

Обобщенная функция полезности с учетом экологического фактора примет вид:

$$D = \exp \left\{ -\frac{1}{3} \left[ \exp(64,048 - 0,186 \cdot b_j) + \exp(-301,7 + 308,6 \cdot K_z) \right] \right\} \left[ + \exp(40,4 - 0,268 \cdot NO_x) \right] \quad (8)$$

### Литература

1. Борушко, А.П. Управление качеством в энергосистеме. – Мн.: Выш. шк., 1981. – 98 с.
2. Щинников, П.А. Перспективы энергоблоков ТЭЦ в условиях экологических ограничений Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2000. – №3. – с.59-65.
3. Карницкий, Н.Б. Решение задач синтеза надежности с помощью мультипликативных критериев оптимальности // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2001 – № 3. – с. 115-119.
4. <http://president.gov.by/Minpriroda/rus/publ/nd2000>

УДК 621.311.22

### Влияние отложений в проточной части на надежность и экономичность работы турбины

Карницкий Н.Б., Чиж В.А., Нерезько А.В.

Белорусский национальный технический университет

В последние годы энергетика Беларуси и большинства развитых стран мира испытывает определенные трудности в связи со снижением надежности и экономичности работы проточных частей паровых турбин. Белорусская энергосистема имеет в своем составе турбоагрегаты различных параметров:

- турбины среднего давления АПР-6, АР-6, Р-6, ВПТ -25 (Барановичская, Брестская и Пинская ТЭЦ);
- высокого и сверхвысокого давления К-160, Т100, Р50, ПТ-60, Р-130 (Березовская ГРЭС, Минская ТЭЦ-4, Мозырьская ТЭЦ, Гродненская ТЭЦ-2, Новополоцкая ТЭЦ);
- сверхкритического давления Т-250, К-300 (Минская ТЭЦ-4, Лукомольская ГРЭС).

Одной из основных проблем при эксплуатации приведенных турбин является загрязнение их проточных частей отложениями. Это связано со сложностью физико-химических процессов протекающих в теплоносителе, недостаточно оперативным химическим контролем за параметрами теплоносителя, а иногда неправильно выбранным водно-химическим режимом. Наличие отложений приводит к уменьшению проходных сечений, увеличению сопротивления по тракту за счет роста как скоростей пара, так и шероховатости поверхностей элементов турбины. Это приводит к снижению внутреннего относительного КПД турбины и вырабатываемой ею мощности. Химический состав отложений однозначно указывает на то, что источником их появления являются примеси содержащиеся в паре. В результате исследований была выявлена зависимость распределения отложений по ступеням турбины и обнаружено наличие свыше 150 химических соединений, имеющие характерные связи между составом отложений и типом котла.

Турбины среднего давления работают с парогенераторами барабанного типа. В питательной воде таких парогенераторов всегда присутствуют хлориды, сульфаты и бикарбонаты или карбонаты натрия, кремниевая кислота, органические вещества, а также продукты коррозии. Отложения в проточной части турбин среднего давления находятся в связи с начальными параметрами пара, преимущественно состоят из солей натрия, такие, как  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{Na}_3\text{PO}_4$  и  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . В общем количестве отложений содержание солей натрия составляет 90-95%. Другие компоненты, а именно окислы железа, свободная кремнекислота ( $\text{SiO}_2$ ), соединения кальция и магния, находятся в незначительном количестве.

С ростом рабочих параметров, в частности давления, возрастают требования в чистоте теплоносителя, поэтому для паровых турбин высокого и сверхвысокого давления компонентами растворенных примесей питательной воды являются хлориды, сульфаты и фосфаты натрия, а также свободная кремнекислота. В отложениях, образующихся в проточной части паровых турбин высокого давления, встречаются все примеси, содержащиеся в перегретом паре. В их расположении по длине проточной части турбин наблюдается определенная закономерность, согласующаяся с имеющимися данными о растворимости индивиду-

ливых веществ в перегретом паре. В цилиндре высокого давления (ЦВД) в отложениях обычно преобладают соли натрия (20 – 70%), окислы железа и меди (40 – 70%). В цилиндре низкого давления (ЦНД) преобладают свободная кремнекислота (40 – 80%) и окислы железа (10 – 12%). Содержание соединений кальция и магния в отложениях менее 5%. Количество отложений по отдельным ступеням турбины распределяется очень неравномерно. Как правило, на самых первых по ходу пара ступенях турбин высокого и среднего давления абсолютное количество отложений хоть и мало, однако влияние их на экономические характеристики исключительно велико. На последующих ступенях количество отложений возрастает, достигает максимума и снова снижается. Ступени влажного пара обычно бывают чистыми в связи с появлением жидкой фазы, которая способствует переходу примеси из парового раствора в водный, предотвращая выпадение ее в виде твердой фазы. Область расположения максимума отложений у разных турбин различна, которая связано с составом примесей пара, их концентрацией, с конструктивными особенностями турбины и режимом эксплуатации. Распределение отложений по поверхности отдельных ступеней турбины также характеризуется большой неравномерностью. Толщина отложений бывает больше на выпуклой части и у выходных кромок лопаток, а также вблизи мест крепления лопаток, в местах стыков бандажей.

Турбины сверхкритического давления (СКД) работают на паре, вырабатываемом прямоточными парогенераторами. Специфика данных парогенераторов требует исключительно высокое качество теплоносителя. Использование 3-х ступенчатой схемы обессоливания исходной воды и БОУ, позволяет практически полностью исключить щелочноземельные отложения. Наиболее опасными являются отложения из окислов меди и окислов железа, которые появляются в теплоносителе в результате коррозионно-эрозионных процессов по пароводяному тракту и отлагаются на ступенях ЦВД. По поверхностям лопаток отложения распределяются довольно равномерно. При длительной работе в интервале давлений от 190 до 90 ата процент их содержания в отложениях достигает 90 – 95%, а в зоне более низких (100 – 55 ата) давлений снижается до 60 – 80%. Содержание окислов железа колеблется в пределах 5 – 20%, содержа-

ние кремнекислоты, оксидов цинка и никеля менее 1%. Как показывают наблюдения за качеством пара СКД в условиях стационарной работы блока, концентрации окислов железа и меди в паре, поступающем в турбину, близки к значениям их растворимостей, т. е. перегретый пар начальных параметров является насыщенным паровым раствором по отношению к этим веществам. При расширении пара в турбине с уменьшением давления и температуры растворимость примесей в паре уменьшается. Изменение растворимостей  $Fe_3O_4$ ,  $CuO$ ,  $NaCl$  и  $SiO_2$  по ступеням турбины К-300-240 показано на рис. 1. Для окислов железа и меди, которые в паре начальных параметров находились в состоянии насыщенного раствора, состояние пересыщения наступает уже на первых ступенях турбины, и здесь начинаться их выделение в твердую фазу.

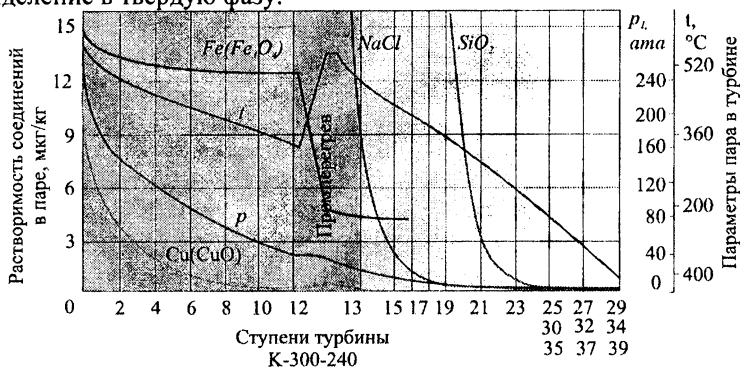


Рис. 1. Изменение параметров пара и растворимости различных соединений по ступеням турбины К-300-240

Так как растворимость окислов меди снижается быстрее, чем окислов железа, то область выделения окислов меди распространяться на меньшее число ступеней, чем для окислов железа. В ЦНД и ЦНД качественный состав отложений такой же, как и у турбин высокого давления.

Для удаления отложений в проточной части турбины сегодня используют механический и химический способ. Недостатком первого способа является то, что очистку турбины можно производить в период капитального ремонта и наряду с удалением окислов меди и железа с рабочих лопаток снимается слой металла. В результате поверхность лопаток и сопел становится

шероховатой, что приводит к снижению экономичности турбины, сокращению сроков службы лопаток и способствует ускоренному заносу проточной части. Наиболее эффективным методом удаления отложения является химический способ, позволяющий существенно сократить трудозатраты на механическую очистку. Промывку можно производить как на ходу, так и во время капитального ремонта.

УДК 621.311.22

### **Повышение эффективности использования топлива и экологических показателей газовых котлов при использовании теплоты уходящих газов**

Жихар Г.И., Закревский В.А.

Белорусский национальный технический университет

Актуальность повышения эффективности использования газа в народном хозяйстве растет. Это связано с увеличением его удельного веса в топливном балансе страны и с ростом его стоимости.

В связи с отсутствием при сжигании природного газа потерь теплоты в результате механической неполноты сгорания, близостью к нулю потерь с химической неполнотой сгорания и небольшой потерей теплоты в окружающую среду единственной потерей теплоты в котлах, о дальнейшем снижении которой, может идти речь, является потеря с уходящими газами, которая равна 5-6 % по отношению к низшей теплоте сгорания топлива.

Следовательно, в котельных установках, работающих на природном газе, единственным путем существенного улучшения использования топлива является глубокое охлаждение продуктов сгорания до такой температуры, при которой удастся сконденсировать максимально возможную часть водяных паров, содержащихся в газах и использовать выделяющуюся при конденсации скрытую теплоту. Кроме этого глубокое охлаждение газов позволяет более полно использовать и так называемую явную (физическую) теплоту газов.

Для использования теплоты уходящих газов на котле ГМ-50-14 Жодинской ТЭЦ установлен контактный экономайзер ЭМ-6, предназначенный для подогрева воды, используемой на ХВО