є застосування ЗФТН: без обігріву фланців, шпильок в періоди 1; 2; 3,2; 44 години після пуску при умові розробки програми ЗФТН при пусках турбіни з різних теплових станів; з обігрівом фланців та шпильок при удосконалених сумісних програмах при пусках турбіни з різних теплових станів.

**Список літератури:** 1. Кнабе А. Г. Способ повышения экономичности и маневренности разъемных корпусов турбин на высокие параметры пара [Текст] / А. Г. Кнабе // Проблемы машиностроения. – 2010. – Т. 13, № 6. – С. 3–8.

**Bibliography (transliterated):** 1. Knabe, A. G. "Sposob povysheniya jekonomichnosti i manevrennosti raz#emnyh korpusov turbin na vysokie parametry para." *Problemy mashinostroeniya* 13.6 (2010): 3–8. Print.

*Надійшла (received) 15.02.2014*