

УДК 621.311.2: 65.011.56

**Быкова Татьяна Ильинична**, ст. преп.

**Шелепов Игорь Григорьевич**, канд. техн. наук, проф.

Украинская инженерно-педагогическая академия, г. Харьков, Украина. Ул. Университетская 16, г. Харьков, Украина, 61003

### РЕНОВАЦИЯ ДЕЙСТВУЮЩИХ ТЭС ПУТЕМ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ РАБОТЫ КОНДЕНСАЦИОННЫХ УСТАНОВОК

*В статье отражены вопросы оптимизации низкопотенциального комплекса тепловых электростанций. Рассмотрим задачи оптимизации.*

**Быкова Тетяна Ільївна**, ст. викл.

**Шелепов Ігор Григорович**, канд. техн. наук, проф.

Українська інженерно-педагогічна академія, м. Харків, Україна. Вул. Університетська 16, м. Харків, Україна, 61003

### РЕНОВАЦІЯ ТЕС, ЩО ДІЮТЬ, ШЛЯХОМ ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЖИМІВ РОБОТИ КОНДЕНСАЦІЙНИХ УСТАНОВОК

*У статті відображені питання оптимізації низкопотенційного комплексу теплових електричних станцій. Розглянуті задачі оптимізації.*

**Bykova Tatyana Ilinichna**, seniora teacher

**Shelepov Igor Grigorevich**, Cand. Sci. (Eng), проф.

Ukrainian engineer-pedagogical academy, Kharkov, Ukraine. Str. Universitetskaya 16, Kharkov, Ukraine, 61003

### RENOVACIYA OF OPERATING TES BY OPTIMIZATION OF MODES OF OPERATIONS OF CONDENSATION SETTINGS

*The questions of optimization of nizkopotencial'nogo complex of thermal power-stations are reflected in the article. We will consider the tasks of optimization.*

#### Назначение и принцип действия конденсационных установок

Конденсационные устройства в паротурбинных установках выполняют роль холодного источника, понижение температуры которого повышает термический КПД цикла. В холодном источнике происходит конденсация отработавшего пара. Образующийся конденсат может быть сохранен, а затем использован в качестве питательной воды для котла. Таким образом, назначением конденсационных устройств является [1]:

- создание и поддержание определенного давления (разрежения) в выхлопном патрубке турбины;
- превращение в конденсат отработавшего в турбине пара для питания им котла или парогенератора реакторной установки энергоблоков АЭС;
- удаление неконденсирующихся газов из всех пароводяных потоков, поступающих в конденсатор.

Конденсационная установка (рис. 1) состоит из: конденсатора 2, циркуляционного 10, конденсатного 3 и воздушного 4 (эжектора) насосов и двигателей для их привода, турбопроводов и арматуры.

Отработавший в турбине пар поступает в конденсатор 2, представляющий собой теплообменный аппарат (обычно поверхностного типа), в котором происходит его конденсация. Для отвода теплоты, выделяющейся при конденсации пара, через трубки конденсатора непрерывно прокачивается циркуляционным насосом 10 охлаждающая вода, которая подается из водоема или бассейна градирни. Образовавшийся в результате конденсации пара конденсат откачивается из конденсатора конденсатным насосом 3 и подается в систему регенеративного подогрева питательной воды.

В конденсатор вместе с паром поступает некоторое количество неконденсирующихся газов – кислорода и углекислоты, а из-за присосов через неплотности в системах турбоустановок, работающих под разрежением - значительно большее количество воздуха.

Наличие газов в паре ухудшает теплообмен между паром, омывающим трубки снаружи, и водой, проходящей внутри трубок, поэтому должно производиться непрерывное удаление этих газов из конденсатора с помощью специальных устройств.

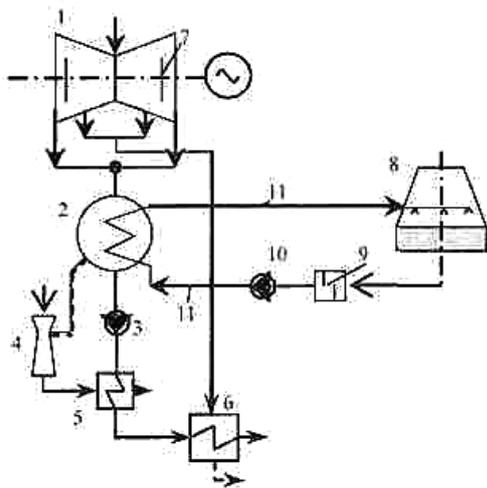


Рис. 1. Схема простейшей конденсационной установки: 1 – выхлопной патрубок; 2 – конденсатор; 3 – конденсатный насос; 4 – эжекторная установка; 5 – охладитель эжекторов; 6 – ПНД-1; 7 – последняя ступень ЦНД; 8 – система технического водоснабжения; 9 – фильтр технической охлаждающей воды; 10 – циркуляционные насосы; 11 – трубопроводы охлаждающей воды

Эту задачу выполняет воздушный насос 4, в качестве которого обычно используют пароструйный (паровой) или водоструйный (гидравлический) эжектор. Нужно отметить, что эжектор отсасывает из конденсатора не сухой воздух, а смесь пара и воздуха, в которой доля

воздуха составляет 50–60 %. Чтобы уменьшить содержание пара в отсасываемой паровоздушной смеси и излишне не загружать эжектор, каждый конденсатор имеет специально выделенную воздухоохлаждающую часть трубного пучка, расположенную на пути воздуха к трубам отсоса. Она выполнена путем удлинения хода пара к эжектору и увеличению времени контакта паров с охлаждающими трубками.

Необходимым условием конденсации пара является непрерывный отвод теплоты, выделяющийся при переходе пара в жидкость, т. е. теплоты конденсации. Этот отвод теплоты совершается в результате теплообмена конденсирующегося пара с охлаждающей водой через стенки конденсаторных трубок, образующих поверхность охлаждения конденсатора  $F_K$ . Поверхность охлаждения определяется количеством пара, которое можно сконденсировать в конденсаторе при заданных условиях теплообмена:

$$FK=Q/(\delta t_{cp}),$$

где  $Q$  – количество теплоты, передаваемой охлаждающей воде при конденсации пара, Дж/с (Вт);

$K$  – коэффициент теплопередачи, Вт/( $m^2 \cdot K$ );

$\delta t_{cp}$  – средний температурный напор (разность температур) между паром и водой, К.

В этой формуле  $F_K(m^2)$  – суммарная площадь поверхности конденсаторных трубок – может быть определена по внешнему или по внутреннему их диаметру, в зависимости от того, к какой поверхности отнесен коэффициент теплоотдачи.

В конденсатор поступает не чистый пар, а смесь пара (как правило, насыщенного или с некоторой степенью влажности) с конденсирующимися газами (в основном воздухом), которую принято называть паровоздушной смесью. По мере движения: паровоздушной смеси вдоль поверхностей охлаждения и конденсации пара его температура снижается. Это объясняется тем, что снижается парциальное давление пара, так как уменьшается его массовая доля в общей массе паровоздушной смеси. Кроме того, снижается общее давление паровоздушной смеси вследствие парового сопротивления конденсатора при обтекании потоком смеси его трубок. Особенно заметно воздух влияет на температуру пара в конце процесса конденсации.

Процесс конденсации пара можно разделить на две стадии. В первой практически отсутствует заметное влияние воздуха на температуру пара. Во второй воздух влияет не только на снижение температуры пара, но и на характер самого процесса передачи теплоты от паровоздушной смеси к охлаждающей воде.

Поскольку условия теплопередачи в начальной и конечной стадиях процесса конденсации различны, для каждой из них в конденсаторе имеется своя теплообменная зона, сконструированная с учетом присущих ей особенностей. Зону, занимающую наибольшую поверхность теплообмена, называют зоной массовой конденсации. В этой зоне протекает первая стадия процесса и конденсируется основная масса пара при ничтожно малом изменении температуры. Вторая зона, называемая воздухоохладителем, предназначена для завершения процесса конденсации.

#### Эксплуатационные характеристики конденсатора

Разрежение в конденсаторе измеряется вакууметром, который показывает разность между давлением наружного воздуха (барометрическим давлением) и абсолютным давлением в конденсаторе в мм.рт.ст. Абсолютное давление в конденсаторе, выраженное в мм. рт. ст – разность между показаниями барометра и вакуумметра.

Абсолютное давление в конденсаторе, выраженное в технических атмосферах, определяется по формуле:

$$P_K = B - H : 735,6, \text{ ата.}$$

Вакуум в конденсаторе, выраженный в процентах, определяется по формуле:

$$W_K = 735,6 - (H : 735,6) \times 100\%, \%$$

В этих формулах:

B – барометрическое давление (атмосферное) – мм. рт. ст;

H – вакуум в конденсаторе – мм. рт. ст.

Вакуум в конденсаторе, при котором получают наиболее высокие технико-экономические показатели работы турбинной установки с учетом расхода электроэнергии на привод циркуляционных насосов, называется экономическим вакуумом.

Вакуум, при котором в выходном сечении последней ступени достигнуто предельное давление, зависящее от расширительной способности косога среза рабочей решетки, и дальнейшее снижение которого не приводит к дальнейшему приросту мощности турбины, называется предельным вакуумом. Предельный вакуум не является наивыгоднейшим, обычно  $W_{K_{эк}} < W_{K_{пр}}$ .

#### Переохлаждение и кислородосодержание конденсата

Переохлаждением конденсата называется разность между температурой насыщения, найденной по давлению отработавшего пара и температурой конденсата

$$\delta t = (t_n - t_k), \text{ }^\circ\text{C.}$$

Переохлаждение конденсата ухудшает экономичность установки, поскольку увеличивается потеря тепла с охлаждающей водой и возникает необходимость в дополнительном подогреве основного конденсата за счет пара из регенеративных отборов.

Помимо присосов воздуха в конденсаторе уровня, в конденсаторе и расхода охлаждающей воды на величину переохлаждения могут также влиять: величина паровой нагрузки конденсатора, температура охлаждающей воды на вход в конденсатор.

Для того, чтобы, или, по возможности, уменьшить переохлаждение конденсата в зимнее время при низкой температуре охлаждающей воды, следует на этот период сокращать расход воды через конденсаторы. Помимо уменьшения переохлаждения конденсата, этим достигается сокращение расхода электроэнергии на собственные нужды.

Однако, в условиях эксплуатации на АЭС, с целью исключения отложений на внутренних поверхностях охлаждающих трубок, которые наиболее проявляются при низких скоростях циркуляционной воды, расход воды в зимний период не сокращают.

С явлением переохлаждения конденсата тесно связано насыщение его коррозионно-активными газами, в частности кислородом. Это объясняется тем, что при охлаждении конденсата ниже температуры насыщения происходит интенсивное поглощение газов из парогазовой смеси, имеющей большую концентрацию газа на поверхности раздела фаз.

В процессе конденсации, падающие с трубок капли и струйки подвергаются механическому и тепловому воздействию пара, двигающегося в межтрубном пространстве, вследствие чего происходит деаэрация конденсата. Таким образом, двигаясь в направлении конденсатосборника, капли, попадая то на трубку, то в паровой поток, попеременно насыщаются и освобождаются от кислорода. Окончательное кислородосодержание капли конденсата зависит от параметров паровоздушной смеси, находящейся над зеркалом конденсатосборника. При этом если давление кислорода в конденсате будет больше его парциального давления над водой, то процесс дегазации конденсата будет происходить и дальше.

При больших присосах воздуха наблюдается повышение кислородо-содержания конденсата; особенно недопустимо проникновение воздуха через неплотности в зону вакуумной системы, заполненной конденсатом.

В этом случае даже минимальные присосы вызывают резкое повышение кислородосодержания конденсата. Источниками заражения конденсата кислородом могут быть неплотности сварных соединений конденсатосборника, во фланцевых соединениях конденсаторопроводов, в сальниковых уплотнениях насосов и вакуумных задвижек, корпусов насосов, находящихся под разрежением.

"Заражение" основного конденсата может происходить при подводе в конденсатосборник под уровень конденсата различных потоков, содержащих растворенный кислород (дренаж греющего пара ПНД, дренаж из холодильников эжекторов, добавочная вода из БЗК и т.д.).

В правилах техники эксплуатации (ПТЭ) приводятся следующие нормы для конденсата в установках высокого давления :

- жесткость для установок с барабанными котлами – до 1 мкг-экв/кг.
- содержание кислорода (при нагрузке более 50 %) – не более 20 мкг/ кг.

#### **Воздушная плотность конденсатора**

Воздух и другие неконденсирующиеся газы попадает в конденсатор двумя путями: с паром и через неплотности вакуумной системы турбины.

Количество неконденсирующихся газов, поступающих в конденсатор с паром, невелико и составляет величину порядка нескольких процентов от общего количества удаляемого из конденсатора воздуха.

Таким образом, основное количество газов, удаляемых из конденсатора, составляет воздух, проникающий из атмосферы через неплотности элементов турбоустановки, находящихся под разрежением.

Воздух в конденсатор проникает через фланцевые соединения, штоки клапанов, штуцеры водомерных стекол, другие узлы конденсатора, не обладающие достаточной герметичностью, а также через дефекты сварных соединений.

Помимо герметичности собственно конденсатора, плотность вакуумной системы зависит также от герметичности всех остальных элементов турбоустановки, находящихся под вакуумом: регенеративных подогревателей низкого давления, концевых уплотнений корпуса турбины (ЦНД) продувочных линий и т. д.

При значительном понижении паровой нагрузки величина присоса воздуха, как правило, увеличивается, поскольку под разрежением оказываются все новые участки корпуса турбины и регенеративной установки.

Воздух, попадая в паровой объем конденсатора, существенно ухудшает коэффициент теплоотдачи от конденсирующегося пара к стенке конденсаторных трубок.

Еще одним источником тепловых потерь вследствие подсоса воздуха в вакуумную часть является переохлаждение конденсата при конденсации пара из паровоздушной смеси. В этих условиях деаэрирующая способность конденсатора резко падает, и конденсат сильно насыщается кислородом.

Повышение содержания кислорода в конденсаторе увеличивает коррозию водяного тракта от конденсатора до деаэрационной установки.

Такое неблагоприятное влияние воздуха на рабочие процессы в конденсаторе требует от эксплуатационного персонала цеха проведения серьезных работ по поддержанию плотности вакуумной системы.

Количество воздуха, поступающего в вакуумную систему, например, турбины К-200-130, не должна превышать – 20 кг/час (6 г/сек). Увеличение присоса воздуха на 3 г/сек (10 кг/час) приводит к повышению давления всасывания эжекторов на 0,2–0,6 кПа и понижению вакуума на 0,1–0,3 %.

Наиболее совершенным методом оценки воздушной неплотности вакуумной системы турбины является изменение расхода воздуха с помощью воздухомера, установленного на выхлопном патрубке пароструйного эжектора. При нормальной работе эжектора над выхлопным отверстием воздухомера установлено свободное отверстие. При производстве измерений последовательным подключением в порядке возрастания номеров диафрагм подбирается такая, которая обеспечивает перепад не менее 30-40мм. Предельный перепад не должен быть более 70 мм.вод.ст. Затем по специальной номограмме по величине перепада и номеру диафрагмы определяют расход воздуха.

### **Загрязнение поверхности теплообмена конденсатора**

Загрязнение конденсатора с водной стороны является наиболее частой причиной ухудшения вакуума. При этом ухудшение вакуума происходит как вследствие увеличения термического сопротивления за счет загрязнения трубок, так и за счет некоторого сокращения расхода воды через конденсатор вследствие повышения гидравлического сопротивления последнего.

Интенсивность загрязнения конденсаторов зависит в основном от качества охлаждающей воды, времени года и условий эксплуатации.

По своему характеру загрязнения могут быть разбиты на три группы:

- механические;
- биологические;
- солевые.

**Механические загрязнения** – это засорение конденсаторных трубок и трубных досок щепой, травой, землей, листьями, водорослями, ракушками, рыбой и т.п. Эти загрязнения, как видно из его составляющих, носят сезонный характер и особенно усиливаются весной и осенью. Механические загрязнения, в отличие от остальных, могут весьма быстро перекрыть трубки конденсаторов и почти полностью прекратить доступ охлаждающей воды в конденсатор, вызвав тем самым аварийный останов турбины.

Эффективным способом предупреждения механических загрязнений является установка подвижных сеток на всасе циркуляционных насосов.

**Биологические загрязнения** представляют собой отложения живых простейших микроорганизмов и водорослей, называемых биологическими обрастаниями. Биологические обрастания вызывают значительные снижения теплопередачи и увеличения гидравлических потерь. Существенное влияние на интенсивность обрастания конденсаторных трубок оказывают температурные условия. Опыт эксплуатации показывает, что зимой обрастание в ряде случаев происходит более интенсивно, чем летом. Объясняется это тем, что в холодное время температурные условия в конденсаторе (10–20 °С), наиболее благоприятны для развития бактерий, в то время как летом температура стенки трубок может достигать 40 °С и выше, при этой температуре большинство микроорганизмов погибает. Биологические отложения способствуют прилипанию песчинок и других механических примесей. Все эти обстоятельства требуют разработки эффективных мероприятий по предотвращению и удалению биологических загрязнений конденсатора. Эти мероприятия можно классифицировать на химические, термические и механические.

**Солевые загрязнения конденсаторов** – это отложения на внутренней поверхности трубок накипи, создающей большие термические сопротивления теплопередаче. Выпадение накипи происходит при охлаждении конденсаторов минерализованной водой, содержащей соли временной жесткости. Чисть этих солей в определенных условиях распадается с

образованием накипи на стенках трубок и водяных камер конденсаторов. Такие условия создаются в оборотных системах водоснабжения, где за счет испарения и уноса воды соледержание охлаждающей воды растет, и при достижении предельного значения карбонатной жесткости начинается распад бикарбонатов кальция и магния с выпадением солей и выделением углекислоты. Особенно ускоряет процесс выпадения солей, повышение температуры воды и уменьшение содержания в воде углекислого газа. Снижению содержания углекислого газа в циркуляционной воде способствует применение градирен и брызгальных устройств, в которых из-за дробления потоков воды на струи и капли происходит интенсивное выделение свободной углекислоты.

Учитывая то, что накипь чрезвычайно плотно соединяется с металлом трубок и очистка конденсаторов от нее чрезвычайно затруднительна, необходимо особое внимание уделять профилактике солевых загрязнений.

Обычно все эти типы загрязнений не встречаются в "чистом виде", а загрязнение конденсатора носит комбинированный характер.

Борьба с различными видами отложений на трубках конденсаторов ведется путем периодических очисток данных поверхностей или путем организации мероприятий профилактического характера, предотвращающих образование отложений. Все способы периодических очисток охлаждаемых поверхностей обладают одним принципиальным недостатком: они не обеспечивают длительной работы конденсатора без загрязнения его поверхности между двумя очередными очистками.

В целях борьбы и предотвращения образования отложений в конденсаторах применяются [2]:

- термическая сушка трубной системы;
- отмывка химическими реагентами;
- магнитная обработка охлаждающей воды;
- использование высоконапорных устройств типа «Хаммельман»;
- применение системы шариковой очистки (СШО), как отечественного производства,

так и зарубежного, например фирмы «**Taprogge**», Германия.

В настоящее время наиболее эффективным способом борьбы с загрязнениями трубной системы является СШО, которая устраняет и предотвращает микробиологические загрязнения в охлаждающих трубках конденсаторов, создает в них свободное течение охлаждающей воды, что гарантирует оптимальный теплообмен и минимальные потери давления в конденсаторе. При этом фильтры охлаждающей воды предотвращают макрозагрязнения трубных досок и забивания охлаждающих трубок конденсаторов, что гарантирует циркуляцию очищающих шариков.

#### **Выводы**

Применение системы шарикоочистки позволяет:

- увеличить мощность турбоагрегата в среднем на 2 %;
- остановить коррозию охлаждающих трубок;
- избежать отложений в трубках, эрозии из-за засорения трубок, забиваний трубок;
- повысить срок службы трубок и трубных досок;
- исключить трудоемкие очистки конденсаторов и кислотные промывки.

#### **Список использованной литературы:**

1. Шелепов И. Г., Заруба В, Яцкевия С. В. Теплоэнергетические установки электростанций. Киев. – 1993. – 198 с.
2. Кострыкин В. А., Шелепов И. Г. «Определение и исследование диагностических признаков НПК энергоблоков АЭС». Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 6/2(18). – 2005. – С. 149–152.

#### **Referenses:**

1. Shelepov I. G., Zaruba V., Yatskevich S. V. Thermal power settings of power-stations [Теплоэнергетические установки электростанций]. Киев. –1993. – 198 p.
2. Kostykin V. A., Shelepov I. G. Determination and research of diagnostic signs of NPK of power units of the AES [Определение и исследование диагностических признаков НПК энергоблоков АЭС]. Vostochno-evropeyskiy magazine of front-rank technologies. 6/2(18). – 2005. – P. 149–152.

Поступила в редакцию 22.04 2015 г.