

УДК 621.65

## Особенности работы турбин АЭС

Кулешов Е. А.

Научный руководитель к.т.н., доцент Чиж В. А.

подавляющее большинство турбин АЭС работает на насыщенном паре. Особенности использования влажного пара в турбинах АЭС существенным образом влияют на их расчет и конструкцию. Рассмотрим некоторые из этих особенностей.

Малый располагаемый теплоперепад. В большинстве турбин насыщенного пара располагаемый теплоперепад приблизительно в 2 раза меньше, чем в турбинах на высокие начальные параметры пара. Так, например, в современных турбинах насыщенного пара с внешней сепарацией при  $p_0 = 6,0$  МПа располагаемый теплоперепад составляет менее 60 % располагаемого теплоперепада турбины с  $p_0 = 23$  МПа и

$t_0 = t_{nn} = 550^\circ\text{C}$ . Следствием этого являются:

- 1) отсутствие ЦСД в большинстве влажно-паровых турбин;
- 2) выработка в ЦНД примерно 50—60 % всей мощности турбины, поэтому влияние ЦНД на экономичность оказывается весьма существенным;
- 3) заметное влияние на экономичность турбины потерь с выходной скоростью  $\Delta H_{в.с.}$ , эффективности выходного патрубка, потерь от дросселирования в паровпускных органах, в ресиверах, в тракте внешнего сепаратора-перегревателя.

Объемные расходы пара. В турбинах насыщенного пара из-за пониженных начальных параметров, меньшего располагаемого теплоперепада и пониженного КПД объемные расходы пара примерно на 60—90 % больше, чем в турбинах на высокие параметры той же мощности. В связи с этим для конструкции турбин АЭС характерны следующие особенности:

- 1) повышенные габариты паровпускных органов;
- 2) двухпоточное исполнение ЧВД турбин мощностью выше 500 МВт;
- 3) из-за больших высот лопаток уже первые ступени выполняют с переменным профилем лопаток по высоте;
- 4) большие высоты лопаток регулирующей ступени, что затрудняет применение парциального подвода пара, т.е. соплового парораспределения из-за значительных изгибающих напряжений в лопатках;
- 5) большие расходы пара в ЦНД, что требует увеличения числа потоков, применения пониженной частоты вращения.

Влажность пара. Для турбин АЭС особо важна проблема влажности, так как все ступени таких турбин работают в зоне влажного пара. Приблизительно можно считать, что увеличение средней влажности пара на 1 % приводит к уменьшению внутреннего относительного КПД турбины на 1 %.

Образование влаги в паре относительно высокой плотности в начале его расширения вызывает эрозионное разрушение элементов проточной части. В турбинах, работающих на влажном паре, существуют различные виды эрозии: ударная, межщелевая, эрозия вымывания, встречающаяся в ресиверах, сепараторах и других частях, на которые действует влага в виде струй.

Одним из эффективных методов снижения потерь от влажности пара является проектирование ступеней и решеток турбины с учетом особенностей течения влажного пара. В частности, увеличение зазора между сопловыми и рабочими решетками ведет к выравниванию потока при входе на рабочее колесо и дополнительному разгону капель влаги. Однако за счет этого уменьшается кинетическая энергия потока на входе в

рабочую решетку. Поэтому в каждой ступени существуют оптимальное соотношение размеров и оптимальный осевой зазор. Опыты показали, что увеличение осевого зазора существенно не сказывается на экономичности ступени. В некоторых турбинах размер осевого зазора в периферийной части последних ступеней доходит до 100 мм и более. Существуют и другие методы рационального проектирования ступени: уменьшение окружной скорости на периферии лопаток, достигаемое сокращением высоты лопаток, переходом на пониженную частоту вращения, уменьшением числа сопловых лопаток, благодаря чему сокращается количество крупной влаги, срывающейся с выходных кромок сопловых лопаток и попадающей на рабочие лопатки.

Единичная мощность. Из-за уменьшенного располагаемого теплоперепада турбины влажного пара ее мощность составляет лишь часть мощности турбины на сверхкритические параметры пара при одинаковом давлении в конденсаторе и равном числе однотипных выхлопов. Вопрос о целесообразной предельной единичной мощности быстроходных турбин АЭС ( $n=50\text{ с}^{-1}$ ) решается главным образом в зависимости от допустимого числа цилиндров в одновальном агрегате, значений вакуума и выходных потерь. Например, конструктивная схема турбины мощностью 500 МВт включает пять цилиндров, в том числе четыре ЦНД.

Для повышения предельной мощности быстроходных турбин АЭС существуют следующие пути.

— Увеличение пропускной способности выхлопа. В настоящее время накоплен опыт эксплуатации турбин, имеющих площадь единичного выхлопа не более 9 м (для лопаток из стали).

Предельная мощность турбины с  $n=50\text{ с}^{-1}$ , рассчитанной для работы на насыщенном паре давлением на входе 6,0—7,0 МПа, на выходе до 4 кПа и имеющей восемь выхлопов на базе последней ступени с высотой рабочей лопатки около 1000 мм, оценивается в 700 МВт, а мощность 1000 МВт может быть достигнута при ухудшении вакуума, что приводит к уменьшению внутреннего относительного КПД турбины на 1%.

— Снижение экономичности турбины за счет повышения конечного давления рк или увеличения потерь с выходной скоростью. Переход от  $p_k = 3,5\text{ кПа}$  к  $p_k = 5\text{ кПа}$  при тех же размерах последней ступени повышает мощность турбины на 43 %, снижая КПД на  $\Delta\eta_s/\eta_s = 0,9\%$ . Увеличение  $\Delta H_{в.с.}$  в 1,5 раза повышает мощность в 1,22 раза, снижая экономичность турбины на  $\Delta\eta_s/\eta_s = 1,3\%$ .

— Уменьшение частоты вращения вдвое. Турбины насыщенного и слабоперегретого пара для АЭС в настоящее время выполняют тихоходными ( $n = 25\text{ с}^{-1}$ ), начиная с турбин мощностью 500—1000 МВт.

Надежность. К турбинам АЭС предъявляются повышенные требования по надежности. Причиной этого является невозможность немедленной остановки реактора при аварийной остановке турбины. В связи с этим при проектировании турбин АЭС предусматривают большие запасы прочности, применяют более качественные материалы, по возможности используют уже апробированные сопловые и рабочие решетки. Радикальным средством повышения надежности является уменьшение частоты вращения, позволяющее снизить напряжения в элементах ротора, увеличить его жесткость, сократить число цилиндров.

Влияние аккумулярованной в турбине влаги на разгонные характеристики турбоагрегата.

Как и в турбинах с промежуточным перегревом пара для ТЭС, в турбинах АЭС из-за большого объема и протяженности паропроводов между цилиндрами при сбросе нагрузки может увеличиться частота вращения ротора. В турбинах насыщенного пара к

этому добавляется вскипание и испарение влаги, сконденсировавшейся на поверхностях ротора, неподвижных деталях турбины, в сепараторе и т.п.

Расчеты и опыты показали, что за счет этого при сбросе нагрузки частота вращения может возрасти на 15—25 %. Для уменьшения разгона в турбинах АЭС используют следующие средства:

- 1) устанавливают специальную арматуру на входе в ЦНД после СПП;
- 2) сокращают размеры тракта между ЦВД и ЦНД, т. е. увеличивают разделительное давление, объединяют сепараторы и подогреватели;
- 3) улучшают дренаж из турбины и тракта.

Биологическая защита. Специфические особенности имеют турбины АЭС, работающие по одноконтурным схемам с радиоактивным паром в качестве рабочего тела. В таких условиях должна предусматриваться биологическая защита. На некоторых АЭС ограничиваются герметической обшивкой агрегата или герметизацией всей установки. Паропроводы радиоактивного пара прокладывают ниже отметки обслуживания.

Особые требования предъявляют к устранению утечек пара из турбины. Фланцевые соединения должны быть абсолютно плотными, иногда горизонтальные фланцы заваривают тонкой лентой. Широко применяют сварку трубопроводов. Предусматривают подвод нерадиоактивного пара в уплотнения из специальных котлов.

### Литература

1. Шкотов Ю.Д. “Из истории создания паровых турбин”. Энергетик, 2005, №4, стр. 38.
2. Костюк А.Г. ,Фролов В.В. ,Булкин А.Е. , Трухний А.Д. “Турбины тепловых и атомных электрических станций”, уч. для ВУЗов, 2-ое издание. М.: изд-во МЭИ, 2001.- 488с.ил..