

УДК 621.311.25

РАБОТА ПОСЛЕДНИХ СТУПЕНЕЙ ЦНД В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОЙ ВЛАЖНОСТИ ПАРА

Карпович А.С.

Научный руководитель – старший преподаватель Нерезько А.В.

С развитием АЭС с водоохлаждаемыми реакторами, в парогенераторах которых вырабатывается насыщенный пар, приобрел особое значение вопрос о влиянии влажности на характеристики паротурбинных установок.

Для турбин на насыщенном паре большая часть ступеней работает на влажном паре. Влага может присутствовать в потоке пара в виде тумана, капель или пленок, движущихся по поверхностям подвижных и неподвижных элементов проточной части и срывающихся в виде струй и капель.

Влажность пара снижает внутренний относительный КПД турбины и вызывает эрозионный износ проточной части.

Влияние влажности на КПД

Влияние влажности на КПД обусловлено неизбежными затратами энергии на разгон и отбрасывание капель влаги, на трение потока пара о капли и о пленки влаги, а также увеличением конечных потерь и тормозящим воздействием ударов капель, срывающихся пленок и т.д.

Внутренний относительный КПД турбины при работе на влажном паре:

$$\eta_o^{в.п} = \eta_o^{п.п} \frac{x_{ср}}{100}; \quad (1)$$

где

$\eta_o^{в.п}$ - внутренний относительный КПД турбины на перегретом паре;

$x_{ср}$ - средняя сухость пара, %.

Из этого следует, что с увеличением влажности на 1 % происходит снижение η_o на 1 %.

Наибольшие потери отвечают концевым зонам: корневой и периферийной. При этом оказывается, что на выходе из первой ступени группы у концов лопаток из-за пониженного КПД температура (если пар перегретый) выше, чем в средней по высоте области (если пар влажный, то у концов лопаток выше степень сухости).

Влияние влажности пара на надежность турбоагрегата

Влияние влажности пара на надежность турбоагрегата обусловлено интенсификацией процессов коррозии и эрозии. В процессе расширения насыщенного пара в турбине его влажность непрерывно увеличивается и достигает значений, недопустимых по условиям эрозионного износа проточной части. В потоке пара образуются капли влаги разных размеров, обладающих различными траекториями и скоростями.

В турбинных ступенях, работающих влажным паром, часто наблюдается эрозия поверхности рабочих лопаток. В результате эрозии происходит как бы выщербление металла, поверхность лопатки становится неровной, губчатой, с выступами и полостями (кавернами). Даже незначительная эрозия меняет вибрационные и прочностные характеристики лопаток, что может быть причиной их поломок, а также ухудшает КПД ступени.

В последних ступенях ЦНД крупных турбин окружная скорость периферии рабочих лопаток заметно превышает скорость звука и относительная скорость входа капель влаги на рабочие лопатки также оказывается сверхзвуковой. При этом наиболее вероятным оказывается их эрозионное воздействие.

Предупреждение эрозии, что является безусловным требованием нормальной работы турбины, может идти двумя принципиально разными, обычно применяемыми одновременно путями - активным и пассивным.

Активный путь означает:

1. Уменьшение влажности перед ступенью, что достигается повышением начальной температуры пара и снижением начального давления, применением промежуточного перегрева пара, понижением разделительного давления, применением эффективной внешней сепарации, увеличением теплоперепада в последней ступени, где, очевидно, следует ожидать наибольшей эрозии;
2. Уменьшение фактической влажности перед рабочей лопаткой, достигаемое применением различных высокоэффективных способов влагоудаления в проточной части, в том числе сепарацией влаги из предшествующей сопловой решетки.
3. Уменьшение ударного воздействия капель влаги на рабочие лопатки, что достигается, в частности, увеличением осевого зазора между сопловыми и рабочими лопатками, благодаря чему возрастает коэффициент скольжения и прогрессирует дробление капель.
4. Снижение окружной скорости на периферии лопаток.

Пассивные методы борьбы с эрозией включают:

1. Применение для лопаток материалов, к которым надо отнести нержавеющие стали, титановые сплавы и др.;
2. Установку на той части лопаток, которая подвергается эрозии, накладок из весьма эрозионно стойких материалов, непригодных, однако, для изготовления всей лопатки. Таким материалом является стеллит — сплав на кобальтовой основе. Стеллитовые накладки широко применяются на лопатках ЦНД многих паровых турбин, в том числе турбин ЛМЗ и ТМЗ;
3. Термическую обработку лопаток или отдельных их частей, а также покрытие поверхности лопаток. ХТЗ, например, в своих турбинах, в том числе турбинах насыщенного пара, применяет для рабочих лопаток последней ступени поверхностное электро-искровое упрочнение выходных кромок твердым сплавом. Сущность этого метода заключается в направленном переносе металла с электрода на лопатку под действием электрического разряда. После этого стойкость против эрозии у высокохромистой нержавеющей стали повышается в несколько раз.

Как упоминалось, для уменьшения истинной влажности, главным образом уменьшения количества крупнодисперсной влаги, и тем самым для повышения надежности и экономичности в проточной части турбин насыщенного пара, а также в последних ступенях турбин высоких начальных параметров осуществляется сепарация.

Сепарация влаги в проточной части может производиться различными способами, в том числе отсосом водяной пленки с поверхности сопловых лопаток или из их кромки — так называемая внутриканальная сепарация.

Водяная пленка, образующаяся на поверхности сопловых лопаток при сходе с выходных кромок, дробится на капли, которые оказывают решающее влияние на эрозию рабочих лопаток и играют главную роль в снижении экономичности ступени. Отсос этой пленки, а также удаление капель до того, как они покинут сопловую решетку, существенно уменьшает эрозию лопаток. Этот отсос производится через щели, располагаемые в различных местах обвода профиля (рис. 5.3). Влага через эти щели попадает во внутреннее пространство полой сопловой лопатки, которое соединено с областью пониженного давления, например, непосредственно с конденсатором.

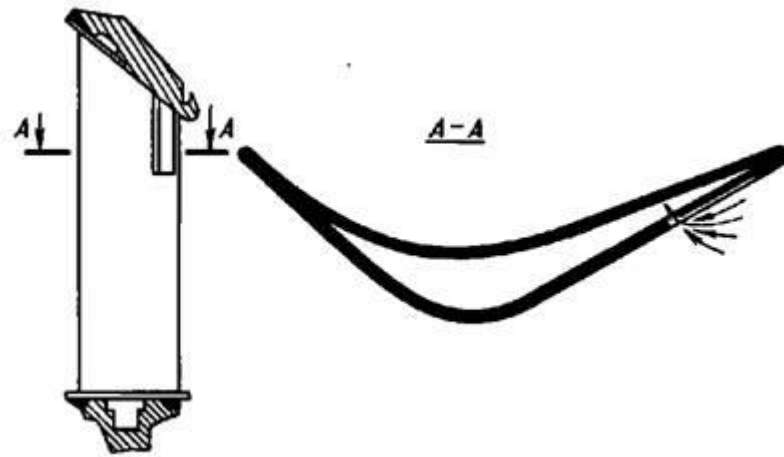


Рисунок 1. Внутриканальная сепарация влаги в сопловых лопатках.
Сечение А-А увеличено в 5 раз

В зависимости от формы канала сопловой решетки, основная доля сконцентрированной влаги может располагаться в той или иной части профиля. Немалое влияние на возможность отсоса влаги оказывает конфузурность течения в решетке, а также направление потока на входе в решетку.

В одноцилиндровых турбинах с большой долей ступеней, работающих влажным паром, и, следовательно, со значительной влажностью в последней ступени нецелесообразно применение внешнего сепаратора, используемого в многоцилиндровых турбинах АЭС. Установка внешнего сепаратора в одноцилиндровой турбине означает удлинение ротора, снижение экономичности проточной части в связи с невозможностью использовать выходную энергию пара в ступени, предшествующей внешнему сепаратору, не говоря уже о потерях давления в тракте сепаратора. Поэтому в таких турбинах, используемых, например, для привода питательных насосов АЭС, в проточной части могут устанавливаться специальные ступени-сепараторы.

Литература

1. Особенности работы группы ступеней влажным паром / Паровые турбины. Часть 1 [Электронный ресурс]. – 2009. — Режим доступа: <http://www.tehnoinfo.ru/parovyeturbiny/42.html>. – Дата доступа: 19.04.2018.