

УДК 621.165.004.68.001.8 : 620.9.004.18

В.Л. ШВЕЦОВ

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

## **ОПЫТ ОАО «ТУРБОАТОМ» В СОЗДАНИИ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ТЕПЛОВЫХ И АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**

Приведені основні вимоги, що приймаються як вихідні положення при розробці проектів модернізації турбоагрегатів, а також методи перевірки ефективності виконаних удосконалень. Показана можливість і доцільність використання отриманих і конструктивних розробок для турбін, що модернізуються і заново проєктованих, для ТЕС і АЕС різних потужностей. Приведені типи турбін, для яких виконані проєкти модернізації.

Methods on checking the efficiency of the modernizations performed and basic requirements taken as the initial positions when developing the turbine sets modernization projects are presented. It is recommended to use the constructive developments for the NPP and TPP various capacity turbines being updated and ones which are to be designed. Turbine types for which have been performed the projects on updating are presented.

ОАО «Турбоатом» является одним из крупнейших в мире научно-производственным предприятием по проектированию и изготовлению современного энергетического оборудования для тепловых, атомных и гидравлических электростанций.

По основным техническим и эксплуатационным показателям турбины ОАО «Турбоатом» не уступают современному мировому уровню, а по некоторым показателям превосходят его.

В числе наиболее важных работ ОАО «Турбоатом» следует отметить создание и освоение турбин для ТЭС на повышенные и сверхкритические параметры острого пара электрической мощностью 160, 300, 310, 320, 325 и 500 МВт, а также большой серии влажнопаровых турбин для АЭС мощностью 220, 500, 750, 1000 и 1100 МВт, а также газотурбинных установок для ПГУ и автономной работы.

Уникальный положительный опыт был получен объединением при создании и эксплуатации турбины СКР-100 мощностью 100 МВт на начальные параметры пара 29,4 МПа и 650 °С с паровым охлаждением и минимальным использованием высокожаропрочных материалов.

Наряду с турбинами, установленными на электростанциях бывшего СССР, турбоагрегаты ОАО «Турбоатом» эксплуатируются в Болгарии, Венгрии, Китае, Корее, Кубе, Румынии и Финляндии. В зависимости от конкретных условий, завод выпускает турбины с частотой вращения ротора 25, 50 или 60 1/с. В последние годы, с целью решения проблем энергосбережения Украины, приоритетной сферой деятельности ОАО «Турбоатом» является также модернизация ранее выпущенных турбоагрегатов с целью повышения их экономичности и эксплуатационной надежности.

Технический прогресс в энергетике и энергетическом машиностроении на современном этапе их развития приводит к тому, что моральное старение действующего оборудования, как правило, опережает его физический износ. Отрицательные последствия морального старения оборудования удается, в значительной степени, устранить путем его реконструкции и модернизации. В результате этого сроки наступления морального износа отодвигаются, в некоторых

случаях, за границы выработки предельного физического ресурса.

Указанные обстоятельства, а также значительный прогресс в области совершенствования проточных частей паровых турбин тепловых и атомных электростанций, предопределили появление новых высокоэффективных методов модернизации, работающего на электростанциях энергетического оборудования. Использование результатов газодинамических исследований проточных частей паровых турбин, проведенных на экспериментальных стендах объединения, в отраслевых институтах и лабораториях ВУЗов, а также накопленный опыт модернизации ранее выпущенных турбин, позволяет ОАО «Турбоатом» разрабатывать проекты модернизации турбоагрегатов, значительно повышающих их КПД и мощность.

Начиная с 1996 г. в ОАО «Турбоатом» были разработаны и реализованы проекты модернизации турбин типа К-220-44, работающих на АЭС Украины, России, Финляндии, Венгрии и Болгарии, а также турбин ТЭС типа К-160-130 и К-300-240 производства ОАО «Турбоатом» и проточной части низкого давления турбины К-200-130 ЛМЗ. Разработаны предложения по модернизации турбин АЭС типа К-500-65/3000, К-750-65/3000 и К-1000-60/1500, а также К-500-23,5 и К-200-130, работающих на ТЭС.

При разработке проектов модернизации турбин в ОАО «Турбоатом» в качестве исходных приняты следующие основные положения:

- возможность размещения модернизируемой турбины в габаритах существующего машзала;
- сохранения строительной части машзала, включая фундамент турбоагрегата;
- сохранение вспомогательного оборудования пригодного для дальнейшей эксплуатации;
- использование прогрессивных технических решений, апробированных в эксплуатации;
- достижение технико-экономических показателей работы турбины, отвечающих современному мировому уровню;
- снижение затрат на эксплуатацию;
- увеличение межремонтного периода работы турбины;
- приведение пропускной способности турбины к фактической паропроизводительности парогенерирующей установки.

Первая паровая турбина типа К-220-44 номинальной мощностью 220 МВт, предназначенная для работы на АЭС с параметрами свежего пара 4,31 МПа и 241 °С и промежуточным перегревом пара, была изготовлена ОАО «Турбоатом» в 1969 г. [1]. Тридцать четыре турбины этого типа были поставлены на атомные электростанции Украины, России, Армении и Венгрии. В 1976 г. была выпущена первая из четырех турбин второй модификации К-220-44-2 для АЭС Ловииса в Финляндии. От турбин первой модификации они отличались повышенной мощностью при одинаковом расходе свежего пара, что определяется в первую очередь использованием современной последней ступени ЦНД с рабочей лопаткой длиной 1030 мм. Начиная с 1979 г. на АЭС Пакш и Кольскую было поставлено 10 турбин третьей модификации К-220-44-3. Их экономичность была повышена в основном путем применения модифицированной первой ступени ЦВД. Турбина также отличалась от предыдущих модификаций боковым подводом пара к ЦНД. Турбины номинальной мощностью 220 МВт всех трех модификаций работали безотказно [2, 3]. По данным журнала Nuclear Engineering, укомплектованные такими турбинами электростанции Ловииса и Пакш постоянно входят в число лучших АЭС мира по использованию установленной мощности. Гарантийные тепловые испытания турбин разных модификаций, проведенные на

Нововоронежской, Козлодуй, Ловииса и Кольской электростанциях подтвердили высокую экономичность турбоустановок. Она оказалась выше первоначально гарантированной на 1,5...1,6 % [4, 5]. Комплекс научно-исследовательских работ, проведенных в конце 80-х годов и накопленный опыт эксплуатации усовершенствованных турбин К-220-44-2 и К-220-44-3, позволили ОАО «Турбоатом» разработать предложения о существенной модернизации работающих на электростанциях турбин мощностью 220 МВт первой, а также второй и третьей модификаций. При модернизации турбин первой модификации, в предложенном ОАО «Турбоатом» объеме, повышение мощности блока составляет 20 МВт при неизменной тепловой мощности реакторов, то есть без дополнительных затрат топлива. Основными мероприятиями модернизации являются:

– приведение пропускной способности турбины в соответствие с номинальной паропроизводительностью парогенерирующего оборудования путем реконструкции первой ступени ЦВД, что исключает лишнее дросселирование свежего пара в регулирующих клапанах и повышает КПД ЦВД;

– замена облопачивания ЦНД на новое с последней ступенью, имеющей рабочую лопатку длиной 1030мм. Рабочие лопатки 5-й и 6-й ступеней ЦВД, а также 1...5 ступеней ЦНД выполнены с цельнофрезерованными полочными бандажами и кольцевой перевязкой лопаток. Кольцевая перевязка лопаток 5-й и 6-й ступеней ЦВД и 1...3-й ЦНД осуществляется вставками типа «ласточкин хвост». Полочные бандажи рабочих лопаток двух последних ступеней ЦНД контактируют друг с другом по специальным уступам, препятствующим раскрутке лопаток в поле центробежных сил. Применение цельнофрезерованных бандажей рабочих лопаток с кольцевой перевязкой позволило свести к минимуму количество демпферных проволочных связей в проточных частях;

– применение ступенчатых концевых и диафрагменных уплотнений ЦНД вместо уплотнений прямооточных, что существенно уменьшило соответствующие утечки пара; и другие не менее важные усовершенствования проточной части.

Гарантийные показатели эффективности модернизации турбоагрегатов на АЭС проверялись по результатам сравнительных испытаний путем определения электрической мощности турбоустановки до и после модернизации при оговоренных одинаковых условиях (тепловой мощности реактора, начальные параметры пара, температура и расход охлаждающей воды).

Успешно выполненная модернизация турбин типа К-220-44, а также результаты новейших расчетных и экспериментальных исследований элементов проточных частей позволили ОАО «Турбоатом» разработать проекты модернизации турбоагрегатов типа К-160-130, К-200-130 ЛМЗ и К-300-240 – энергоблоков, работающих на органическом топливе.

Проект модернизации турбины К-160-130 на параметры свежего пара 12,8 МПа, 540 °С предусматривает замену совмещенного цилиндра высокого и среднего давления (ЦВСД), паровпускных органов частей высокого и среднего давления, а также замену цилиндра низкого давления на новые с существенно повышенными уровнями надежности, экономичности и маневренности. Модернизированная турбина получила маркировку К-175-12,8. ЦВСД турбины К-175-12,8 разработан принципиально новой конструкции на базе современных достижений в области создания проточных частей, статической и термической прочности. Подвод свежего пара после промперегрева к ЦВСД осуществляется в среднюю часть корпуса, что существенно уменьшило градиенты температур по длине корпуса в пусковых, стационарных и переменных режимах работы турбоагрегата, позволив эксплуатировать турбину в переменной части графика электрических нагрузок энергосистемы.

В турбине используют новые высокоэкономичные проточные части высокого, среднего и низкого давления активного типа. Семиступенчатая проточная часть высокого давления, восьмиступенчатая проточная часть среднего давления и двухпоточная, по пять ступеней, в каждом потоке, по сравнению с проточными частями ранее выпускавшихся турбин этого типа, имеет ряд отличительных особенностей, обеспечивающих их высокую экономичность и надежность. Во всех ступенях частей высокого, среднего и цилиндра низкого давления применены высокоэкономичные профили направляющих лопаток и усовершенствованные рабочие лопатки с цельнофрезерованными покрывными полочными бандажами с кольцевой перевязкой лопаток и развитой системой надбандажных уплотнений, кроме двух последних ступеней ЦНД. В двух потоках низкого давления применена последняя ступень с рабочей лопаткой длиной 752 мм с торцевой площадью выхлопа одного потока 5,52 м<sup>2</sup>. Суммарное повышение мощности турбоустановки при расходе свежего пара 525 т/ч и при номинальных параметрах свежего пара составляет 11,2...17,0 МВт и зависит от технического состояния проточной части турбины до модернизации.

В ОАО «Турбоатом» разработан проект модернизации физически и морально устаревших турбин типа К-200-130, производства ЛМЗ номинальной мощностью 200 МВт на параметры свежего пара 12,8 МПа и 540 °С, с промежуточным перегревом пара. На тепловых электростанциях Украины установлены 43 турбоагрегата этого типа. Проектные решения по турбине были разработаны в начале 50-х годов.

Проектом модернизации турбин К-200-130 предусмотрена замена проточных частей ЦВД, ЦСД и ЦНД и органов парораспределения, а также внедрение электрогидравлической системы регулирования и шариковой очистки трубок конденсатора. Модернизация может выполняться поэтапно как с сохранением существующих корпусов и валов, так и с их заменой. В зависимости от объема модернизации повышение мощности турбоустановки составляет от 3-х до 12-ти МВт. Первая модернизация турбины К-200-130 – усовершенствование проточной части ЦНД и была выполнена на Старобешевской ТЭС. Повышение мощности составило около 7 МВт.

При решении проблем технического перевооружения действующих ТЭС весьма важное место занимают вопросы повышения технического уровня турбин К-300-240 и К-300-240-2 на закритические параметры пара. На тепловых электростанциях Украины установлено 42 такие турбоустановки. Ввод их в эксплуатацию осуществлялся с 1963 по 1988 г., и к настоящему времени наработка значительной части этих турбин превзошла 200000 час. Еще 34 блока с такими турбинами и практически с такой же наработкой эксплуатируются на ТЭС России и Казахстана.

Для замены турбин К-300-240 на Приднепровской и других ТЭС, предназначенных для отпуска от турбины пара для нужд теплофикации в количестве до 220 Гкал/ч., соответствующей тепловой нагрузке 255 МВт, ОАО «Турбоатом» спроектировал турбину К-310-23,5-3. Ее главной отличительной особенностью является применение схемы с двухпоточной частью низкого давления, имеющей суммарную торцевую площадь выхлопа 16,38 м<sup>2</sup>. Однако, столь значительные отборы пара требуются не от всех турбин мощностью 300 МВт. Крайне мало по данным эксплуатации и турбоустановок, работающих с заметно повышенной, по сравнению с расчетным значением, температурой охлаждающей воды, для которых было бы оправдано применение двухпоточной части низкого давления.

Поэтому для технического перевооружения энергоблоков с Харьковскими турбинами мощностью 300 МВт ОАО «Турбоатом» разработал новую высокоэкономичную и надежную паровую турбину типа К-325-23,5 с 12-ти

ступенчатым ЦВД, сварно-кованым ротором двухпоточного цилиндра низкого давления (2-й и 3-й потоки) и комбинированным ротором среднего давления [6].

Заодно с валом отковано 11 дисков части среднего давления и 3 диска первых трех ступеней части низкого давления первого потока. Диски двух последних ступеней части низкого давления первого потока насадные. В основу проекта принята существенная модернизация проточных частей высокого, среднего и низкого давления с использованием новейших результатов аэродинамических исследований, полученных в объединении, в отраслевых институтах и лабораториях ВУЗов, а также учтен предыдущий опыт модернизации турбин ТЭС и АЭС.

Удельный расход теплоты брутто турбоустановкой К-325-23,5 составляет 7465 кДж/кВт·ч (1783,4 ккал/кВт·ч), что на 3,39 % меньше чем у турбоустановки К-300-240-2.

К решению проблемы энергосбережения Украины следует также отнести создание ОАО «Турбоатом» паровых турбин с регулируемыми производственными и теплофикационными отборами пара.

К этому типу турбин следует отнести, разработанные заводом турбины ПТ-12-3,5/1,0; ПТ-20-2,9/1,0; ПТ-25-8,8/1,0; ПТ-35-2,9/0,8/0,12 и ПТ-35-8,8/1,0. Параметры свежего пара этих турбин составляют 2,8...8,8 МПа и 400...535 °С, номинальная мощность 12...35 МВт, давление в регулируемых отборах 0,8...1,2 МПа и 0,7...0,25 МПа. Расходы и давление пара в отборах регулируются поворотными диафрагмами. Турбины предназначены для широкого диапазона эксплуатационных режимов: конденсационный, производственный, теплофикационный и на режим одновременного отпуска пара на производственное и теплофикационное потребление.

Первая турбина этого типа ПТ-20-2,9/1,0 монтируется на Харьковской ТЭЦ-3, ведется производство турбин ПТ-35-2,9 для ТЭЦ «Запорожсталь» и ПТ-25-8,8 для ТЭЦ «Криворожсталь».

В технологическом цикле предприятий металлургической, химической, пищевой и многих других отраслей промышленности как источник теплоты используется водяной пар. Для получения пара на этих предприятиях установлены промышленные котельные, вырабатывающие пар с давлением 1,28...3,9 МПа в то время, как для технологических целей и теплофикации нужен пар с давлением 0,12...1,18 МПа.

В настоящее время в этих условиях снижение давления пара до требуемой величины происходит в редуционных (РУ) или в редуционно-охладительных установках (РОУ) и сопровождается безвозвратной потерей части потенциальной энергии пара. С целью энергосбережения представляется весьма целесообразным замена РУ и РОУ промышленных и коммунальных котельных на паротурбинные установки малой и средней мощности, в которых процесс снижения давления пара сопровождается выработкой электроэнергии. При этом эффект от выработки электроэнергии существенно превосходит потери теплоты в турбине.

Для малой энергетики разработаны также турбоустановки, предназначенные для установки на промышленных и коммунальных котельных и небольших ТЭЦ:

а) турбины с противодавлением мощностью 1...4 МВт (Р-1-1,3/0,6; Р-2-1,3/0,6; Р-4-1,3/0,6);

б) турбины с противодавлением мощностью 5...12 МВт (Р-5,2-2,2/0,3; Р-6-3,4/0,3; Р-12-3,4/0,3; Р-12-3,4/0,8);

В последние годы ОАО «Турбоатом» уделяет большое внимание вопросам «малой» энергетики, развивая их в нескольких направлениях. Одним из направлений является реконструкция турбинного оборудования сахарных заводов, в значительной мере выработавшего свой ресурс.

С этой целью в ОАО «Турбоатом» разработаны и освоены в производстве турбины номинальной мощности 5,2, 6,0 и 12 МВт на начальные параметры пара 2,2 МПа, 370 °С и 3,4 МПа, 435 °С с противодавлением 0,24...0,5 МПа. Турбины представляют собой высокоэкономичные одноцилиндровые многоступенчатые агрегаты, оснащенные всем необходимым комплексом вспомогательного оборудования, а также современным электронным программно-техническим комплексом системы контроля, регулирования и защиты производства ГНПО «Коммунар», обеспечивающим оптимальные режимы эксплуатации, автоматический пуск, синхронизацию и останов.

Первый турбоагрегат из этой серии установлен на ТЭЦ ОАО «Сахарный завод» в п.г.т. Чапаево Кегичевского района, Харьковской области.

Другим перспективным направлением является создание паротурбинных установок для предприятий металлургической и химической промышленности, и коммунального хозяйства.

В частности, в акционерном обществе «Силур» «Харцизский сталепроволочный-канатный завод» Донецкой области введен в эксплуатацию, успешно работающий энергоблок мощностью 7,7 МВт с турбиной типа Р-7-3,4.

На Львовском предприятии тепловых сетей ТЭЦ-1 установлена турбина аналогичной конструкции мощностью 10 МВт, пар из выхлопа которой используется в поставленной ОАО «Турбоатом» бойлерной установке, предназначенной для подогрева сетевой воды и отопления промышленных и коммунальных потребителей.

По просьбе заказчиков ОАО «Турбоатом» разработал также серию одноступенчатых турбин мощностью 1...4 МВт. Установка этих турбин на предприятиях позволяет, наряду со снабжением потребителей паром необходимых параметров, давать возможность предприятиям снизить зависимость от централизованной энергосистемы.

#### Литература

1. Паротурбинные установки атомных электростанций / Под ред. Ю.Ф. Косяка – М.: Энергия, 1978. – 312 с.
2. Аккерман Г., Хампель Р., Хентшель Г. и др. Исследование режимов работы АЭС с ВВЭР // Теплоэнергетика. – 1976. – № 11. – с. 85-87.
3. Мизьтинен Э., Лоукиа А., Вуоренная А. Опыт наладки и эксплуатации турбинной установки АЭС «Ловииса-1» // Теплоэнергетика. – 1980. – № 2. – с. 36-40.
4. Коновалов Г.М., Кори А.К., Канаев В.Д., Померанцев Л.И. Экономичность серийных блоков АЭС мощностью 440 МВт с реакторами ВВЭР 440 // Теплоэнергетика. – 1975. – №9. – с. 52-56.
5. Аркадьев Б.А. Режимы работы турбоустановок АЭС. – М. Энергоиздат, 1986.
6. Левченко Е.В., Борисов Н.А., Галацан В.Н., Сухинин В.П. Турбоустановка К-325-23,5 для технического перевооружения энергоблоков с турбинами К-300-240 и К-300-240-2 Харьковского турбинного завода // Энергетика и электрификация. – 2003. – №3. – с. 23-29.

© Швецов В.Л., 2006