

УДК 621

doi:10.20998/2413-4295.2020.04.07

**ВДОСКОНАЛЕННЯ ЦИЛІНДРА ВИСОКОГО ТИСКУ ТУРБИНИ
K-1000-60/1500-2 БЛ. №4 БАЛАКОВСЬКОЇ АЕС****I. А. ПАЛЬКОВ¹, С. А. ПАЛЬКОВ¹, О. І. ЩЕНКО¹, О. П. АВДЄЄВА²**¹АТ «Турбоатом», м. Харків, УКРАЇНА²кафедра турбінобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, УКРАЇНА
*e-mail: igorpalkov@i.ua

АНОТАЦІЯ Підвищення потужності енергоблоків атомних станцій є світовою тенденцією та широко реалізується в країнах Європи та Сполучених шатах Америки. Зазвичай роботи з підвищення потужності блоків атомних станцій проводяться під час планових реконструкцій. Особливостями такої реконструкції є часткова заміна обладнання, що у порівнянні з повною дає значну економію ресурсів. Використання такого підходу дозволяє частково замінити елементи проточної частини, що в свою чергу виконується з метою для забезпечення необхідних параметрів течії в проточній частині турбомашини, а також дозволяє повторно використовувати не модифіковані елементи конструкції. Ця стаття містить узагальнення досвіду АТ «Турбоатом» з проведення вдосконалення циліндру високого тиску, а також розглядаються конструктивні особливості проекту модернізації турбоустановки K-1000-60/1500-2 блоку 4 Балаковської АЕС виробництва ПАТ «Турбоатом». В рамках проекту модернізації АТ «Турбоатом» виконав комплекс теплових і міцнісних розрахунків ЦВТ турбіни K-1000-60/1500-2 з урахуванням підвищення теплової потужності реактора до 3210 МВт з використанням існуючих деталей і вузлів. Прийняті конструкторські і схемні рішення в проекті модернізації турбоустановці K-1000-60/1500-2 бл. 4 Балаковської АЕС і високий ступінь уніфікації її елементів, відпрацьованих і освоєних у виготовленні і експлуатації на станціях, сприяють підвищенню якості її технічного обслуговування і ремонтів, дозволяють вважати, що ця турбоустановки матиме високі техніко-економічні показники, а також забезпечують її високу конкурентоспроможність на зовнішньому ринку. Удосконалена проточна частина ЦВТ оснащена розвиненою системою видалення вологи. Відведення вологи з міжвінцевих зазорів здійснюється системою дренажних отворів в надбандажних козирках діафрагм. Волога з межступеневих зазорів відводиться в камери видалення вологи за робочими лопатками. Ефективність видалення вологи за робочими лопатками забезпечується конічним меридіональним обводом робочих лопаток і вологосборними канавками на бандажах робочих лопаток. Розрахункова величина збільшення електричної потужності турбоустановки K-1000-60/1500-2 бл. 4 Балаковської АЕС при підвищенні теплової потужності реактора до 3210 МВт становить 52,56 МВт.

Ключові слова: атомна енергетика; реакторна установка; турбоустановки; модернізація; підвищення потужності**IMPROVEMENT OF THE HIGH PRESSURE CYLINDER OF THE TURBINE
K-1000-60/1500-2 OF THE BALAKOVO NPP 4-th BLOCK****I. PALKOV^{1*}, S. PALKOV¹, O. ISHCENKO¹, O. AVDIEIEVA²**¹JSC "Turboatom", Kharkiv, UKRAINE²Department of turbine construction, National technical university "Kharkiv technical institute", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT Increasing the capacity of nuclear power plants is a global trend and is widely implemented in Europe and the United States. Usually, work to increase the capacity of nuclear power units is carried out during planned reconstructions. Features of such reconstruction are partial replacement of the equipment that in comparison with full gives considerable economy of resources. The use of this approach allows partially replacing the elements of the flow part, which in turn is performed in order to provide the necessary flow parameters in the flow part of the turbomachine, and also allows reusing unmodified structural elements. This article summarizes the experience of JSC "Turboatom" in improving the high pressure cylinder, as well as the design features of the project to modernize the turbine K-1000-60 / 1500-2 unit 4 Balakovo NPP produced by JSC "Turboatom". As part of the modernization project, JSC "Turboatom" performed a set of thermal and strength calculations of the HPC of the turbine K-1000-60 / 1500-2, taking into account the increase in thermal capacity of the reactor to 3210 MW using existing parts and assemblies. The design and circuit decisions in the project of modernization of the turbine K-1000-60 / 1500-2 4-th block Balakovo NPP and a high degree of unification of its elements, worked out and mastered in the manufacture and operation of stations, improve the quality of its maintenance and repairs, allow us to believe that this turbine will have high technical and economic performance, as well as ensure its high competitiveness on the outside market. The advanced flowing part of HPC is equipped with the developed system of removal of moisture. Moisture removal from the intercrown gaps is carried out by a system of drainage holes in the diaphragm visors. Moisture from the interstage gaps is discharged into the moisture removal chamber behind the blades. The efficiency of moisture removal behind the blades is provided by a conical meridional circumference of the blades and moisture-collecting grooves on the bandages of the blades. The estimated value of the increase in electric power of the turbine K-1000-60 / 1500-2 4-th block Balakovo NPP with increasing the thermal capacity of the reactor to 3210 MW is 52.56 MW.

Keywords: nuclear power; reactor plant; turbine plants; modernization; power increase**Вступ**

Підвищення потужності енергоблоків вже стало загальносвітовою тенденцією, а «піонерами» в

реалізації програми були атомні станції США. У 1997 році Комітетом ядерного регулювання була збільшена потужність 110 реакторів на 4700 МВт, при цьому на

декількох АЕС потужність збільшена на 20%. Перший дозвіл на реалізацію програми було отримано в 1998 році. Вже до 2006 року в США за рахунок приросту потужності на діючих енергоблоках було досягнуто додаткове вироблення, у порівнянні з роботою чотирьох додаткових енергоблоків.

АТ «Турбоатом» за роки свого існування виробило багато турбін для різних країн світу. Тому коли постало питання підвищення їх ефективності завод разом з провідними науковцями у галузі турбінобудування реалізувало проект удосконалення циліндра високого тиску турбіни К-220-44-2М АЕС «Ловііса» [1-3] в Фінляндії, де експлуатується ВВЕР-440.

Там практично відразу приступили до їх модернізації і довели теплову потужність до рівня 109,1%. Аналогічні програми реалізовані на АЕС «Пакш» в Угорщині, з підвищенням теплової потужності до 108%, на АЕС «Богуніце» в Словаччині – до рівня 104%, на АЕС «Моховце» в Словаччині – до рівня 107%. Дуже багато робіт у світі присвячено дослідженням вчених з підвищення ефективності турбін [4-9].

Програмою розвитку атомної енергетики більшості країн до 2030 року передбачено введення потужностей до 60 ГВт зі збільшенням частки атомної енергетики у виробленні електроенергії приблизно до 33%.

В даний час атомна енергетика залишається важливим фактором розвитку світової економіки і є надійним і економічно вигідним способом забезпечення електроенергією. Збереження і нарощування виробництва електроенергії атомно-енергетичною галуззю забезпечується будівництвом нових енергоблоків АЕС і підвищенням віддачі і продовженням терміну експлуатації діючих енергоблоків.

Другий напрямок, забезпечує модернізацією діючих енергоблоків, рівносильно будівництву нових, але обходиться істотно дешевше. Тому в сучасних складних економічних умовах воно є важливою складовою подальшого розвитку атомно-енергетичного комплексу та стало загальносвітовою практикою.

Сьогодні, розроблена і реалізується програма ступеневого підвищення потужності реакторів типу ВВЕР в початковому періоді до 104, 107, 110, 112% за рахунок зміни функціонування обладнання без його глибокої модернізації.

Останнім часом на АЕС впроваджувалися роботи по підвищенню теплової потужності серійних реакторів ВВЕР-1000 до 3120 МВт (104%) на існуючих енергоблоках (Балаковская АЕС, Калінінська АЕС, Ростовська АЕС), а також на АЕС «Козлодуй», Болгарія.

Підвищення електричної потужності блоків АЕС при форсуванні теплової потужності реакторної установки (РУ) можливо при відповідній оптимізації роботи неядерних складових АЕС, зокрема

турбоустановок. Це пов'язано з необхідністю модернізації турбоустановок для узгодження з підвищенням паропродуктивності РУ при забезпеченні її ККД і надійності на сучасному рівні, так як збільшення цих показників прямо веде до збільшення електричної потужності і річного виробітку електроенергії і, відповідно, до зниження питомих капіталовкладень.

Відповідно до технічних умов ТУ 108.1055-82 «Турбіна парова К-1000-60/1500-2» номінальна потужність турбіни складає 1114 МВт при витраті свіжої пари 6430 т/год, і відповідна теплова потужність реактора – 3200 МВт [10].

При цьому 1 ступінь ЦВТ турбіни має довжини напрямних і робочих лопаток відповідно 98 мм і 104 мм, а їх площі прохідних перетинів становлять 1342 см² і 2220 см².

У зв'язку з наявним обмеженням теплової потужності величиною 3000 МВт, АТ «Турбоатом» в турбінах К-1000-60/1500-2 виконав заміну 1-го ступеня ЦВТ для приведення у відповідність пропускної здатності турбіни до фактичної паропродуктивності парогенераторів, збільшення спрацьованого теплоперепаду і підвищення електричної потужності. При цьому довжини напрямних і робочих лопаток були зменшені відповідно до 75 мм і 82 мм, а їх площі прохідних перетинів становить 1068 см² і 1595 см².

По випробуваннях «Южтехенерго» на енергоблоці ст.№4 Запорізької АЕС при незмінній теплової потужності реактора 3000 МВт за рахунок зазначеної модернізації 1 ступеня ЦВТ підвищення електричної потужності склало 21 МВт. При цьому запас по пропускній здатності проточної частини вийшов мінімальним, і практично не дозволяв реалізувати роботу енергоблоку при підвищенні теплової потужності реактора понад 3000 МВт [11].

При підвищенні теплової потужності реактора до 3120 МВт збільшується витрата свіжої пари і необхідно було збільшення пропускної здатності проточної частини турбіни.

Це забезпечувалося за рахунок заміни соплових апаратів і робочих лопаток 1 ступеня ЦВТ (збоку регулятора і сторони генератора) на нові, зі збільшеними площами прохідних перетинів.

Модернізовані соплові апарати і робочі лопатки 1 ступеня ЦВТ встановлювалися в існуючий ЦВТ без змін корпусів і роторів. При цьому довжини нових напрямних і робочих лопаток виконані з їх попередньою довжиною (98 мм і 104 мм), а їх площі прохідних перетинів (1136 см² і 1889 см²) прийняті з забезпеченням мінімальних втрат в СРК турбіни (~ 3%) при збереженні номінальних параметрів свіжого пару (60 кгс/см² абс. і вологість 0,5%).

Розрахункова величина збільшення електричної потужності турбоустановки К-1000-60/1500-2 при підвищенні теплової потужності реактора до 3120 МВт становить 38,7 МВт.

Зазначена модернізація була виконана на всіх працюючих блоках АЕС з турбінами К-1000-60/1500-2 виробництва АТ «Турбоатом».

Для блоків 3 і 4 Ростовської АЕС була поставлена задача доведення номінальної електричної потужності блоків до 1100 МВт при збереженні досягнутої теплової потужності реактора $Q_r = 3120$ МВт (104%). Це було досягнуто за рахунок перепрофілювання проточної частини ЦВТ, з заміною робочих лопаток 1-7 ступенів, направляючого апарату і діафрагм 2-7 ступенів обох потоків, при збереженні корпусу ЦВТ і ротора. Розрахункова величина збільшення електричної потужності турбоустановки К-1100-60/1500-2М при підвищенні теплової потужності реактора до 3120 МВт і при новій проточній частині ЦВТ становить ~ 10 МВт, при цьому фактичне значення склало ~ 13 МВт.

Роботи з підвищення теплової потужності РУ ВВЕР-1000 до 104% від номінальної стали основою для проведення подальших досліджень.

В даний час розглянута принципова можливість і економічна доцільність поетапного підвищення потужності блоків АЕС з ВВЕР-1000 до рівня 107% (3210 МВт) від номінальної. Обрано референтний блок №4 Балаковської АЕС, з подальшим поширенням накопиченого досвіду на інші діючі блоки АЕС.

Атомна електростанція Балаковская АЕС укомплектована чотирма турбінами другої модифікації К-1000-60/1500-2, зданими в експлуатацію в період між 1985-1993г.г. Від турбін першої модифікації турбіни другої модифікації відрізняються відсутністю циліндру середнього тиску, збільшеною кількістю ступенів з 5-ти до 7-ми в циліндрі низького тиску та підвальним розташуванням конденсаторів.

З урахуванням досягнутого рівня підвищення теплової потужності РУ Балаковської АЕС АТ «Турбоатом» розробив проект модернізації ЦВТ.

Модернізація проточної частини ЦВТ, аналогічна запропонованій, виконана в 2011-2012 рр. на раніше виготовленій турбіні з переоблопаченням ЦВТ на блоці №3 Ростовської АЕС, яка була введена в експлуатацію в грудні 2014 р., а також в 2014 р. при виготовленні нового ЦВТ турбіни для блоку №4 Ростовської АЕС, що знаходилась на монтажі та була заплановано введення в експлуатацію в грудні 2017р.

Мета роботи

Метою роботи є узагальнення досвіду з проектування та модернізації турбін для підвищення ефективності роботи станцій та збільшення видобутку електричної енергії.

Основні положення модернізації

В рамках проекту модернізації АТ «Турбоатом» виконав комплекс теплових розрахунків та розрахунків на міцність ЦВТ турбіни К-1100-60/1500-2 з урахуванням підвищення теплової потужності реактора до 3210 МВт з використанням існуючих деталей та вузлів.

В якості вихідних даних при модернізації ЦВТ турбіни К-1000-60 / 1500-2 блок №4 Балаковської АЕС, приймалися такі положення:

- збереження початкових параметрів пари;
- збереження конструктивної схеми турбіни і її допоміжного устаткування, фундаменту;
- збереження структурної схеми турбоустановки і теплообмінного обладнання;
- збереження існуючого зовнішнього корпусу і ротора ЦВТ.

Для забезпечення пропуску збільшеного витрати пара була виконана модернізація проточної частини 1-7 ступенів ЦВТ зі збереженням внутрішнього корпусу і обійм діафрагм, а також з використанням резервного ротора високого тиску, що знаходиться на Балаковській АЕС, попередньо облопаченого, проточеного і відбалансованого на АТ «Турбоатом». Передбачається, що демонтований ротор після переоблопачування з остаточної механообробкою і балансуванням може бути використаний при модернізації на черговому енергоблоці №2 Балаковської АЕС.

Роботи з демонтажу існуючих робочих лопаток і облопачування ротора з остаточної механообробкою і балансуванням виконувалися в умовах АТ «Турбоатом», що дозволило забезпечити високу точність зборки, міцність і вібраційну надійність при експлуатації.

При модернізації були замінені тільки робочі лопатки і діафрагми 1-7 ступенів (боку регулятора і сторони генератора).

Основними факторами, що забезпечують ефективність і експлуатаційну надійність зазначеної модернізації, є [12]:

- відповідність пропускну здатності проточної частини витраті пару при тепловій потужності реактора 107% (3210 МВт);
- оптимальний розподіл теплоперепаду між ступенями за умови забезпечення необхідних тисків I і II відборів зі зміною довжин направляючих і робочих лопаток 1, 3, 4 ступеней;
- оптимізація меридіональних обводів проточної частини;
- застосування вдосконалених профілів перетинів напрямних і робочих лопаток;
- застосування у всіх ступенях цільнофрезерованих бандажів робочих лопаток з кільцевою перев'язкою бандажними вставками типу «ластівчин хвіст»;
- виконання ступеня реактивності ступенів із забезпеченням «відсмоктування» пару з кореневої

зони через міжвінцевий зазор в паророзвантажувальні отвори;

– в конструкції проточної частини особливу увагу приділено питанням видалення вологи.

На підставі цих змін в модернізованому ЦВТ турбіни К-1000-60/1500-2 на всіх ступенях, в порівнянні з існуючими турбінами, встановлені нові робочі лопатки 1-го ... 7-го ступенів, сопловий апарат 1-го ступеня і діафрагми 2-го ... 7-го ступенів.

За рахунок впровадження перерахованих вище заходів модернізована проточна частина ЦВТ забезпечує підвищення ККД циліндра на 2,9%.

Все обладнання, що поставляються, відповідає існуючому корпусу ЦВТ, ротору, муфтам і іншим сполучальним вузлам модернізованої турбіни.

Особливості конструкції модернізованих вузлів турбіни

Турбіна була розрахована для роботи за умов і значеннях основних параметрів, наведених у табл. 1.

Таблиця 1 – Основні параметри

Найменування	Величина
Теплова потужність реактора, МВт	3210
Номінальні параметри свіжої пари перед клапанами ЦВТ:	
витрата, т/год	6323.15
тиск, кг/см ²	60.35
температура, °С	274.6
ступінь сухості	0.995
Температура проміжного перегріву пари (після СПП), °С	257.8
Втрата тиску пара в тракці проміжного перегріву (Від вихлопу ЦВТ до входу в ЦНТ),%	9
Розрахункова тиск пара в конденсаторі, кг/см ²	0.0314
Номінальний тиск пара в деаератори, кг/см ²	6.85
Номінальний масовий витрата живильної води, т/год	6323.15
Температура живильної води, °С	220.6

Удосконалення проточної частини ЦВТ

Поздовжній розріз існуючого циліндру високого тиску турбіни К-1000-60/1500-2 бл. №4 Балаковської АЕС з урахуванням проведених етапів модернізації представлено на рисунку 1 [13,14].

Модернізований ЦВТ (рис. 2) має той же корпус. Нові вузли встановлюються без доробок корпусу.

Нові робочі лопатки високого тиску мають різний (як постійний, так і змінний) профіль по висоті, що забезпечує високі аеродинамічні характеристики проточної частини при оптимальному розподілі параметрів пару. Кожна лопатка піддається ретельному контролю.

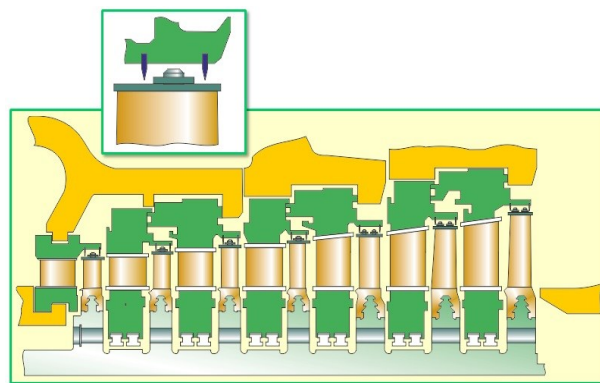


Рис. 1 – Поздовжній переріз існуючого ЦВТ турбіни К-1000-60/1500-2

Хвостовики робочих лопаток високого тиску мають двох і трьохопорну грибовидну конструкцію, що має високу технологічність та надійність. Точність виготовлення і обробки хвостовиків лопаток і грибків дисків, на які насаджуються лопатки, досягається застосуванням верстатів з ЧПУ і спеціальних пристосувань з подальшим ретельним контролем якості збірки.

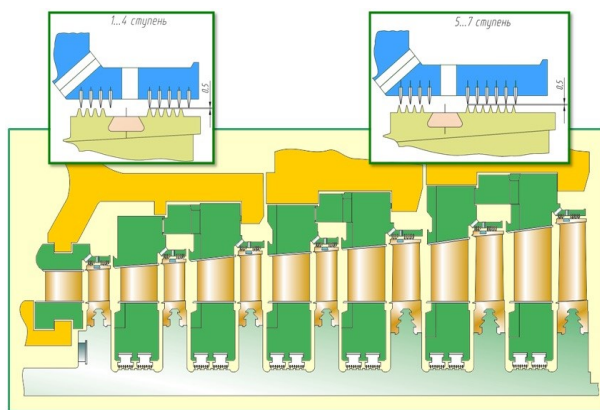


Рис. 2 – Поздовжній переріз модернізованого ЦВТ турбіни К-1000-60/1500-2

Замкові лопатки високого тиску кріпляться на диску за дві сусідні предзамкові лопатки двома штифтами.

Всі робочі лопатки високого тиску обандажені. Лопатки з першої по сьому ступінь високого тиску виконані з цільнофрезерованою бандажною полицею.

Застосування цільнофрезерованих бандажів робочих лопаток з кільцевої перев'язкою бандажними вставками типу «ластівчин хвіст» забезпечує надійні вібраційні характеристики облопачування. Бандажі, будучи системами конструкційного демпфірування, різко знижують амплітуди коливань лопаток від збуджуючих змінних аеродинамічних сил, забезпечуючи високу вібраційну надійність системи облопачування.

Застосування цільнофрезерованих бандажів робочих лопаток дозволяє виконати у всіх ступенях турбіни багаторядні осерадіальні надбандажне ущільнення, відмінною рисою яких є збільшена кількість дроселів, перехід від прямооточного течії в ущільненнях до зигзагоподібного і відповідне зниження коефіцієнтів витрати. Різні за своєю величиною кроки ущільнювачів гребенів в надбандажних козирках і бандажах робочих лопаток забезпечують малі еквівалентні зазори. Розрахунки свідчать про те, що застосування осерадіального ущільнення знижує надбандажну протічку в 4...5 разів у порівнянні з прямооточним ущільненням. Аналіз показує, що навіть при випадковому руйнуванні одного або двох рядів ущільнювальних вусів в осерадіальному ущільненні еквівалентний зазор цього ущільнення залишається меншим, ніж в прямооточному ущільненні.

Оскільки в осерадіальному ущільненні визначальним є витік робочого тіла через осьовий зазор між ущільнювальними вусами, на відміну від радіального зазору в прямооточному ущільненні, осерадіальне ущільнення виключає можливість виникнення низькочастотної вібрації ротора, що має особливо важливе значення для ЦВТ парових турбін великої потужності.

Звисають з боку паровпуску частини бандажа робочих лопаток і вусики в корені робочих лопаток підвищують економічність ступенів як за рахунок оптимізації міжвінцевого осьового зазору і зменшення надбандажного витоку, так і за рахунок отбікання активної частини робочих лопаток потоком з вирівняними слідами крайок напрямних лопаток.

Модернізація проточної частини крім заміни робочих лопаток також включала заміну діафрагм на нові зварні, з матеріалів, відповідних температурі, тиску і вологості пара модернізованого циліндра.

Направляючі лопатки в кореневій і периферійній частинах зварені в бандажну стрічку, і отримана направляюча решітка приварена до тіла і ободу діафрагми.

У всіх ступенях ЦВТ використовуються профілі направляючих лопаток зі збільшеним моментом опору за рахунок подовження вхідної частини профілю. Виконані розрахункові дослідження показали, що таке подовження профілю дозволило стабілізувати отбікання профілю при відхиленні кута натікання на нерозрахованих режимах. Також в профілях напрямних лопаток оптимізована вхідна та стоншена вихідна кромка забезпечили зниження

профільних і кромоч втрат в ступенях. Геометрія профілів і кількість напрямних і робочих лопаток забезпечують мінімальні значення профільних і кінцевих втрат. Оптимізація відносних кроків напрямних лопаток і співвідношення кількості напрямних і робочих лопаток забезпечує мінімальні значення змінних аеродинамічних сил, що діють на робочі лопатки.

Використані профілі напрямних і робочих лопаток дозволяють забезпечити високу економічності ступенів в широкому діапазоні режимних параметрів.

З метою мінімізації протікання в ступенях, між валом і діафрагмою в корпусі високого тиску застосовувалися ущільнення лабіринтового типу зі ступінчастим валом. Підпружинені сегменти ущільнень встановлювалися в Т-подібний паз тіла діафрагми.

Діафрагмові ущільнення виконані ступінчастими. Відмінною особливістю цих ущільнень є те, що кількість сегментів в кожному ущільнювальному кільці вибирається з умови неприпустимості їх перекосів і забезпечення гідростатичного притиснення сегментів кілець ущільнювачів до кільцевих посадочних поверхонь. У діафрагменних ущільненнях використовуються кручені пружини, що мають менший рівень напружень в порівнянні з плоскими.

Удосконалена проточна частина ЦВТ оснащена розвиненою системою видалення вологи. Відведення вологи з міжвінцевих зазорів здійснюється системою дренажних отворів в надбандажних козирках діафрагм. Волога з міжступеневих зазорів відводиться в камери видалення вологи за робочими лопатками. Ефективність видалення вологи за робочими лопатками забезпечується кінцевим меридіональним обводом робочих лопаток і вологосборними канавками на бандажах робочих лопаток.

Ступінь реактивності ступенів, кількість і діаметри пароразгрузочних отворів в дисках забезпечують «відсмоктування» 0,5...1% загальмованого потоку з кореневої зони ступенів в паророзвантажувальні отвори, що, як показують дослідження, помітно покращує економічність проточної частини.

Меридіональні обводи діафрагм і робочих лопаток вибиралися з міркувань забезпечення позитивних міжвінцевих і міжступеневих перекишу і зменшення перепадів на периферійних ущільненнях ступенів.

З метою усунення небалансу і забезпечення мінімальної вібрації в експлуатації і в усьому діапазоні частоти обертання при пуску і зупинці турбіни виконане динамічне балансування в декількох площинах по довжині ротора і проведені вибігові випробування з перевищенням частоти обертання на 12% понад номінальну. На рис. 3 представлений ротор ВТ в складальному цеху АТ "Турбоатом".



Рис. 3 – Модернізований ротор високого тиску турбіни К-1000-60/1500-2 бл. 4 Балаковської АЕС

Висновки

Модернізація проточної частини ЦВТ є логічним продовженням робіт з підвищення техніко-економічних показників і продовження паркового ресурсу турбін типу К-1000-60/1500. Дана робота аналогічна виконаній в 2011-2012 рр. на раніше виготовленої турбіні з переоблопачуванням ЦВТ на блоці №3 Ростовської АЕС, пущеної в експлуатацію в грудні 2014 р., а також в 2014 р. при виготовленні нового ЦВТ турбіни для блоку №4 Ростовської АЕС, що знаходиться в монтажі і планованої до введення в експлуатацію в грудні 2017 р.

В рамках проекту модернізації АТ «Турбоатом» виконав комплекс теплових і міцнісних розрахунків ЦВТ турбіни К-1000-60/1500-2 з урахуванням підвищення теплової потужності реактора до 3210 МВт з використанням існуючих деталей і вузлів.

Прийняті конструкторські і схемні рішення в проекті модернізації турбоустановці К-1000-60/1500-2 бл. 4 Балаковської АЕС і високий ступінь уніфікації її елементів, відпрацьованих і освоєних у виготовленні і експлуатації на станціях, сприяють підвищенню якості її технічного обслуговування і ремонтів, дозволяють вважати, що ця турбоустановка матиме високі техніко-економічні показники, а також забезпечують її високу конкурентоспроможність на зовнішньому ринку.

Розрахункова величина збільшення електричної потужності турбоустановки К-1000-60/1500-2 бл. 4 Балаковської АЕС при підвищенні теплової потужності реактора до 3210 МВт становить 52,56 МВт.

За підсумками аналізу результатів гарантійних теплових випробувань модернізованого ЦВТ турбіни К-1000-60/1500-2 бл. 4 Балаковської АЕС буде прийнято рішення про доцільність впровадження даних заходів на аналогічних блоках АЕС.

Список літератури

1. Швецов В. Л., Кожешкурт И. И., Бойко А. В., Усатый А. П., Солодов В. Г., Хандримайлов А. А. Совершенствование цилиндра высокого давления турбины К-220-44-2М АЭС "Ловииса". *Теплоэнергетика*. 2013. № 2. С. 22–29.
2. Бойко А. В., Усатый А. П., Руденко А. С. Многокритериальная многопараметрическая оптимизация проточной части осевых турбин с учетом режимов эксплуатации: моногр. Харьков: НТУ «ХПИ», 2014. 220 с.
3. Усатый А. П. Всережимная многопараметрическая многокритериальная оптимизация проточной части турбин в интегрированном информационном пространстве : дис. ... д-р техн. наук : 05.05.16 / Усатый Александр Павлович. Харьков, 2012. 418 с.
4. Usatyi O., Avdieieva O., Maksjuta D., Tuan P. Experience in applying DOE methods to create formal macromodels of characteristics of elements of the flowing part of steam turbines. *AIP Conference Proceedings*. 2018. Vol. 2047. P. 020025. doi: 10.1063/1.5081658.
5. Avdieieva O., Usatyi O., Vodka O. Development of the Typical Design of the High-Pressure Stage of a Steam Turbine. *Lecture Notes in Mechanical Engineering, Springer*, 2020. С. 271–281.
6. Tanuma T. Development of last-stage long blades for steam turbines. *Adv. Steam Turbines Mod. Power Plants*. 2017. P. 279–305.
7. Jang H. J., Kang S. Y., Lee J. J., Kim T. S., Park S. J. Performance analysis of a multistage ultrasupercritical steam turbine using computational fluid dynamics. *Appl. Therm. Eng.* 2015. 87. P. 352–361.
8. Weidtmann K., Bühler P., Braining E., Haj Ayed A., Lin G. High efficient steam turbine design based on automated design space exploration and optimization techniques. URL: www.euroturbo.eu (accessed 2019/09/25).
9. Manassaldi J. I., Arias A. M., Scenna N. J., Mussati M. C., Mussati S. F. A discrete and continuous mathematical model for the optimal synthesis and design of dual pressure heat recovery steam generators coupled to two steam turbines. *Energy*. 2016. 103. P. 807–823.
10. *Паротурбинные установки атомных электростанций*. под ред. Ю.Ф.Косяка. – М.: Энергия, 1978. 312 с.
11. Бузлуков В. А., Теплицкий М. Г., Максименко А. А., Поручинский Т. В. Натурные испытания турбоустановки К-1000-60/1500-2 ПОАТ ХТЗ на Запорожской АЭС. *Теплоэнергетика*. 1989. №2. С. 9-15.
12. Швецов В. Л., Галацан В. Н. Работы ОАО «Турбоатом» по модернизации и совершенствованию турбин АЭС. *Вестник НТУ «ХПИ». Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование: Сб. науч. трудов*. Харьков: НТУ «ХПИ». 2007. №2. С. 6-10.
13. Левченко В. Е. Опыт ОАО «Турбоатом» в разработке и модернизации турбин для АЭС. *Вестник НТУ «ХПИ». Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование: Сб. науч. трудов*. Харьков: НТУ «ХПИ». 2010. №2. С. 5-11.
14. Гарбузов И. П., Ойберман Л. Б., Теплицкий М. Г., Флак Ю. В. Экспериментально-расчетное определение эффективности модернизации проточных частей ЦВД турбин К-1000-60/1500 ПОАТ ХТЗ. *Теплоэнергетика*. 1991. №2. С. 2-6.

References (transliterated)

1. Shvecov V. L., Kozheshkurt I. I., Bojko A. V., Usatyj A. P., Solodov V. G., Handrimajlov A. A. Sovershenstvovanie cilindra vysokogo davlenija turbiny K-220-44-2M AJeS "Loviisa". *Teplojenergetika*, 2013, 2, pp. 22–29.
2. Bojko A. V., Usatyj A. P., Rudenko A. S. Mnogokriterial'naja mnogoparametricheskaja optimizacija protochnoj chasti osevyh turbin s uchetom rezhimov jekspluatatsii: monogr. Har'kov: NTU «KHPI», 2014. 220 p.
3. Usatyj A. P. Vserezhimnaja mnogoparametricheskaja mnogokriterial'naja optimizacija protochnoj chasti turbin v integrirovannom informacionnom prostranstve : dis. ... d-r tehn. nauk : 05.05.16. Usatyj Aleksandr Pavlovich. Har'kov, 2012. 418 p.
4. Usatyi O., Avdieieva O., Maksjuta D., Tuan P. Experience in applying DOE methods to create formal macromodels of characteristics of elements of the flowing part of steam turbines. *AIP Conference Proceedings*, 2018, Vol. 2047, pp. 020025, doi:10.1063/1.5081658.
5. Avdieieva O., Usatyi O., Vodka O. Development of the Typical Design of the High-Pressure Stage of a Steam Turbine. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Springer, 2020, pp. 271–281.
6. Tanuma T. Development of last-stage long blades for steam turbines. *Adv. Steam Turbines Mod. Power Plants*, 2017, pp. 279–305.
7. Jang H. J., Kang S. Y., Lee J. J., Kim T. S., Park S. J. Performance analysis of a multistage ultrasupercritical steam turbine using computational fluid dynamics. *Appl. Therm. Eng.*, 2015, 87, pp. 352–361.
8. Weidtmann K., Bühler P., Braining E., Haj Ayed A., Lin G. High efficient steam turbine design based on automated design space exploration and optimization techniques. Available at: www.euroturbo.eu (accessed 2019/09/25).
9. Manassaldi J. I., Arias A. M., Scenna N. J., Mussati M. C., Mussati S. F. A discrete and continuous mathematical model for the optimal synthesis and design of dual pressure heat recovery steam generators coupled to two steam turbines. *Energy*, 2016, 103, pp. 807–823.
10. *Paroturbinnnye ustanovki atomnyh jelektrostantsij*. Pod red. Ju.F.Kosjaka. M., Jenergija, 1978. 312 p.
11. Buzlukov V. A., Teplickij M. G., Maksimenko A. A., Poruchinskij T. V. Naturnye ispytaniya turboustanovki K-1000-60/1500-2 POAT HTZ na Zaporozhskoj AJeS. *Teplojenergetika*, 1989, 2, pp. 9-15.
12. Shvecov V. L., Galacan V. N. Raboty OAO «Turboatom» po modernizatsii i sovershenstvovaniju turbin AJeS. *Vestnik NTU «HPI». Jenergeticheskie i teplotehnicheskie processy i oborudovanie: Sb. nauch. Trudov*, Har'kov: NTU «HPI», 2007, 2, 6-10.
13. Levchenko V. E. Opyt OAO «Turboatom» v razrabotke i modernizatsii turbin dlja AJeS. *Vestnik NTU «HPI». Jenergeticheskie i teplotehnicheskie processy i oborudovanie: Sb. nauch. trudov*. Har'kov: NTU «HPI», 2010, 2, pp. 5 -11.
14. Garbuzov I. P., Ojberman L. B., Teplickij M. G., Flak Ju. V. Jeksperimental'no-raschetnoe opredelenie jeffektivnosti modernizatsii protochnyh chastej CVD turbin K-1000-60/1500 POAT HTZ. *Teplojenergetika*, 1991, 2, pp. 2-6.

Відомості про авторів (About authors)

Пальков Ігор Андрійович – заступник головного конструктора парових турбін АТ «Турбоатом»; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-4639-6595; e-mail: igorpalkov@i.ua.

Ihor Palkov – Deputy Chief Designer of Steam Turbines, Turboatom JSC, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-4639-6595; e-mail: igorpalkov@i.ua.

Пальков Сергій Андрійович – начальник сектору конструкторського відділу АТ «Турбоатом»; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-2215-0689; e-mail: sergpalkov@gmail.com.

Sergii Palkov – head of the design department, Turboatom JSC, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-2215-0689; sergpalkov@gmail.com.

Іщенко Олег Ігоревич – провідний конструктор конструкторського відділу АТ «Турбоатом»; м. Харків, Україна; e-mail: oleg_ishchenko@i.ua.

Oleh Ishchenko – leading designer of the design department, Company, City, Ukraine; e-mail: oleg_ishchenko@i.ua.

Авдєєва Олена Петрівна – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри турбінобудування; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-9358-4265; e-mail: Olena.Avdieieva@khp.edu.ua.

Olena Avdieieva – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Associate Professor, Department of turbine construction, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-9358-4265; e-mail: Olena.Avdieieva@khp.edu.ua.

Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:

Пальков І. А., Пальков С. А., Іщенко О. І., Авдєєва О. П. Вдосконалення циліндра високого тиску турбіни K-1000-60/1500-2 бл. №4 Балаковської АЕС. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2020. № 4 (6). С. 46-53. doi:10.20998/2413-4295.2020.04.07.

Please cite this article as:

Palkov I., Palkov S., Ishchenko O., Avdieieva O. Improvement of the high pressure cylinder of the turbine K-1000-60/1500-2 of the Balakovo NPP 4-th block. *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*. Series: New solutions in modern technology. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2020, no. 4 (6), pp. 46-53, doi:10.20998/2413-4295.2020.04.07.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Пальков И. А., Пальков С. А., Ищенко О. И., Авдеева Е. П. Усовершенствование цилиндра высокого давления турбины К-1000-60/1500-2 бл. №4 Балаковской АЭС. *Вестник Национального технического университета «ХПИ». Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». 2020. № 4 (6). С. 46-53. doi:10.20998/2413-4295.2020.04.07.

АННОТАЦИЯ Повышение мощности энергоблоков атомных станций является мировой тенденцией и широко реализуется в странах Европы и Соединенных Штатах Америки. Обычно работы по повышению мощности блоков атомных станций проводятся во время плановых реконструкций. Особенностями такой реконструкции является частичная замена оборудования, что, по сравнению с полной, дает значительную экономию ресурсов. Использование такого подхода позволяет частично заменить элементы проточной части, что в свою очередь выполняется с целью для обеспечения необходимых параметров течения в проточной части турбомашин, а также позволяет повторно использовать модифицированные элементы конструкции. Эта статья содержит обобщение опыта АО «Турбоатом» по проведению совершенствования цилиндра высокого давления, а также рассматриваются конструктивные особенности проекта модернизации турбоустановки К-1000-60 / 1500-2 блока 4 Балаковской АЭС производства ОАО «Турбоатом». В рамках проекта модернизации АО «Турбоатом» выполнил комплекс тепловых и прочностных расчетов ЦВД турбины К-1000-60/1500-2 с учетом повышения тепловой мощности реактора до 3210 МВт с использованием существующих деталей и узлов. Принятые конструкторские и схемные решения в проекте модернизации турбоустановке К-1000-60 / 1500-2 бл. 4 Балаковской АЭС и высокая степень унификации ее элементов, отработанных и освоенных в производстве и эксплуатации на станциях, способствуют повышению качества ее технического обслуживания и ремонтов, позволяют считать, что эта турбоустановка обладает высокими технико-экономическими показателями, а также обеспечивает ее высокую конкурентоспособность на внешнем рынке. Усовершенствованная проточная часть ЦВД оснащена развитой системой удаления влаги. Отвод воды из межвенцовых зазоров осуществляется системой дренажных отверстий в надбандажных козырьках диафрагм. Влага из межступенчатых зазоров отводится в камеры удаления влаги с рабочими лопатками. Эффективность удаления влаги с рабочими лопатками обеспечивается конической меридиональной окружностью рабочих лопаток и влагосборными канавками на бандажах рабочих лопаток. Расчетная величина увеличения электрической мощности турбоустановки К-1000-60 / 1500-2 бл. 4 Балаковской АЭС при повышении тепловой мощности реактора до 3210 МВт составляет 52,56 МВт.

Ключевые слова: атомная энергетика; реакторная установка; турбоустановки; модернизация; повышение мощности

Надійшла (received) 30.11.2020