

УДК 621.165

**ПРИЧИНЫ НАРУШЕНИЯ НОРМАЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ  
ПАРОВЫХ ТУРБИН**  
**THE REASONS FOR THE DISRUPTION OF THE NORMAL OPERATION  
OF STEAM TURBINES**

В.В. Бакалова, В.Д. Лукьяненко

Научный руководитель – Н.В. Пантелей, старший преподаватель  
Белорусский национальный технический университет, г. Минск

V. Bakalova, V. Lukyanenko

Supervisor – N. Panteley, Senior Lecturer  
Belarusian national technical university, Minsk

**Аннотация:** В данной статье представлены основные аспекты нормальной эксплуатации турбоустановок. Отдельно рассмотрены элементы защиты и регулирования турбины, причины образования отложений в проточной части установки, а также вибрационное ее состояние. В заключении делается вывод о значимости правильно осуществленного процесса эксплуатации паровых турбин.

**Annotation:** This article presents the main aspects of the normal operation of turbine installations. The elements of protection and regulation of the turbine, the causes of sediment formation in the flow part of the installation, as well as its vibration state are considered separately. In conclusion, the conclusion is made about the importance of a properly implemented steam turbine operation process.

**Ключевые слова:** паровая турбина, система регулирования и защиты, эрозия, вибрация, занос солями, кавитация, отложения, абразивный износ.

**Key words:** steam turbine, steam turbine, control and protection system, erosion, vibration, salt drift, cavitation, deposits, abrasive wear.

### Введение

На сегодняшний день существует ряд способов повысить экономичность и обеспечить надежность паровых турбоустановок. К таким способам относятся: постоянное улучшение рабочих процессов агрегатов, организация непрерывного наблюдения и «ухода» за введенной в эксплуатацию турбиной, контроль параметров пара и нагрузки, учет вибрационного состояния оборудования, обеспечение оптимальной эксплуатации элементов системы регулирования и защиты. Немало важно также снижать риск возникновения заносов солями проточной части турбины и эрозии металлических конструкций.

### Основная часть

В качестве одной из причин нарушения нормальной эксплуатации паровых турбин можно выделить занос солями их проточной части.

Соли по своим свойствам классифицируют следующим образом:

- Растворимые в воде соли ( $Na_2CO_4$ ,  $Na_2SO_4$ ,  $NaCl$ ) характерны для турбин низкого и среднего давления и попадают в проточную ее часть за счет капельного уноса частиц жидкости с поверхности испарения. Следует отметить, что в области влажного пара эти соли не

- откладываются [1];
- Плохо растворимые соли. По мере перехода на пар высоких параметров нерастворимые и слабо растворимые в воде соединения становятся актуальнее. Их попадание в турбину обусловлено молекулярным уносом, возникающим при растворении солей в сухом насыщенном паре высокого давления. Соли, растворенные в паре, находятся в равновесном состоянии, однако в процессе расширения в турбине они переходят в перенасыщенное состояние и выпадают из пара в виде твердого кристаллического осадка [1];
  - Нерастворимые соли содержат в своем составе медь, железо, кальций, алюминий, кремний.

Соли в турбину попадают из котла вместе с паром из-за некачественной работы сепараторных установок котла, резкого подъема уровня воды, скачков нагрузки, вспенивания воды, а также ухудшения водного режима, что является наиболее частой причиной образования отложений.

Вследствие выпадения из пара твердых осадков в значительной мере изменяется и процесс расширения пара в турбине. Это явление связано с перераспределением теплоперепадов по ее ступеням. Таким образом, в нерасчетном режиме начинают работать не только подвергшиеся воздействию солей, но и чистые ступени (больше всего страдает последняя ступень). Занос солями влечет за собой уменьшение проходного сечения соплового и лопаточного аппарата. Тем самым растет давление на диафрагмы и диски ступеней, увеличивается теплоперепад и повышается риск возникновения утечек через диафрагменные уплотнения. Кроме того возможны утечки через разгрузочные отверстия в дисках и надбандажные уплотнения, а также появление шероховатости стенок каналов, вследствие чего преумножаются профильные потери и, конечно, значительно снижается КПД турбины. В случае интенсивного заноса солями требуется понижать нагрузку для предотвращения нарушения работоспособности диафрагм и упорного подшипника турбины.

Состав выпадающего осадка напрямую зависит от начальных параметров пара. Так с увеличением давления наблюдается переход от образования солей кремния ( $90 \text{ кгс/см}^2$ ) к окиси железа ( $140 \text{ кгс/см}^2$ ). В паре сверхкритических параметров присутствует большое количество соединений меди. Они как раз таки и являются продуктом коррозии латунных трубок конденсатора и ПНД. Здесь влияние отложений особенно велико из-за малых размеров сопел и лопаток.

По эксплуатационному опыту отложения 1 кг солей в проточной части ЦВД турбины К-100-900 приводит к снижению абсолютного КПД этого цилиндра на 1 %. В результате расход теплоты турбины увеличивается на 0,5 %, а годовой перерасход условного топлива составляет 1500 т. Для турбины К-300-240 1 % заноса солями проходного сечения ЦВД приводит к годовому перерасходу условного топлива, равному 2450 т [1]. На одной из ГРЭС (турбина К-300-240 ЛМЗ) мощность двух блоков 160 МВт снизилась за 2-3 месяца до 120 МВт. В процессе разборки установки были выявлены отложения толщиной до 2 мм и даже 3 мм. На другой ГРЭС спустя пару месяцев работы мощность двух блоков

200 МВт уменьшилась на 30-40 МВт. Здесь толщина отложений составила 5 мм. На одной из этих турбин уже спустя неделю эксплуатации максимальная мощность упала до 170 МВт [2].

Примеры образования обложений в системе трубопроводов представлены на рисунках 1 и 2.



Рисунок 4 – Отложения в распределительном трубопроводе



Рисунок 5 – Фрагмент отложений в трубопроводах

Занос солями в свою очередь влияет на развитие процесса разрушения и износа материала отдельных компонентов турбоустановки в результате контакта потоков жидкости или газа, называемый эрозией (рисунок 3). Этот процесс свойственен различным типам турбин и имеет ряд причин:

- Кавитация. При снижении давления жидкости ниже её парциального давления начинают появляться пузырьки, которые при схлопывании оказывают неблагоприятный эффект на лопаточный аппарат установки;
- Абразивные частицы. Наличие твердых частиц в рабочей среде (песок и др.) ведет к неизбежному механическому износу;
- Температура и давление. Сверхкритические параметры рабочей среды способствуют увеличению скорости коррозионного процесса и, следовательно, снижению прочности материалов;
- Недостатки при проектировании или производстве агрегата могут выступать причиной неравномерного распределения нагрузок, тем самым увеличивая риск эрозии.



Рисунок 3 – Коррозия задвижки насоса

Развитие эрозионного процесса влечет за собой снижение эффективности работы турбины, значительный годовой перерасход топлива, повышение риска возникновения поломок и аварийных ситуаций, снижение экономичности в силу роста затрат на обслуживание и ремонт оборудования. Таким образом, для предотвращения эрозии необходимо осуществлять регулярные проверки состояния компонентов для выявления проблемы на ранней стадии, а также ответственно подходить к выбору материалов: использовать более устойчивые к эрозии сплавы и покрытия.

Еще одной причиной нарушения работоспособности турбины является снижение надежности ее работы, определяемой вибрационным состоянием установки. Непосредственным источником возникновения вибрации выступает валопровод агрегата. Далее вибрационное состояние подхватывают подшипники и находящиеся в связке с ними корпуса цилиндров и фундаментные плиты. Учет вибрационного состояния турбоустановки ведется с помощью стационарной аппаратуры непрерывного контроля вибрации (согласно ГОСТ).

Вибрация может появляться и соответственно измеряется по следующим направлениям:

- вертикальная вибрация (измеряется в верхней части подшипника);
- горизонтально-осевая вибрация (измеряется на уровне оси вала);
- горизонтально поперечная вибрация измеряется аналогично предыдущей.

Для описания уровня вибрации было введено понятие виброскорости, которая измеряется прибором, регистрируется и выводится на щит управления. Однако важно учитывать, что для определения вибрации турбины недостаточно знать только амплитуду колебаний, в силу ее сложного характера во времени, представляющим синусоидальную зависимость.

Причинами возникновения вибрации также могут быть некачественное изготовление, монтаж и ремонт турбины. Все это ведет к различного рода поломкам оборудования или даже к крупным авариям. Все последствия вибрационного состояния несут накопительный характер и проявляются различным образом (трещины в роторе, дефекты/повреждения уплотнений, клапанов, опорах и передачах, нарушение жесткой связи статора и подшипников, возможно увеличение расцентровки валов). Так, например, под воздействием вибрации вал начинает вращаться в прогнутом состоянии. При чрезмерном его прогибе наблюдается задевание подвижными частями конструкции неподвижных, параллельно сопровождающееся выделением большого количества теплоты. Даже при минимальном касании неизбежен преждевременный износ уплотнений, увеличение зазоров, а, следовательно, и снижение экономичности. При нарушении контакта соединенных между собой поверхностей вала или насадных элементов (диски, втулки, уплотнения) смещается центр масс и, как следствие, наблюдается разбалансировка ротора. В условиях высоких температур посадка насадных элементов постепенно ослабевает, снижается освобождающая частота вращения, в результате чего наблюдается рост вибрации.

Опираясь на эксплуатационный опыт, около 20 % времени необходимых простоев установок связано именно с вибрацией. Однако в процессе своей работы турбина, так или иначе, подвержена вибрации. Исходя из правил эксплуатации, существуют определенные допустимые границы уровня вибрации. Продолжительная эксплуатация турбоагрегатов мощностью 200 МВт и выше разрешается, если вибрация подшипниковых опор не превышает 2,8 мм/с. При ее увеличении до 7,1 мм/с и более эксплуатация установки запрещена. Эксплуатация не разрешена и в том случае, когда в условиях установившегося режима наблюдается резкий скачок виброскорости на 1 мм/с [2].

Предотвращению ряда вышеперечисленных аспектов способствует правильно организованный процесс эксплуатации элементов системы регулирования и защиты турбоустановки, позволяющий повысить экономичность, надежность, безопасность, и немало важно обеспечить бесперебойную работу агрегата и станции в целом. Основной целью системы можно назвать поддержание на заданном уровне параметров энергии (электрической, тепловой), идущей потребителю. Помимо этого, система регулирования предупреждает возникновение аварийных ситуаций.

Работу системы можно описать с помощью статической (рис. 4) и динамической характеристик. Статическая характеристика описывает регулирование в установившемся режиме. Здесь особо выражена зависимость частоты вращения от нагрузки турбоустановки, медленно изменяющуюся и представляющую собой плавную кривую/прямую, с отсутствием перегибов.

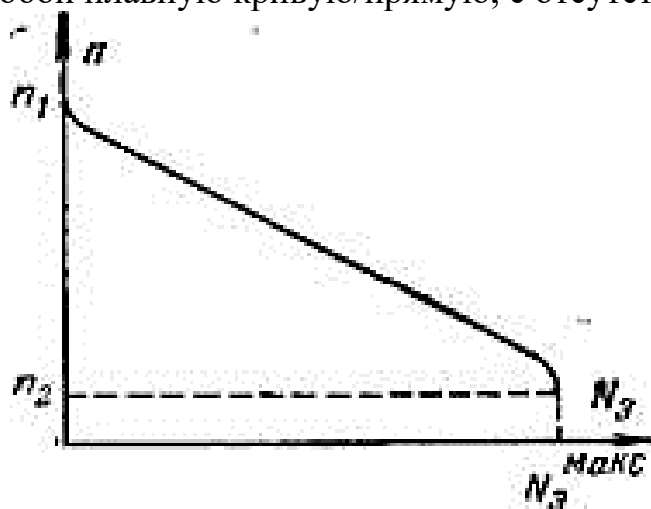


Рисунок 4 – Статическая характеристика системы регулирования

Динамическая характеристика (рис. 5) показывает работу системы в переходном процессе и представляет собой график изменения частоты вращения турбины с момента полного сброса нагрузки.

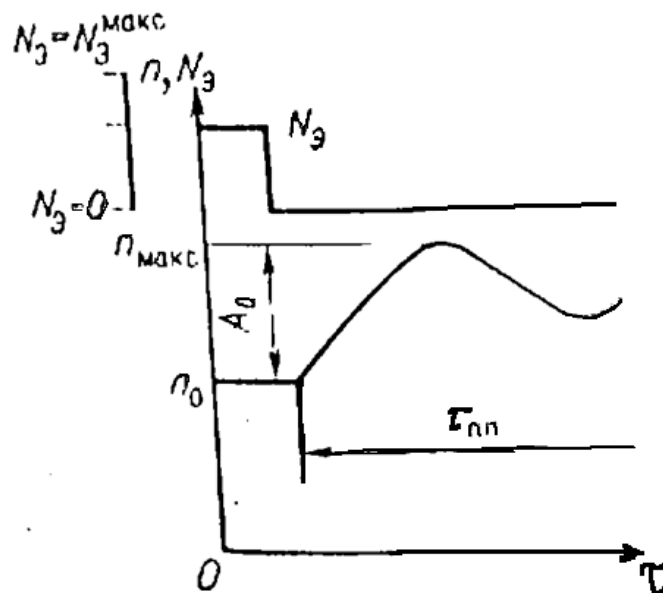


Рисунок 5 – Динамическая характеристика системы регулирования

Неполадки в работе системы обусловлены несовершенством конструкции отдельных ее элементов, неправильной наладкой (могут быть устранены в ходе ремонтно-наладочных работ), а также преждевременным износом конструкций или увеличением зазоров (устраняются в процессе капремонта).

Для нормальной работы турбины необходима постоянная или постепенно изменяющаяся нагрузка, которая зависит от условий рабочей и окружающей среды и обеспечивает экономичную и бесперебойную эксплуатацию оборудования. Так, при правильной эксплуатации турбины термические и механические напряжения в конструкции находятся в допустимых пределах. При этом турбина работает в автоматическом режиме, параллельно регулируя параметры тепловой и электрической энергии. Рабочий персонал в свою очередь должен обеспечивать постоянный контроль за основными параметрами турбоустановки (давление и температура свежего пара, промперегрева, вибрация, показатели масла, расход охлаждающей воды и т.д.), системой регулирования и защиты, механизмами и отдельными узлами, запись показаний приборов в суточную ведомость, ведение журналов учета, соблюдая при этом правила техники безопасности. При необходимости рабочие могут настраивать вспомогательное оборудование и параметры отборного пара, а также переключать и изменять нагрузку. Для достижения максимальной экономичности важно поддерживать заданные параметры пара и питательной воды, а также минимальный ее недогрев в подогревателях, оптимальный вакуум и минимальное переохлаждение конденсата в конденсаторе. Также следует обеспечивать оптимальный режим работы вспомогательного оборудования (деаэратор, испаритель, бойлерная установка и т.д.), минимизировать потери тепла и конденсата, равномерно распределять нагрузку между работающими турбинами [3].

### Заключение

Таким образом, постоянное улучшение рабочих процессов турбоустановок, непрерывное наблюдение и «уход» за введенной в эксплуатацию турбиной,

обеспечение регулярного контроля за параметрами рабочего тела и нагрузкой, учет вибрации и ее последствий, предотвращение заносов солями проточной части турбины и эрозии металлических конструкций, другими словами, обеспечение оптимальная эксплуатации турбоустановки позволяют не только поддерживать/повышать эффективность работы оборудования, но и предотвращать различного рода поломки и аварийные ситуации.

### Литература

1. Эксплуатация паротурбинных установок [Электронный ресурс] / Эксплуатация паротурбинных установок. – Режим доступа: [https://dl.libcats.org/genesis/162000/e0974750830d8f8faa28e63868f14bfa/\\_as/\[B.E.Kapelovich\]\\_YEkspluataciya\\_paroturbinnueh\\_ust\(libcats.org\).pdf](https://dl.libcats.org/genesis/162000/e0974750830d8f8faa28e63868f14bfa/_as/[B.E.Kapelovich]_YEkspluataciya_paroturbinnueh_ust(libcats.org).pdf) /. – Дата доступа: 28.09.2024.
2. Стационарные паровые турбины [Электронный ресурс] / Стационарные паровые турбины. – Режим доступа: <https://djvu.online/file/04ogQ3VKSu9xz/> /. – Дата доступа: 29.09.2024.
3. Энергобезопасность и энергосбережение. Курс на энергоэффективность [Электронный ресурс] / Энергобезопасность и энергосбережение. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/kurs-na-energoeffektivnost/viewer/> /. – Дата доступа: 20.09.2024.