

УДК 612.165 : 311.25 : 621.039

И.Г. ШЕЛЕПОВ, канд. техн. наук, проф., В.А. КОСТРЫКИН, канд. техн. наук,  
Д.В. МИХАЙСКИЙ, аспирант

*Украинская инженерно-педагогическая академия*

## **МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ СРОКОВ ЧИСТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТЕПЛООБМЕНА КОНДЕНСАТОРОВ ПАРОВЫХ ТУРБИН**

У даний час, при експлуатації старіючого устаткування ТЕС і АЕС і різкої зміни графіків електричних навантажень, одним з ефективних способів підвищення економічності є розробка і впровадження профілактичних заходів щодо усунення і попередження відмов в роботі устаткування. Для конденсаційних установок, одним з істотних способів є чищення поверхонь конденсаторів. Ефективність чищення конденсаторів багато в чому визначається термінами і способами чищення. Пропонується методика визначення оптимальних термінів чищення з урахуванням температури охолоджуючої води, її забруднення, режиму роботи енергоблоку і вибору оптимального способу для умов конкретних ТЕС і АЕС.

Presently, during exploitation of senescent equipment of station sharp change of the graphs of the electric loadings, one of effective methods of increase of economy is development and introduction of prophylactic measures on the removal and warning of refusals in work of equipment. For condensation options, one of substantial methods is cleaning of surfaces of condensers. Efficiency of cleaning of condensers in a great deal is determined by terms and cleaning methods. The method of determination of optimum terms of cleaning taking into account the temperature of cooling water, its contamination, mode of operations of power unit and choice of optimum method for the terms of concrete station is offered.

Поскольку в ближайшее время проблемы реабилитации ТЭС не могут быть решены путем глобальных реконструкций оборудования, то по нашему мнению одним из реальных вариантов является совершенствование режимов эксплуатации оборудования, как отдельных элементов (котлов, турбин, генераторов), так и энергоблоков в целом. Для решения этого вопроса необходима оптимизация режимов эксплуатации, с учетом достижения отечественной и мировой науки в области энергетики и новых технологий.

Весьма существенное влияние на показатели эффективности ТЭС оказывают низкопотенциальные комплексы, и их основной элемент конденсатор. Изменение режимов работы энергоблоков и качества охлаждающей воды приводят к интенсивному загрязнению поверхности теплообмена конденсаторов, а следовательно к снижению вакуума и значительному росту затрат на поддержание чистоты поверхностей охлаждения конденсаторов [1, 10]. Загрязнение конденсаторов приводит:

- к снижению мощности энергоблоков (недовыработка электроэнергии);
- при увеличении давления на 1 кПа мощность турбины в конденсационном режиме уменьшается на 0,8 – 0,9% или настолько же возрастает удельный расход топлива;
- увеличению эксплуатационных затрат;
- к ухудшению экономичности энергоблоков.

Одновременно с этим поддержание чистоты конденсаторов требует дополнительных затрат, приводит к недовыработке электроэнергии в период чисток [2]. В этой связи возникает проблема оптимизации режимов чистки конденсаторов.

В основу математической модели определения оптимальных сроков чистки поверхностей конденсаторов принята методика [3], которая усовершенствована

авторами путем учета и анализа многолетних статистических данных условий эксплуатации элементов низкочастотных комплексов энергоблоков Змиевской ТЭС, Зуевской ТЭС, Запорожской АЭС.

Отличие предлагаемой методики определения оптимальных сроков чистки от существующих заключается в следующем:

Вместо независимой оптимизации каждого интервала между чистками [4-7] предлагается оптимизация на некотором характерном интервале времени  $T$ . За время выбирается межремонтный период. В этом случае реализуется оптимальное расположение на временной оси моментов отключения конденсатора на очистку, т.е.

$$(k + 1) \cdot \tau_{\text{ч}}^{\text{opt}} + k\Delta\tau = T, \quad (1)$$

где  $k$  – количество отключений конденсатора на чистку за межремонтный период;

$T$  – межремонтный период блока, час;

$\Delta\tau$  – продолжительность чистки конденсатора, час;

$\tau_{\text{ч}}^{\text{opt}}$  – оптимальный интервал между двумя чистками, час [3].

Предлагается учет неравномерности температуры охлаждающей воды за период  $T$  путем пересчета промежутков между чистками, т.е. введения неравных интервалов между чистками в течение времени  $T$ .

Во всех существующих ныне методиках в качестве экспериментального материала берутся либо результаты обработки данных текущего контроля за работой конденсатора, либо результаты испытаний исследуемого конденсатора.

В предлагаемой же методике выбирается полуаналитическая модель загрязнения конденсатора в зависимости от качества охлаждающей воды и условий станции, таким образом, давление в загрязненном конденсаторе прогнозируется по этой модели.

Последовательность определения оптимальных сроков чистки по предлагаемой методике следующие:

1) Ввиду участия реального энергоблока в регулировании мощности энергосистемы вводится понятие средней мощности  $N_{\text{ср}}$ , равной среднеинтегральной за определенный характерный период и рассчитываемый по графику нагрузки энергоблока. Расход пара  $D_2$  т/час, отвечающий рассчитанной средней мощности

$$D_2 = N_{\text{ср}} \frac{D_{2\text{э}}}{N_{\text{ном}}}, \quad (2)$$

где  $D_{2\text{э}}$  – расход пара, подаваемого в конденсатор при номинальном режиме, т/ч;  $N_{\text{ном}}$  – номинальная мощность блока, МВт.

2) Строится зависимость изменения температуры охлаждающей воды на входе в конденсатор от времени на исследуемом периоде  $T$ , данные прогнозируются вперед по опытным значениям предыдущего года аналогичных дней и месяцев. Определяется среднеинтегральная температура  $t_{\text{в1}}$  охлаждающей воды за период  $T$ .

3) По нормативным характеристикам [7], [9] конденсатора того же типа, что и исследуемый, но с максимально чистой в условиях электростанций охлаждающей поверхностью, строится зависимость изменения давления в конденсаторе от температуры охлаждающей воды при тех же режимных параметрах расходе пара, расходе воды.

По этой зависимости определяется давление в чистом конденсаторе  $P_k$  при данном расходе пара, расходе воды и среднеинтегральной температуре охлаждающей воды.

4) Производится расчет параметров чистого конденсатора [6].  
Кратность охлаждения

$$m = \frac{W \cdot \rho_{\text{в}}}{D_2 \cdot 1000}, \quad (3)$$

где  $\rho_{\text{в}}$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;

$W$  – расход охлаждающей воды в конденсаторе, м<sup>3</sup>/ч.

Скорость охлаждающей воды в трубке конденсатора определяется по формуле,  
м/с

$$w = \frac{W \cdot 10^6}{\frac{\pi \cdot d_{\text{в}}^2}{4} \cdot z \cdot N_T \cdot 3600}, \quad (4)$$

где  $d_{\text{в}}$  – внутренний диаметр трубки, мм;

$z$  – число ходов конденсатора;

$N_T$  – число трубок в конденсаторе.

Нагрев воды в конденсаторе определяется из уравнения теплового баланса конденсатора

$$\Delta t_{\text{в}} = \frac{\Delta h_{\text{к}}}{m \cdot C_{p\text{в}}}, \quad (5)$$

где  $\Delta h_{\text{к}}$  – разность теплосодержаний пара и конденсата, кДж/кг;

$C_{p\text{в}}$  – удельная изобарная теплоемкость воды, кДж/кг град.

Рассчитывается коэффициент теплопередачи чистого конденсатора, Вт/м<sup>2</sup>°С

$$K_{\text{норм}} = \frac{W \cdot C_{p\text{в}} \cdot \rho_{\text{в}} \cdot 4,1868 \cdot 10^8}{F \cdot 3600} \cdot \ln \frac{t_s - t_{\text{в}1}}{t_s - t_{\text{в}2}}, \quad (6)$$

где  $F$  – площадь поверхности охлаждения, м<sup>2</sup>;

$t_s$  – температура насыщения, °С;

$t_{г2}$  – температура охлаждающей воды на выходе из конденсатора, °С.

Термическое сопротивление чистого конденсатора,  $\frac{\text{М}^2 \cdot \text{°С}}{\text{Вт}}$

$$R_{\text{норм}} = \frac{1}{K_{\text{норм}}} \quad (7)$$

Средняя температура воды в трубке, °С

$$t_{г} = \frac{t_{г1} + t_{г2}}{2} \quad (8)$$

5) Для определение интенсивности накипобразования  $I$ , г/м<sup>2</sup> в зависимости от времени после последней чистки. Принята экспериментальная формула, приведенная в [9] применительно к накипи, содержащей преимущественно Ca<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>

$$\left. \begin{aligned} I &= 0,6 \left( \frac{L}{d_{г}} \right)^{0,25} \cdot w^n \cdot Ж^k \cdot t^{-q} \cdot \tau^{0,5} \\ n &= -0,13 \cdot \tau^{\frac{1}{3}} \\ k &= 0,02 \cdot \tau^{\frac{1}{3}} \\ q &= 0,05 \cdot \tau^{\frac{1}{4}} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где  $L$  – длина трубки, м;

$Ж$  – жесткость охлаждающей воды,  $\frac{\text{Мг} - \text{экв}}{\text{л}}$ , определяется по экспериментальным данным станции;

$\tau$  – время после последней чистки, час.

6) Производится расчет толщины слоя загрязнения  $\delta$ , мм.

Масса осевшей в трубке накипи

$$m = I \cdot F_{г} = \rho_{\text{отл}} \cdot V, \quad (10)$$

где  $F_{г}$  – площадь внутренней поверхности трубки, м<sup>2</sup>

$$F_{г} = \pi \cdot d_{г} \cdot L, \quad (10a)$$

$L$  – длина трубки, м;

$\rho_{\text{отл}}$  – плотность отложений, кг/м<sup>3</sup>, задается по экспериментальным данным химцеха станции;

$V$  – объем отложений, м<sup>3</sup>

$$V = F_{\delta} \cdot L, \quad (11)$$

где  $F_{\delta}$  – площадь слоя отложений в трубке конденсатора, м<sup>2</sup>

$$F_{\delta} = \pi \delta (d_e - \delta),$$

где  $\delta$  – толщина слоя отложений, м.

С учетом этого уравнение (11) преобразуется к виду

$$V = \pi \cdot \delta (d_e - \delta) \cdot L. \quad (11a)$$

Из совместного решения уравнений (10) и (11a). Из этого получаем квадратное уравнение для определения толщины слоя загрязнения

$$\frac{I \cdot d_e}{\rho_{отл}} + \delta^2 - d_e \cdot \delta = 0.$$

Корнями этого уравнения являются

$$\delta_{1,2} = \frac{d_e}{2} \pm \sqrt{\frac{d_e^2}{4} - \frac{I \cdot d_e}{\rho_{отл}}}.$$

В последней формуле физический смысл имеет только "минус" перед корнем, поэтому окончательная формула принимает вид

$$\delta = \frac{d_e}{2} - \sqrt{\frac{d_e^2}{4} - \frac{I \cdot d_e}{\rho_{отл}}}, \quad (12)$$

7) С учетом (12) производится расчет параметров загрязненного конденсатора.

Термическое сопротивление слоя загрязнения,  $\frac{\text{м}^2 \cdot \text{°С}}{\text{Вт}}$

$$R_{эксп} = \frac{\delta}{\lambda} \cdot 10^{-3}, \quad (13)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности отложений, (определяется по экспериментальным данным станции),  $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{°С}}$

Коэффициент теплопередачи загрязненного конденсатора,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°С}}$

$$K_{эксн} = \frac{1}{R_{норм} + R_{эксн}}, \quad (14)$$

$\Delta t_{нас}$  – температура насыщения в загрязненном конденсаторе, °С

$$t_{нас} = t_{с1} + \frac{\Delta t_с}{1 - e^{-\frac{kF}{\rho_s W_{сс}}}}, \quad (15)$$

где  $\Delta t_с$  – нагрев воды в конденсаторе, °С

$P_{эксн}$  давление пара в загрязненном конденсаторе определяется по температуре насыщения  $t_{нас}$  [8].

8) Увеличение давления в конденсаторе в результате загрязнения в зависимости от времени имеет вид:

$$\Delta P_2(\tau) = P_{эксн}(\tau) - P_s, \quad (16)$$

где  $P_{эксн}(\tau)$  – давление в загрязненном конденсаторе в зависимости от времени после последней чистки

$P_s$  – давление в чистом конденсаторе,

9) Для определения  $\Delta P_2(\tau)$  предлагается использовать выражение [9]

$$\Delta P_2 = a_{p2} \cdot \tau^n, \quad (17)$$

где  $a_{p2}$ ,  $n$  – эмпирические константы, определяемые обработкой кривой с помощью парного регрессионного анализа.

По критерию Фишера [9] выбирается лучший вариант из двухстепенной зависимости или прямой.

В результате исследований математической модели загрязнения получены значения для степени "n" в (17)  $n \sim 0,5 - 0,85$ , во многих случаях (при увеличении температуры охлаждающей воды) степень "n" приближается к единице, а зависимость  $\Delta P_2(\tau)$  – к линейной, что соответствует полученным ранее данным из литературных источников (например, [4], [7]). Критерий Фишера во всех рассчитанных вариантах имел высокое значение, значительно большее табличного значения критерия Фишера, гарантирующего адекватность модели.

10) Определение эмпирического коэффициента  $a_n$  – поправки к мощности в результате увеличения давления в конденсаторе.

В нормативных характеристиках конденсатора [7] имеется зависимость мощности турбины от давления в конденсаторе. По давлению  $P_s$  чистого конденсатора определяется значение мощности  $N_{cp}$  минус некоторая постоянная (т.е. с графика нормативов снимается значение мощности по оси ординат от нулевой точки в соответствующем масштабе).

Затем рассчитывается среднеинтегральное изменение давления  $\Delta P_{2cp}$  на интервале времени  $T$ .

Принимается значение давления в загрязненном конденсаторе на интервале времени  $T$ , как

$$P_{экс} = P_s + \Delta P_{2cp}. \quad (18)$$

Тогда по  $P_{экс}$  из графика нормативов находим соответствующее значение мощности  $N_{экс}$ .

Искомый коэффициент

$$a_N = \frac{|N_{cp} - N_{экс}|}{P_{экс} - P_s}, \quad (19)$$

т.е. принимается, что нормативная зависимость  $N(\Delta P_2)$  хорошо аппроксимируется прямой

$$\Delta N = a_N \cdot \Delta P_2, \quad (20)$$

11) Динамика падения мощности блока может быть представлена в окончательном виде

$$N_{эксн} = N_{cp} - a\tau^n, \quad (21)$$

Коэффициент, учитывающий влияние загрязнения трубок на мощность энергоблока

$$a = a_{p2} \cdot a_N, \quad (22)$$

где  $N$  – мощность блока в момент времени  $\tau$ , МВт.

12) Определение оптимального срока чистки.

В настоящее время конденсационные установки крупных турбин ТЭС и АЭС проектируются таким образом, чтобы можно было реализовать возможность отключения части конденсационной установки на чистку без останова всего блока. Поэтому необходимо учесть степень уменьшения мощности при отключении части конденсатора на чистку коэффициентом "С", величина которого определяется по данным контроля персонала станции за работой турбоагрегата

$$C = \frac{N_{откл}}{N_{cp}}, \quad (23)$$

где  $N_{откл}$  – мощность, вырабатываемая блоком после отключения части конденсатора на чистку, МВт.

Математическая формулировка задачи минимизации суммарных потерь вследствие загрязнения конденсатора, связанных с недовыработкой электроэнергии и перерасходом топлива, затратами на замыкающую электроэнергию в периоды чисток и затратами на их проведение, может быть представлена в виде:

$$\begin{cases} \Phi = \epsilon_3 \cdot C_t \left[ N_{cp} \cdot T - (k+1) \int_0^{\tau_{2opt}} (N_{cp} - a \cdot \tau^n) d\tau - k \cdot \Delta\tau \cdot C \cdot N_{cp} \right] + k \cdot \tau \\ (k+1)\tau_2^{opt} + k\Delta\tau = T \end{cases}, \quad (24)$$

где  $\epsilon_3$  – удельный расход топлива, г.у.т./(кВт час);

$C_t$  – стоимость 1 т условного топлива, грн./т.у.т.;

$Z_ч$  – затраты на чистку, грн.

Таким образом по сравнению с [4] в данной методике учитывается время на чистку конденсатора  $\Delta\tau$ , что вносит весьма существенную поправку и повышает качество планирования периодов чисток. Для вариантов, когда  $\Delta\tau \rightarrow 0$ , с учетом

$$Z'_ч = Z_ч + \epsilon_3 \cdot C_t \cdot \Delta\tau(1 - C) \cdot N \quad (25)$$

получаем полное совпадение с методикой [4]. Т.е. данная методика является обобщением и развития методики [4], в которой принято условие  $\Delta\tau \ll \tau$ , поэтому  $\Delta\tau$  не рассматривается в условии оптимизации и принимается вместо этого  $k\tau = T$ .

Используя стандартные программные методы поиска оптимума системы определяется минимум функции  $\Phi$  в точке  $\tau_{opt}$ , после чего имеем возможность определить оптимальное число чисток конденсатора за период  $T$ .

13) Последний этап расчета – определения изменения затрат в случае отклонения от оптимального числа чисток  $K_{opt}$  и расчет разности между неоптимальными удельными затратами (первая чистка сдвигается от оптимального срока) и оптимальным значением удельных затрат, т.е. определение экономического эффекта в результате оптимизации с учетом времени чистки  $\Delta\tau$ .

#### Заключение.

Предложена методика определения оптимальных сроков чистки конденсаторов паровых турбин, путем минимизации суммарных потерь вследствие загрязнения поверхностей нагрева. В отличие от существующих методик, данная методика учитывает время чистки  $\Delta\tau$ , что дает возможности для оптимального выбора способа чистки, для конкретных условий эксплуатации ТЭС и АЭС. Данная методика может

быть применена при различных методах чистки конденсаторов: механической, химической, термической, гидравлической, шариковой и др.

#### Литература

1. Шелепов И.Г., Заруба В.К., Яцкевич С.В. Теплоэнергетические установки электростанций (исследование и расчет низкопотенциальных комплексов ТЭС и АЭС). – К.: УМКВО, 1993. – 200 с.

2. Шелепов И.Г., Михайский Д.В. Диагностирование конденсаторов паровых турбин на основе уравнения теплопередачи // Восточно-Европейский журнал передовых технологий, "Технологический центр". – Харьков. – 2003. – №5 (5). – с.74-77

3. Баран Л.С., Ратнер Ф.З. Определение оптимальных сроков чисток конденсационных установок паровых турбин // Труды ЦКТИ. – 1984. – вып.214. – с. 13-19.

Определение на вычислительной машине загрязнённости трубок конденсатора турбины 500 МВт ХТГЗ // Электрические станции. – 1976. – №1. – с. 78-79.

4. Ходырев В.Л. Влияние скорости снижения экономичности на оптимальные сроки профилактического обслуживания теплообменного оборудования ТЭС // Известия ВУЗов, серия Энергетика. –1979. – № 10.

5. Ермаков В.С., Ходырев В.Л. Исследование динамики ущерба от загрязнения трубок конденсаторов паровых турбин // Электрические станции. – 1983. – №1. – с. 21-25.

6. Берман Л.Д., Зернова Э.П. Руководящие указания по тепловому расчету поверхностных конденсаторов мощных турбин тепловых и атомных электростанций. – М.: СПО Союзтехэнерго 1982. – с.105

7. Коновалов Г.М., Канаев В.Д. Нормативные характеристики конденсационных установок паровых турбин. – М.: СЦНТИ Союзтехэнерго, 1974. – 32с.

8. Александров А.А., Григорьев Б.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. – М.: МЭИ, 1999.

9. Буглаев В.Т., Лифшиц М.Н., Татаринцева Т.И. Некоторые особенности процесса отложений в трубах конденсаторов ПГУ // Известия вузов, серия Машиностроения. – 1983. – №7. – с. 56-59.

10. Шелепов И.Г., Михайский Д.В. Исследование влияния режимов работы НПК на эффективность работы энергоблока // Восточно-Европейский журнал передовых технологий, "Технологический центр". – Харьков. – 2005. – № 3 (2). – с. 122-125.

© Шелепов И.Г., Кострыкин В.А., Михайский Д.В., 2006