

УДК 621.165

В.Г. СУББОТИН, канд. экон. наук, Е.В. ЛЕВЧЕНКО, канд. техн. наук,
В.Л. ШВЕЦОВ, инженер

*Открытое акционерное общество «Турбоатом»,
г. Харьков, Украина, e-mail: shvetsov@turboatom.com.ua*

ПАРОВЫЕ ТУРБИНЫ ОАО «ТУРБОАТОМ» ДЛЯ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Приведені етапи розвитку ВАТ «Турбоатом» в процесі створення нових серійних турбін, а також модернізації і ремонту раніше випущених турбоагрегатів, що дозволяє підтримувати економічність, надійність і маневреність харківських турбоустановок на рівні кращих світових зразків. Розглянуті типи турбін випущених заводом, описані їх конструктивні і експлуатаційні особливості.

There are presented the stages of the JSC «Turboatom» progress during the manufacture of the new series turbines and modernization and repair of the turbine-generator sets produced earlier. The mentioned refurbishing and repair allow sustaining the effectiveness, reliability and maneuverability of the Kharkov turbine plants up to the best world samples. There are considered the turbine types manufactured by the works, there are described the structural and operating features.

Производство паровых турбин на Украине началось в 1934 году после завершения строительства Харьковского турбогенераторного завода (с 1997 г. – ОАО «Турбоатом»).

Первая одноцилиндровая паровая турбина АК-50, мощностью 50 тыс. кВт была изготовлена в 1935 году для Зуевской тепловой электростанции (ТЭС) на Украине. На базе тех же технических решений в 1938 году была изготовлена одна турбина АК-100, мощностью 100 тыс. кВт. В то время во всем мире было всего несколько энергоблоков с турбинами такой мощности.

Первые паровые турбины изготавливались на начальное давление пара 30 бар. Последующие проекты турбин разрабатывались на повышенное начальное давление пара – до 90 бар. Результатом явился выпуск с 1944 по 1961 гг. серии из 35 противодавленческих турбин ВР-25, мощностью 25 МВт.

Активное развитие стационарного паротурбостроения на предприятии начинается с 50-х годов прошлого столетия. В течение короткого периода был реализован ряд проектов турбоустановок с увеличением единичной мощности, улучшением КПД и снижением удельного расхода теплоты: 100 МВт при 90 бар, 160 МВт при 130 бар и 540 °С, 300 и 500 МВт при 240 бар и 540 °С (сверхкритические параметры) (рис. 1).

В процессе производства серийных турбин и ремонтов действующих вносились усовершенствования, позволявшие не только поддерживать экономичность турбоустановок на уровне лучших мировых образцов соответствующего периода, но и значительно улучшить маневренные характеристики турбин. Использование ряда установок в полупиковом режиме эксплуатации в определенной степени сняло потребность в специальных пиковых машинах для энергосистемы страны.

Наряду с серийно выпускавшимися была спроектирована и в 1962 году изготовлена опытная турбина СКР-100 мощностью 100 МВт на начальное давление пара 300 бар при температуре 650 °С [1]. Опыт ее эксплуатации дал ценные результаты, использованные в последующих проектах турбин.



Рис. 1. Паровая турбина на сверх критические параметры пара типа К-500-240

ОАО «Турбоатом» производит также конденсационные паровые турбины для стран, где частота в электрической сети составляет 60 Гц. На Кубу и в КНДР поставлено более 30 турбин типа К-50-130/3600 и К-100-130/3600. Для ТЭС «Гавана» изготовлена турбина типа К-220-130/3600, единичной мощностью 222,5 МВт [2]. При двухцилиндровой конструкции, что почти вдвое сокращает объем требуемого машинного зала, экономичность турбоустановки по сравнению с предыдущей «соткой» повышена на 6 %.

Развитие энергетики, ужесточение экологических требований к энергетическим объектам неизбежно расширяет применение экономных систем водопользования, в частности, оборотного водоснабжения электростанций. В сухих районах земли вынуждены работать с непосредственным сухим охлаждением. Для работы в таких регионах предприятием разработана турбина К-315-23,5, цилиндр низкого давления которой рассчитан на высокие массовые нагрузки выхлопа.

Сегодня производственная программа предприятия для электростанций, работающих на органическом топливе, включает энергетические паровые турбины от мощностей 12 МВт до 550 МВт:

- Паровые турбины для применения в области базовой и полупиковой электрической нагрузки.
- Паровые турбины с непосредственным охлаждением свежей водой, оборотной водой, или комбинированным проточно-оборотным охлаждением.
- Паровые турбины с отборами пара на базе отборов с нерегулируемым давлением на технологические нужды и нужды теплофикации.

Около 400 паровых турбин суммарной мощностью свыше 60 млн. кВт поставлено предприятием для тепловых электростанций стран Европы, Азии и Америки.

В последние годы ОАО «Турбоатом», наряду с изготовлением новых типов турбин, большое внимание уделяет вопросам создания экономичного и надежного турбинного оборудования, предназначенного для технического перевооружения действующих ТЭС. Значительная часть эксплуатируемых турбоагрегатов исчерпала физический ресурс и морально устарела, что отрицательно сказывается на их надежности и экономичности.

Особое внимание уделяется блокам с турбинами единичной мощностью 200 МВт, выпускавшимся в 1961-69 гг., и блокам на закритическое давление с турбинами К-300-240 и К-300-240-2 Харьковского турбинного завода. На ТЭС Украины эксплуатируются 43 турбины единичной мощностью 200 МВт и 42 турбоустановки мощностью 300 МВт ОАО «Турбоатом». Ввод в эксплуатацию последних осуществлялся с 1963 по 1988 гг., и к настоящему времени наработка значительной части этих турбин превзошла 200000 ч., или приближается к этому значению, вдвое превышающему расчетный ресурс эксплуатации высокотемпературных узлов и деталей, что привело к снижению их технико-экономических показателей и существенному росту затрат на ремонтно-восстановительные работы. Система регулирования этих турбин не удовлетворяет современным требованиям регулирования частоты и мощности энергосистемы, требованиям автоматизации процессов эксплуатации энергоблока. Еще 34 блока с турбинами К-300-240 и К-300-240-2 ОАО «Турбоатом», практически с такой же наработкой, эксплуатируются на ТЭС России и Казахстана.

Используя результаты новейших аэродинамических исследований, проведенных на экспериментальных стендах объединения, в отраслевых институтах и лабораториях ВУЗов, а также учитывая приобретенный опыт модернизации ранее выпущенных турбин большой мощности, в ОАО «Турбоатом» создан новый высокоэкономичный и надежный турбоагрегат К-325-23,5 с ЦВД, ЦСД и первыми ступенями ЦНД активного типа, предназначенный для замены физически и морально устаревших турбин К-300-240 и К-300-240-2 ОАО «Турбоатом» [3]. Турбина К-325-23,5 может быть также использована и при сооружении новых блоков (рис. 2).



Рис. 2. Паровая турбина К-325-23,5 в машинном зале ТЭС «Аксу», Казахстан

В числе усовершенствованных узлов, примененных в турбине К-325-23,5 следует отметить систему маслоснабжения турбоагрегата, включая гидростатический подъем валопровода, подшипники и валоповоротное устройство. Наличие гидростатического подъема при пусках и вращение валопровода валоповоротным устройством исключает износ вкладышей подшипников и шеек роторов, а способность

валоповорота с приводом от моторредуктора вращать валопровод со скоростью 0,1 об/мин позволяет с помощью эндоскопов осматривать рабочие лопатки без вскрытия цилиндров.

ОАО «Турбоатом» предлагает замену как всего агрегата в целом с лучшими технико-экономическими показателями, так и поцилиндровую и поузловую замену, в том числе ряда высокотемпературных и напряженных узлов. При этом в изготавливаемых узлах реализуются современные прогрессивные решения, что качественно меняет их конструктивные и эксплуатационные характеристики.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТУРБИН

При создании турбин применяются эффективные методы конструирования с помощью ЭВМ, которые дают возможность создавать оптимальную конструкцию пространственно сложных деталей. С помощью системы автоматизированного проектирования (САПР) конструктор имеет возможность создавать на компьютере геометрию детали, как, например, турбинную лопатку с бескачковой кривизной контура и вывести ее на экран в виде трехмерного изображения (рис. 3). При этом математическую модель можно использовать как для проведения расчетов и исследований, так и для производства на станках с числовым программным управлением.

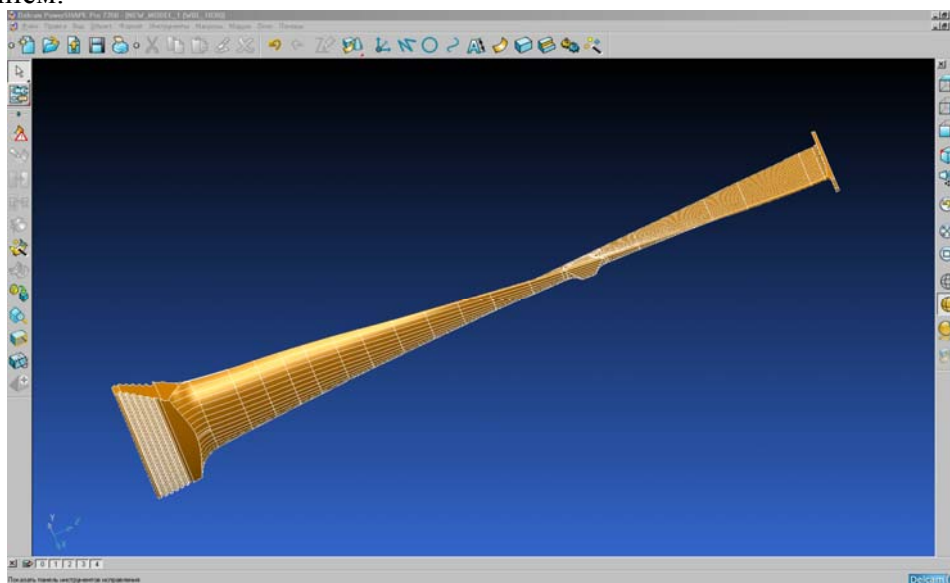


Рис. 3. Трехмерная модель лопатки последней ступени паровой турбины

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Технический уровень паровых турбин ОАО «Турбоатом» характеризуется высоким КПД и высоким коэффициентом готовности. Высокое качество продукции достигнуто благодаря постоянному совершенствованию [4]. В процессе разработки новых конструкций и производства турбин используются новейшие достижения теоретических и экспериментальных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ с учетом сохранения преемственности и унификации на базе накопленного опыта.

Исследования проводятся по двум направлениям:

- математические исследования параметрических моделей деталей и узлов;
- физические исследования моделей и натуральных элементов турбин.

Предприятие располагает уникальной научно-исследовательской базой, на которой производится натурная или модельная отработка наиболее ответственных узлов для обеспечения требуемых аэродинамических, вибрационных, прочностных характеристик. Для проведения комплекса экспериментальных работ имеется большое количество испытательных стендов. Предусмотрены аэродинамические исследования на лопаточных решетках, диффузорах и корпусах выхлопных патрубков, на воздушных экспериментальных турбинах и экспериментальных паровых турбинах низкого давления, а также проводятся измерения вибрации и деформации на роторах, облопачивании и корпусных конструкциях.

Испытательные стенды оснащены устройствами электронной обработки данных для рационального управления экспериментами и регистрации измеряемых величин.

Предприятие опирается также на тесное сотрудничество с научно-исследовательскими и проектно-конструкторскими организациями Украины и России.

ТУРБИНА



Рис. 4. Сборка цилиндра низкого давления паровой турбины

Энергетические турбины большой мощности «Турбоатома» одновальные, многоцилиндровые – с цилиндрами высокого (ЦВД), среднего (ЦСД) давления (ряд конструкций имеет объединенный цилиндр с частями высокого и среднего давления (ЦВСД)) и одним или несколькими цилиндрами низкого давления (ЦНД) (рис. 4). Все корпуса цилиндров имеют горизонтальные разъемы, что обеспечивает удобство сборки и обслуживания в процессе эксплуатации.

Цилиндры выполнены двух- или трехстенными и образуют термически эластичную конструкцию, которая работает без недопустимо высоких статических и термических напряжений в стенках корпусов и фланцах горизонтального разъема при быстрых изменениях температуры и давления в стационарных и переходных режимах эксплуатации. Это позволяет сократить продолжительность пуска турбоагрегата из различных тепловых состояний.

Паровые турбины «Турбоатома» – активного типа, с диафрагмами между ступенями ротора. Поскольку почти вся энергия ступени срабатывается на направляющем аппарате диафрагмы, перепад давлений на периферии рабочего колеса незначителен и надбандажные уплотнения достаточно эффективны.

СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ ТУРБИНЫ

До начала 80-х г. системы регулирования турбин ХТГЗ были гидродинамическими и единственным параметром, изменение и поддержание которого обеспечивала система регулирования турбиной на всех этапах ее работы, была частота вращения. В режиме разворота обеспечивалось повышение частоты вращения и

поддержание частоты на номинальном уровне, при работе в сети — изменение расхода пара в турбину в зависимости от колебаний частоты в сети, а при внезапном отключении от сети работала защита, не допускающая повышение частоты вращения до опасных значений.

Необходимость расширения функций систем регулирования и повышение требований со стороны энергосистем и блочных систем управления к точности реализации технологических процессов привели к поискам принципиально новых решений, результатом которых явилось создание и внедрение электрогидравлических систем регулирования (ЭГСР).

В процессе создания ЭГСР были приняты решения, позволившие создать системы с самыми современными характеристиками при использовании имеющихся традиционных элементов обычного производства, без повышенных требований к качеству и надежности (рис. 5):

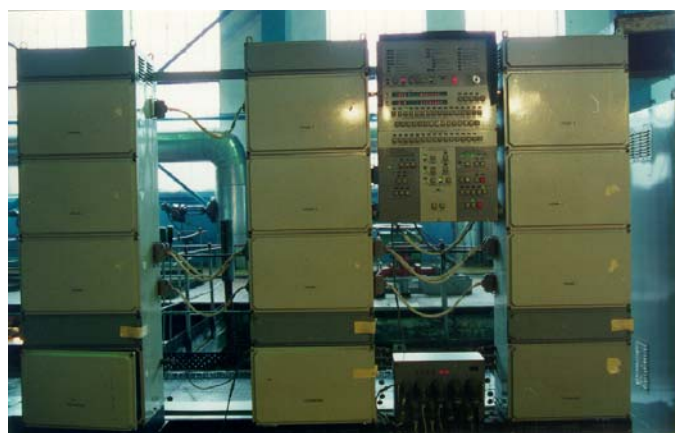


Рис. 5. Программно-технический комплекс контроля, регулирования и защиты турбины ПТ-20-2,9/1,0 Харьковской ТЭЦ-3

– резервирование каналов системы («троирование») на первом этапе внедрения ЭГСР, с автоматическим отключением отказавшего канала и переключением на исправный без изменения величины регулируемого параметра, что позволило использовать комплектующие без повышенных требований к надежности и сроку службы;

– преобразование команд электронной части в изменение давления в гидравлической линии управления выполняется

двухсторонним усилителем типа «сопло-заслонка», это позволило применить электромеханические преобразователи с малыми перестановочными усилиями;

– использование в законах управления сигналов от датчиков электрической обратной связи по положению сервомоторов и отсечных золотников позволило использовать элементы гидравлических узлов с традиционными требованиями к обработке и трению, и масло без жестких требований к его очистке;

– взаимодействие гидравлической части системы регулирования с системой защиты, обеспечивающее, в случаях отказа электронной части, закрытие регулирующих клапанов и безопасность турбины;

– алгоритмы управления, реализуемые электронной частью системы, обеспечивающие:

- высокую чувствительность, требуемую точность поддержания параметров, устойчивость переходных процессов;

- возможность работы в любом режиме в соответствии с условиями работы и автоматического «безударного» переключения режима при изменении условий;

- оптимальное взаимодействие с блочными регуляторами АЭС или ТЭС, с энергосистемной автоматикой.

В настоящее время электрогидравлическими системами регулирования оснащаются все энергетические турбины ОАО «Турбоатом». В современных ЭГСР

полностью исключены гидравлические линии управления благодаря установке непосредственно на отсечные золотники сервомоторов высокого давления и сервомоторов промперегрева индивидуальных электромеханических преобразователей (ЭМП). Индивидуальные ЭМП с большими перестановочными усилиями в сочетании с датчиками положения сервомоторов обеспечивают высокую чувствительность, быстродействие и точность позиционирования привода. Они позволили внедрить электрогидравлические системы регулирования на турбинах мощностью 300 МВт, где в качестве рабочего тела в гидравлических линиях и механизмах систем регулирования и защиты используется конденсат.

ПОДВОД ПАРА В ТУРБИНУ

Парораспределение высокого давления – сопловое. Два блока парораспределения устанавливаются симметрично по обеим сторонам ЦВД. Каждый блок включает один стопорный и два регулирующих клапана, работающих на 4 сопловые коробки. Ввод пара во внутренний корпус цилиндра осуществляется с помощью самоуплотняющихся втулок с поршневыми кольцами. В сопловых коробках размещаются элементы соплового аппарата первой одновенечной регулировочной ступени.

Применяется также и дроссельное парораспределение.

Из двух блоков клапанов промежуточного перегрева пар подается в симметричную паровпускную часть среднего давления сверху и снизу корпуса. Симметричная конструкция паровпускной части ЦСД гарантирует оптимальные условия прогрева, способствует стабильности радиальных зазоров в проточной части.

РОТОРЫ

Валопроводы мощных паровых турбин состоят из отдельных роторов, жестко соединенных друг с другом и с ротором генератора.

Роторы турбины являются наиболее ответственными и напряженными элементами, надежность и долговечность которых в значительной степени определяют качественные показатели всей турбины. Ротор ЦВД турбины К-325-23,5 выполнен цельнокованным, проточная часть состоит из регулировочной ступени и 11 ступеней



Рис. 6. Ротор среднего давления турбины мощностью 300 МВт

давления, а ротор ЦСД (рис. 6) – комбинированный, заодно с валом отковано 11 дисков части среднего и три диска первых трех ступеней части низкого давления. Роторы низкого давления изготавливаются также из легированных сталей высокого качества из отдельных кованых элементов, сваренных на специальных установках. Это позволяет избежать трудностей, связанных с муфтами и горячей посадкой дисков рабочих колес на вал. Особенностью подобных

конструкций роторов, традиционных для ОАО «Турбоатом», являются отсутствие концентраторов напряжений в виде фиксирующих шпонок, пазов и т.п., что обеспечивает длительную и надежную работу и отсутствие коррозий под напряжением.

РАБОЧИЕ ЛОПАТКИ

Лопаточный аппарат, особенно облопачивание роторов низкого давления, как наиболее сложной и высоконагруженной части турбины, в значительной мере определяет надежность всего агрегата. Кроме того, лопатка последней ступени цилиндра низкого давления определяет порог предельной мощности турбины. Создание надежного лопаточного аппарата представляет комплексную задачу в области прочности, газодинамики, вибрации, противозерозионной защиты с обязательной отработкой лопаток в стендовых условиях.

Конструкторы и исследователи «Турбоатома» имеют необходимый опыт и лабораторное оборудование для выполнения всего комплекса расчетных и исследовательских работ по созданию элементов проточной части паровых турбин.

Все рабочие лопатки высокого, среднего и первых ступеней низкого давления выполняются с цельнофрезерованными бандажными полками и перевязаны по кольцу бандажными вставками типа «ласточки хвост» (рис. 7).

Рабочие лопатки всех ступеней среднего и низкого давления имеют переменный профиль по высоте, что обеспечивает высокие аэродинамические характеристики проточной части. Рабочие лопатки предпоследней и последней ступеней имеют цельнофрезерованные или накладные бандажи фигурной конструкции, благодаря которым при вращении ротора и развороте периферийной части лопаток под действием центробежной силы происходит взаимное замыкание бандажей и обеспечивается пакетная жесткость лопаток.

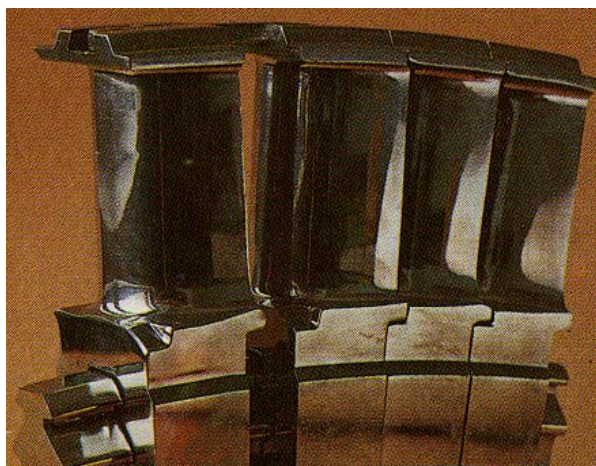


Рис. 7. Перевязка цельнофрезерованных бандажных полок рабочих лопаток вставками типа «ласточкин хвост»

Для быстроходных турбин на предприятии применяются три типа лопаток последних ступеней – длиной 852, 1030 и 936 мм (на базе последней смоделирована лопатка длиной 767 мм для турбин на 3600 об/мин.). Дальнейшим развитием размеров выхлопа может являться использование рабочей лопатки с длиной активной части 1140 мм, что позволяет реализовать более глубокий вакуум и использовать, в связи с этим, большой перепад на турбину. В силу того, что эти лопатки проектировались на повышенный расход пара, количество выхлопов с лопаткой 1140 мм может быть уменьшено по сравнению с конструкцией, где используются лопатки 1030 мм.

Эрозионная стойкость рабочих лопаток последней ступени обеспечивается комплексом мероприятий, таких как специальное упрочнение входных кромок, увеличенный теплоперепад на ступень, внутриканальное и периферийное влагоудаление, выбор оптимальной межвенцовой перекрыши и межступенчатого зазора. Безотказная работа ступени с лопаткой 1030 мм на электростанциях превысила 120 тыс. часов.

Хвостовики рабочих лопаток предпоследней и последней ступеней низкого давления – «елочного» типа, многоопорные, дугообразные, с торцевой заводкой. Эти хвостовики обладают повышенной несущей способностью и надежностью в работе.

ДИАФРАГМЫ



Рис. 8. Вварка направляющих лопаток диафрагмы паровой турбины в бандажную ленту

Все диафрагмы – сварные. Направляющие лопатки в корневой и периферийной частях вварены в бандажную ленту (рис. 8), и полученная направляющая решетка приварена к телу и ободу диафрагмы. Между валом и диафрагмой в Т-образный паз тела диафрагмы устанавливаются подпружиненные сегменты уплотнений, которые сводят к минимуму протечки в ступенях. В диафрагменных и концевых уплотнениях установлены витые пружины, которые имеют более высокий уровень надежности по сравнению с традиционно применяемыми плоскими пружинами.

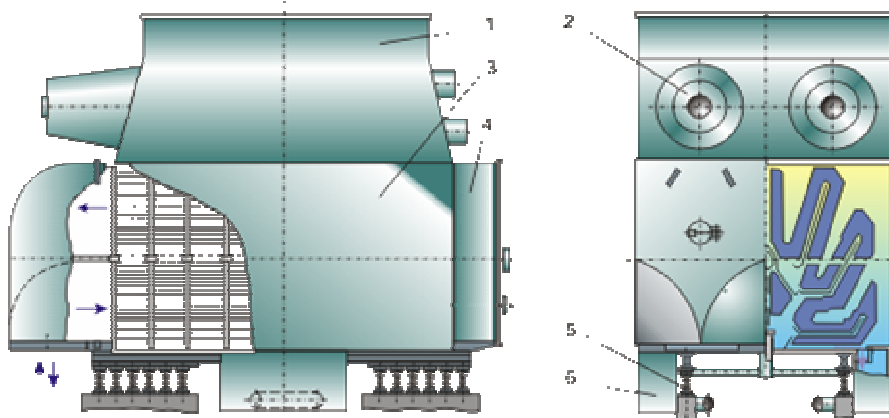
КОНДЕНСАЦИОННОЕ УСТРОЙСТВО

Конденсатор

Процесс преобразования энергии в турбине заканчивается процессом конденсации пара. К задействованным для этого конденсаторам предъявляются столь же высокие требования по теплотехническим показателям и коэффициенту готовности, как и к турбине.

Все турбины, выпускаемые предприятием, комплектуются конденсаторами собственного производства (рис. 9). ОАО «Турбоатом» имеет большой опыт в разработке и эксплуатации конденсаторов широкого диапазона мощностей для работы в различных климатических условиях и обеспечивающих оптимальное соотношение теплотехнических характеристик и коэффициента готовности.

Конденсатор представляет собой две симметричные половины. Форма трубного пучка и применение дополнительной струйной деаэрации в конденсаторосборниках практически предотвращают переохлаждение конденсата. Каждая половина трубного пучка выполнена в виде свернутой ленты с глубокими тупиковыми проходами по контуру, обеспечивающими допустимые входные скорости, хорошую деаэрирующую способность, получение высоких значений коэффициента теплопередачи.



1 – переходной патрубок, 2 – приемно-сбросное устройство, 3 – корпус, 4 – водяная камера, 5 – пружинная опора, 6 – конденсаторосборник

Рис. 9. Конденсатор паровой турбины ОАО «Турбоатом»

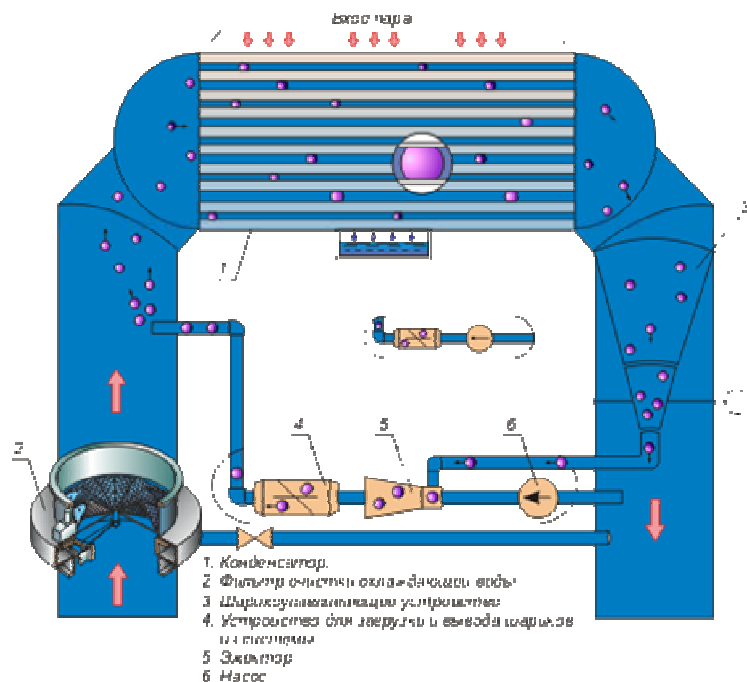


Рис. 10. Система шариковой очистки конденсатора

В зависимости от конкретных условий конденсаторы по тракту охлаждающей воды могут быть одно- или двухходовыми и одно- или двухпоточными. Подводы воды, как правило, выполняются в нижней части водяных камер, отводы – как в верхней, так и в нижней части камер в зависимости от компоновочных решений.

Для предотвращения органических и минеральных отложений на внутренних поверхностях охлаждающих труб конденсатора предназначена система шариковой очистки (рис. 10). В процессе работы конденсационного устройства шарики из губчатой резины

проходя по трубам производят их очистку. Система шариковой очистки совместно с фильтром охлаждающей воды от механических загрязнений увеличивают коэффициент чистоты трубок до 0,90, что способствует поддержанию глубокого вакуума в конденсаторе.

Приемно-сбросные устройства

В процессе исследования различных типов устройств была разработана оригинальная конструкция, используемая сегодня на всех турбинах «Турбоатома». Приемно-сбросные устройства располагаются на стенках переходного патрубка конденсатора. В них происходит снижение давления пара, поступающего из пуско-сбросных устройств во время пуска энергоблока и сброса электрической нагрузки, с одновременным понижением его температуры до слабоперегретого состояния за счет впрыска охлаждающего конденсата. Этим предотвращается захолаживание и коробление корпусных элементов цилиндра низкого давления и повреждение трубок конденсатора в случае поступления пароводяной смеси с неиспарившейся влагой.

Воздухоотсасывающее устройство

В качестве воздухоотсасывающих устройств конденсаторов мы традиционно применяем пароструйные эжекторы. Отсутствие вращающихся элементов, электропривода определяет их высокую надежность, а использование в качестве рабочего пара выпара деаэратора с утилизацией теплоты рабочего и отсасываемого пара в охладителе, включенном в схему основного конденсата, обеспечивает высокую экономичность эжекторов по сравнению с другими типами воздухоотсасывающих устройств (рис. 11). Использование «бросового» пара выпара деаэратора для питания эжекторов позволило отказаться от охладителя выпара, применявшегося ранее для утилизации теплоты.



Рис. 11. Трубные пучки эжекторов

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА

Производственные возможности, накопленный опыт и организация системы обеспечения качества позволяют создавать оборудование, удовлетворяющее требованиям Заказчиков. Система обеспечения качества распространяется на все стадии от разработки конструкции до сдачи готовой продукции в эксплуатацию и последующее обслуживание. Чтобы действительно наша продукция соответствовала представлениям Заказчика о качестве, мы планируем, контролируем, управляем, документально фиксируем качество нашей продукции на различных этапах ее изготовления.

Положения системы изложены в стандартах предприятия. За основу принята модель системы, соответствующая требованиям стандартов ISO 9001-2001, как наиболее полно отвечающим специфическим особенностям предприятия (рис. 12).

Основные принципы системы:

- полный учет требований Заказчика на всех этапах жизненного цикла изделий;
- обеспечение поставки изделия в намеченный срок;
- использование достижений науки и техники для повышения технико-экономических и улучшения эксплуатационных характеристик изделия;
- достижение требуемого качества изделий при минимальных затратах на изготовление и эксплуатацию;
- завоевание доверия Заказчиков и обеспечение стабильного материального и финансового положения предприятия на основе качества и конкурентоспособности производимого оборудования;
- сближение интересов всех работников предприятия в обеспечении качества продукции за счет материального и морального стимулирования качественной работы.



Рис. 12. Сертификаты соответствия производства ОАО «Турбоатом» требованиям международных стандартов

Литература

1. Брагинский Г.П. Некоторый опыт работы системы охлаждения турбины Р-100-300 / Г.П. Брагинский, Н.С. Чернецкий, Л.П. Сережкина // Теплоэнергетика. – 1973. – № 6. – С. 15-18.
2. Шубенко-Шубин Л.А. Особенности конструкций новейших паровых турбин большой мощности. – М.: Госэнергоиздат, 1962. – 136 с.
3. Паровая турбина К-300-240 ХТГЗ / Под ред. Ю.Ф. Косяка. – М.: Энергоиздат, 1962. – 272 с.
4. Основные результаты создания и газодинамических исследований последней ступени турбин К-500 и К-1000/1500 / Я.И. Шнэе, Ю.Ф. Косяк, В.Н. Пономарев и др. // Теплоэнергетика. – 1978. – № 9. – С. 2-7.

© Субботин В.Г., Левченко Е.В., Швецов В.Л., 2009