

5. *Arthur M. (Art) Dowell*, III Senior Technical Fellow, Rohm and Haas Company, International Conference and Workshop on Risk Analysis in Process Safety, 1997, CCPS/AIChE. Layer of Protection Analysis: A New PHA Tool After Hazop, Before Fault Tree Analysis.

6. *Bruce K. Vaughen, Jeffry O. Mudd, Bryan E. Pierce*. 6<sup>th</sup> Global Congress on process safety. Using the ISA 84 / HAZOP / LOPA Procedure to Design a Safety Instrumented System (SIS) For a Fumed Silica Burner.

7. *Paul Baybutt and Remigio Agraz-Boeneker*. The 1<sup>st</sup> Latin American Process Safety Conference and Exposition, Center for Chemical Process Safety, Buenos Aires. May 27–29, 2008. A comparison of the hazard and operability (HAZOP) study with major hazard analysis (MHA): A more efficient and effective process hazard analysis (PHA) method.

shinaeva@uhsep.com

Материал поступил в редакцию 10 декабря 2015 г.

УДК 621.822:621.165

© М.В. Альмухамедов, И.М. Тимонов,  
В.И. Загороднов, 2015

## Особенности проведения технического диагностирования рабочих лопаток паровой турбины на примере турбины К-300-240

М.В. Альмухамедов    И.М. Тимонов    В.И. Загороднов

инженеры-дефектоскописты ООО «Юцпк Промышленная безопасность»

Указаны особенности технического диагностирования лопаток различных ступеней роторов высокого, среднего и низкого давления паровых турбин, учитывая воздействие высоких температур пара, вибрационные и динамические нагрузки, нестабильность режима нагрева, остановки и быстрые запуски турбин, вызывающих их изгиб, кручение, растяжение и колебание.

**Ключевые слова:** паровая турбина, лопатки, нагрузки, диагностика.

**Т**урбина представляет собой одновальный трехцилиндровый агрегат с тремя выхлопами в один общий конденсатор (рисунок).

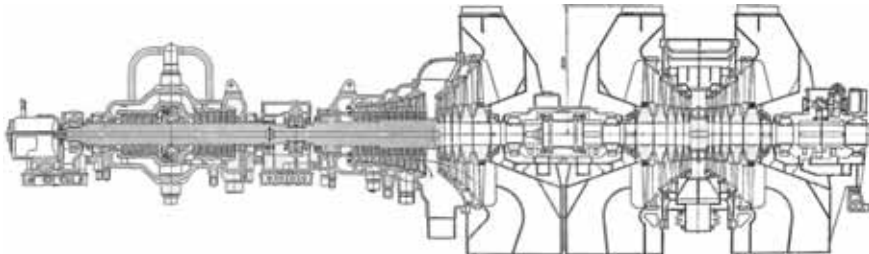


Рисунок. Турбина паровая К-300-240. Продольный разрез



### Технические характеристики:

Номинальность мощность, МВт	300
Число оборотов, рад/с (об/мин)	314 (3000)
Давление острого пара, МПа (кг/см <sup>2</sup> )	23,5 (240)
Температура острого пара, °С	565
Давление пара за цилиндром высокого давления (ЦВД) при номинальной мощности, МПа (кг/см <sup>2</sup> )	3,92 (40)
Температура пара за ЦВД, °С	332
Давление пара перед цилиндром среднего давления (ЦСД), МПа (кг/см <sup>2</sup> )	3,52 (36)
Температура пара перед ЦСД, °С	565
Давление в конденсаторах при расчетной температуре охлаждающей воды +12 °С, Па (кг/см <sup>2</sup> )	3,42·10 (0,035)
Максимальный расход пара на турбину, т/ч	930

Рабочие лопатки паровых турбин — одни из наиболее нагруженных и ответственных деталей турбины. Воздействие высоких температур пара, вибрационные и динамические нагрузки, нестабильность режима нагрева, остановки и быстрые запуски турбины вызывают изгиб, кручение, растяжение и колебание лопаток.

Надежность работы турбинного оборудования целиком и полностью зависит от состояния рабочих лопаток. Поскольку лопатки для турбины эксплуатируются в сложных условиях, их необходимо проверять тщательным образом, выявлять дефекты и при необходимости вовремя производить замену.

У ротора высокого давления (РВД) с 12 ступенями в левом потоке расположены регулирующая ступень и 5 ступеней давления (во внутреннем корпусе) и 6 ступеней правого потока (во внешнем корпусе). Особенностью РВД является сопловое парораспределение, при котором обязательно выполняется регулирующая ступень с изменяемым проходным сечением соплового аппарата. Особенностью работы регулирующей ступени является то, что она работает в зоне высоких температур и усилия на каждую лопатку изменяется в течение каждого оборота, что приводит к усталостным напряжениям. Поэтому лопатки регулирующей ступени выполняются спаренными по хвостовику и бандажу. Следовательно, при диагностировании необходимо обращать особое внимание на данную ступень. После регулирующей ступени подвод пара полный. Усталостные напряжения не предвидятся и рабочие лопатки при помощи бандажной лены объединяются в отдельные пакеты. При диагностировании этих лопаток определяется частота собственных колебаний каждой лопатки, и если какая-то лопатка имеет низкую частоту собственных колебаний, необходимо тщательно проверить ее на наличие трещин по всему телу и крепление к бандажу.

Ротор среднего давления (РСД) с 12 ступенями части среднего давления (в одной части корпуса) и 5 ступенями части низкого давления (в другой части корпуса). Отработавший в ЦВД пар после промперегрева поступает в ЦСД. На входе он проходит через стопорный клапан, в котором имеется сетка. Но и это не дает полной гарантии того, что из котла не могут попасть частицы, причиняя вред рабочему телу лопаток. В связи с этим особое внимание уделяется лопаткам первой ступени. Также определяются частоты собственных колебаний. Еще одной особенностью РСД является наличие части низкого давления. Между последней 12-й ступенью части среднего давления и 1-й ступенью части низкого давления возможна пульсация пара. В связи с этим рабочим лопаткам данных ступеней следует уделять особое внимание.

Двухпоточный ротор низкого давления (РНД) с 5 ступенями в каждом потоке состоит из вала, на который насажено 10 дисков — по 5 на каждый поток. Так же, как и на части низкого давления РСД, на РНД со второй лопатки частоты собственных колебаний увеличиваются, поэтому помимо бандажной ленты дополнительно ставят проволочную связь. Для этой цели в рабочей части лопатки выполняют отверстия, через которые проходит проволока, объединяющая лопатки в пакеты. Проволока припаяна к каждой из лопаток серебряным припоем ПСР-45. Места пайки необходимо тщательно осматривать.

Особенностью при диагностировании является нахождение лопатки последней ступени в области влажного пара, что в итоге приводит к эрозионному износу, поэтому тщательно контролируются путем замера хорды минимум в пяти сечениях. Результаты замеров заносят в формуляр. Методы контроля, при помощи которых выполняют техническое диагностирование рабочих лопаток паровой турбины, включают основные и дополнительные.

К основным методам контроля относятся: визуальный контроль, вихревой контроль, магнитопорошковая дефектоскопия, цветная дефектоскопия, травление, ультразвуковой контроль.

К дополнительным методам относятся: эндоскопирование без вскрытия и с вскрытием цилиндра, вибрационный контроль на работающей турбине с применением дискретно-фазового метода, вибрационные испытания на извлеченном из турбины роторе, акустико-эмиссионный контроль, диагностирование с помощью образцов — свидетелей усталостного разрушения.

При подготовке к контролю производится очищение рабочих лопаток от солевых отложений при помощи пескоструек. Также в настоящее время распространен метод зачистки лопаток шлифовальными машинами.

Комплект для визуально-измерительного контроля предназначен для того, чтобы у специалиста неразрушающего контроля всегда под рукой были нужные инструменты для замеров и осмотра.



Перечень наиболее распространенных дефектов, выявляемых при визуально-измерительном контроле: обрывы лопаток, ленточных бандажей, проволочных связей; механические повреждения лопаточного аппарата в виде забоин, деформаций кромок и следов задеваний; нарушение плотностей сборки ступеней, выходы лопаток из ряда, их разворот, вылезание из посадочного места; отсутствие противоэрозионных пластин на входных кромках лопаток, работающих во влажной паре; нарушение сплошности сварных соединений в сварных пакетах; наличие на рабочих лопатках и бандажах промывов и износа от каплеударной и абразивной эрозии; коррозионные повреждения; отклонение положения демпферных связей от заданного; видимые трещины на лопатках, в сварных швах, бандажах, проволочных связях и т.д.

Данный перечень составлен для того, чтобы специалист неразрушающего контроля всегда помнил о наиболее характерных дефектах, часто встречающихся при техническом диагностировании.

Наиболее характерными механическими повреждениями рабочих лопаток, фиксируемых визуально-измерительным методом, являются: механические забоины по спинке лопатки и по входной кромке, трещины в области торцевого сечения, замятие торца лопатки.

Лопатки последней ступени РНД (работающие во влажном паре) подвергаются наибольшему эрозионному износу и частичному разрушению; одним из самых распространенных методов их восстановления является наплавка с последующим фрезерованием после предварительной зачистки дефектной поверхности.

Дефектоскопическому контролю подвергаются 100 % рабочих лопаток, работающих в зоне фазового перехода, 100 % рабочих лопаток последних ступеней. Поверхностными методами в основном фиксируются трещины: на входных и выходных кромках по всей высоте рабочей части, на кромках отверстий под проволочную связь, на галтельных переходах в корневом сечении, в зоне шипов под ленточными бандажами, на выпуклой поверхности за противоэрозионными пластинами, в районе коррозионных язв (при наличии язвенной коррозии, превышающей нормы), на хвостовиках.

**uetn-ucpk@yandex.ru**

*Материал поступил в редакцию 30 ноября 2015 г.*