

12. В е р е з о в с к а я А. Л., К а з а н с к и й М. Ф. Некоторые особенности усадки глин разных материалов при сушке // ИФЖ. – 1962. – № 2. – С. 104–107.
13. Б е л о п о л ь с к и й М. С. Изменение структуры коллоидного капиллярно-пористого тела (глины) // ИФЖ. – 1961. – № 4. – С. 49–54.
14. Л ы к о в А. В. Теория сушки. – М.: Энергия, 1986. – 472 с.
15. Н и ч и п о р е н к о С. П., П а н а с е в и ч А. А., Б е д н о ш е я М. А. Усадочные свойства дисперсий каолинов // Структурообразование в дисперсиях слоистых силикатов. – Киев: Наук. думка, 1978. – С. 172–178.
16. К о в а л е н к о А. Д. Основы термоупругости. – Киев: Наук. думка, 1970. – 308 с.
17. О с и п о в С. Н., К а л и н и ч е н к о Е. С. Использование некоторых закономерностей термоупругости для оценки условий трещинообразования в начальном периоде сушки изделий строительной керамики // Сб. тр. ГП НИПТИС. – Мн., 1998. – С. 177–189.
18. Н и ч и п о р е н к о С. П. Физико-химическая механика дисперсных структур в технологии строительной керамики. – Киев: Наук. думка, 1968. – 76 с.
19. С о к о л о в П. В. Новые методы скоростной сушки керамических плиток и изделий санитарно-строительного фаянса // Сушка керамических изделий. – М.: Профиздат, 1958. – С. 3–34.
20. Б е р е н ш т е й н П. И. Исследование процессов сушки кирпича-сырца полусухого прессования: Автореф. дис. / ВНИИ стекла, 1954. – 22 с.
21. К а л и н и ч е н к о Е. С. Влияние формовочной влажности глиняной массы на основной интервал усадки при сушке // Матер. межвузовской науч.-техн. конф. БГПА, 54, ч.1. – Мн., 2000. – С. 84.
22. Ч и ж с к и й А. Ф. Сушка керамических материалов и изделий. – М.: Стройиздат, 1971. – 176 с.

Представлена кафедрой
теплогазоснабжения и вентиляции

Поступила 8.11.2001

УДК 621.396.677

ИНФОРМАЦИОННО-ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ТУРБОГЕНЕРАТОРА Т-100-130 САМАРСКОЙ ТЭЦ

**Докт. физ.-мат. наук, проф. КУДИНОВ В. А., канд. техн. наук ДИКОП В. В.,
асп. СТЕФАНЮК С. А., инж. ИСАЕВ А. Е.**

*Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Самарский государственный технический университет»*

В 1999 г. на Самарской ТЭЦ введена в эксплуатацию информационно-диагностическая система (ИДС) турбогенератора Т-100-130, предназначенная для автоматизированного сбора, обработки, отображения и архивирования информации с использованием современных персональных компьютеров. К таким данным относятся около 180 параметров: температура, давление, расход и уровень жидкости, деформации корпуса и вала, показатели вибрации, число оборотов ротора турбины и пр.

Общая схема турбогенератора и схема размещения датчиков ИДС представлена на рис. 1.

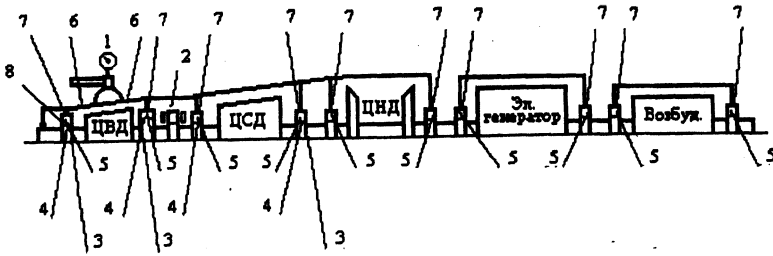


Рис. 1. 1, 2, 3, 4 – датчики: давления, осевого сдвига ЦВД и ЦСД, относительного перемещения корпуса и вала турбины, поперечного перемещения корпуса соответственно; 5 – термометр сопротивления платиновый (ТСП); 6 – термопары хромель-копелевые (ТХК); 7, 8 – датчики соответственно вибраций, искривления ротора; ЦВД, ЦСД, ЦНД – цилиндры высокого, среднего и низкого давления

Информация, полученная в результате работы ИДС, используется для выполнения следующих диагностических функций:

1) прогнозирования изменения во времени технологических параметров с указанием времени их выхода за предельно допустимые величины;

2) расчета коэффициентов теплообмена на внутренней поверхности корпуса и температурного состояния по толщине и длине корпуса и изоляции турбины;

3) расчета коэффициентов теплоотдачи на внутренней поверхности корпуса ЦВД, а также его температурного состояния.

Прогноз изменения во времени технологических параметров выполняется следующим образом. В текущий момент времени измерения данного параметра на основе закономерности его изменения за некоторый предыдущий отрезок времени строится график изменения этого параметра на заданный последующий отрезок времени. Для этого величина параметра (пусть это будет разность температур Δt верха и низа корпуса ЦВД) представляется в виде трехчлена

$$\Delta t = A + B\tau + C\tau^2, \quad (1)$$

где τ – время; A, B, C – неизвестные коэффициенты.

Для определения коэффициентов A, B, C необходимо замерить значения прогнозируемого параметра в трех точках по времени, предшествующему моменту измерения. Третьей точкой по времени принят текущий момент τ_3 времени измерения, где разность температур верха и низа корпуса равна Δt_3 . Допустим, что в моменты времени τ_1 и τ_2 , предшествующие τ_3 , величина разности температур соответственно была Δt_1 и Δt_2 .

На основе этих данных запишем уравнение (1) для моментов времени τ_1, τ_2, τ_3 :

$$\left. \begin{aligned} \Delta t_1 &= A + B\tau_1 + C\tau_1^2; \\ \Delta t_2 &= A + B\tau_2 + C\tau_2^2; \\ \Delta t_3 &= A + B\tau_3 + C\tau_3^2. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Из (2) находятся неизвестные A, B, C . После их подстановки в (1) можно сделать прогноз величины Δt на любой заданный отрезок времени. Его точность будет тем выше, чем меньше отрезок времени до момента измерения данной величины и отрезок времени, на который делается прогноз. Такой метод прогноза применяется лишь для монотонно меняющихся величин (температура элементов турбины, температурные напряжения и удлинения, уровни жидкостей и т. д.). Для величин, изменяющихся скачкообразно (показатели вибрации, давление среды и пр.), этот метод неприемлем.

Непосредственное опробование системы в процессе пуска показало хорошее совпадение прогноза разности температур верха и низа корпуса, фланцев и шпилек, а также разности перемещений корпуса и вала с их действительными значениями на 3 мин. вперед. Прогноз на 5 мин. и более не всегда бывает верен. Неточность возникает в случае, когда изменение прогнозируемого параметра меняет свой знак, т. е. когда график монотонно изменяющейся функции имеет перегиб. Для учета этого перегиба необходимо делать более частый прогноз (на 1...3 мин. вперед), что позволит достоверно предсказать смену знака параметра во времени. Отметим, что прогноз изменения параметра хотя бы на 1 мин. вперед позволяет принять превентивные меры по недопущению выхода отслеживаемого параметра за пределы, допустимые инструкциями по пуску.

Составной частью ИДС являются термопары, установленные на внешней поверхности корпуса цилиндра высокого давления (ЦВД) паровой турбины. Схема их размещения в семи сечениях представлена на рис. 2. В первом сечении расположены три термопары: 1 – левый фланец; 2 – верх корпуса; 3 – правый фланец. Во втором, третьем и четвертом сечениях установлено по одной термопаре (соответственно термопары 4, 5, 6) в верхней части корпуса. В пятом сечении размещены шесть термопар: 7 – левый фланец; 8 – верх корпуса; 9 – правый фланец; 10 – низ корпуса; 11 – левая шпилька; 12 – правая шпилька. В шестом сечении находится одна термопара 13 в верхней части корпуса. В седьмом – три термопары: 14 – верх корпуса; 15 – левый фланец; 16 – правый фланец.

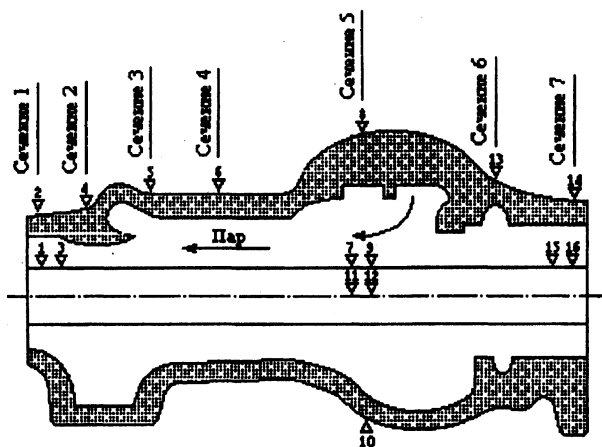


Рис. 2

Информация с термопар отражается на экране компьютера в виде цифровых значений температур в соответствующих точках корпуса, высвечиваемого на экране монитора.

Результаты экспериментального исследования температурного состояния верхней части корпуса ЦВД турбины в режиме пуска, проведенного 23 августа 1998 г., представлены на графиках рис. 3.

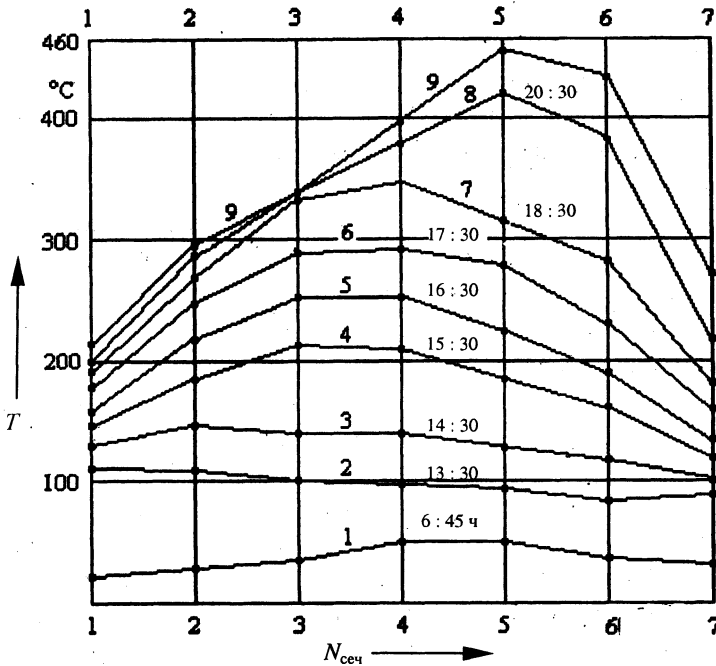


Рис. 3. Графики распределения температуры по верхней части ЦВД турбины: 1, 2, ..., 8 – запуск; 9 – стационарное состояние

Показания термопар были использованы для расчета коэффициентов теплоотдачи при передаче теплоты от пара к внутренней поверхности стенки корпуса турбины. Они зависят от большого количества факторов – температуры и давления пара, скорости и режима его течения, состояния поверхности теплообмена и др. Известные методы определения коэффициентов теплоотдачи основаны на использовании эмпирических формул. Однако с их помощью невозможно полностью учесть всю совокупность факторов, влияющих на величину коэффициента теплообмена. Методы, позволяющие это сделать, базируются на решении обратных задач теплопроводности. В [1–4] приводятся аналитические решения задач теплопроводности для многослойных конструкций. Используя их, по известной из эксперимента температуре на внешней поверхности стенки корпуса турбины путем решения обратной задачи теплопроводности можно определить коэффициент теплоотдачи на внутренней его поверхности (со стороны пара).

Следуя методам [1, 2], решение задачи теплопроводности для двухслойной пластины (металлическая стенка турбины–тепловая изоляция) при несимметричных граничных условиях 3-го рода имеет вид

$$\Theta_i(x, Fo) = \Phi_i(x) + C_1 \exp(-\nu Fo) \eta_{1i}(x) \quad (i=1, 2), \quad (3)$$

где

$$\Phi_i(x) = A_i + D_i x_i; \quad D_i = U / \lambda_i \xi; \quad A_i = D_i / \text{Bi}_1 + U \left(\sum_{k=1}^i \Delta_k / \lambda_k - \Delta_i / \lambda_i \right) / \xi;$$

$$\xi = 1 / \text{Bi}_1 \lambda_1 + 1 / \text{Bi}_m \lambda_m + \frac{\Delta_k}{\lambda_k}; \quad C_1 = \frac{\sum_{i=1}^2 \int_{x_{i-1}}^{x_i} [P_i - \Phi_i(x)] \eta_{1i}(x) dx}{\sum_{i=1}^2 \int_{x_{i-1}}^{x_i} \eta_{1i}(x) dx};$$

$$P_1 = \frac{t_n - t_{0i}}{t_n - t_{01}}; \quad \Theta(x, \text{Fo}) = \frac{t_n - t_i}{t_n - t_{01}}; \quad N_1 = \sum_{i=1}^2 \int_{x_{i-1}}^{x_i} \eta_{1i}^2(x) dx;$$

$$N_2 = \sum_{i=1}^2 H_i \int_{x_{i-1}}^{x_i} \frac{\partial^2 \eta_{1i}(x)}{\partial x^2} \eta_{1i}(x) dx; \quad \eta = \frac{N_2}{N_1}; \quad H_i = \frac{\alpha_i}{\alpha};$$

$$\eta_{11}(x) = \frac{\text{Bi}_2 + 2}{\text{Bi}_2} + \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} - 1 \right) x_1^2 - \frac{\lambda_2}{\lambda_1} x^2; \quad \eta_{12}(x) = \frac{\text{Bi}_2 + 2}{\text{Bi}_2} - x^2; \quad U = \frac{t_n - t_{\text{cp}}}{t_n - t_{01}},$$

где $x = \chi / \delta$ – безразмерная координата; $\delta = \delta_1 + \delta_2$ – толщина двухслойной стенки турбины; δ_1 – то же металлической стенки; δ_2 – то же слоя изоляции; $\text{Fo} = a\tau / \delta^2$ – число Фурье; a – наименьший коэффициент теплопроводности; ($a_i (i = 1, 2)$); τ – время; $\text{Bi}_1 = \alpha_1 \delta / \lambda_1$ – число Био со стороны пара; $\text{Bi}_2 = \alpha_2 \delta / \lambda_2$ – то же с наружной поверхности турбины; α_1 – коэффициент теплоотдачи от горячего пара к стенке корпуса; α_2 – то же между тепловой изоляцией турбины и окружающей средой; λ_1 – коэффициент теплопроводности стенки корпуса; λ_2 – то же слоя тепловой изоляции; t_0 – начальная температура; t_n – температура пара; t_{cp} – то же окружающей среды.

В (3) в явном виде содержится неизвестный коэффициент теплоотдачи α_1 . Для его определения на некотором отрезке безразмерного времени ($\text{Fo}_1 \leq \text{Fo} \leq \text{Fo}_2$) нестационарного процесса аппроксимируем экспериментальные значения температуры квадратным трехчленом вида

$$\Theta(x_1, \text{Fo}) = A_1 + A_2 \text{Fo} + A_3 \text{Fo}^2, \quad (4)$$

где A_1, A_2, A_3 – коэффициенты аппроксимации; x_1 – координата точки, в которой определялись экспериментальные значения температуры (точка контакта металлической стенки корпуса и тепловой изоляции).

После определения коэффициентов $A_i (i = 1, 2, 3)$ соотношение (4) подставляется в (3). Интегрируя полученное соотношение в пределах рассматриваемого отрезка времени, получим

$$\int_{Fo_1}^{Fo_2} (A_1 + A_2 Fo + A_2 Fo^2) dFo = \int_{Fo_1}^{Fo_2} [\Phi_1(x) + C_1 \exp(-\nu Fo) \eta_{11}(x)] dFo. \quad (5)$$

Определяя интегралы в (5), найдем

$$[A - \Phi_1(x)](Fo_2 - Fo_1) + \frac{A_2(Fo_2^2 - Fo_1^2)}{2} + \frac{A_3(Fo_2^3 - Fo_1^3)}{3} = \frac{C_1 \eta_{11}(x)(e^{-\nu Fo_1} - e^{-\nu Fo_2})}{\nu}. \quad (6)$$

Соотношение (6) относительно неизвестного коэффициента теплоотдачи α_1 является трансцендентным уравнением, решение которого не представляет затруднений.

Используя (6), были найдены коэффициенты теплоотдачи со стороны пара в зоне сечения б (рис. 2, 3).

Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1

$\tau, \text{ч}$	13 : 30	15 : 30	17 : 30	20 : 30	Стационарное состояние
$\alpha, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	46	87	65	124	64

Для каждого исследуемого момента времени за начальное условие принималась средняя температура по толщине каждого слоя. Температурное состояние слоев в любой момент времени пуска рассчитывалось по (3) после определения коэффициента теплоотдачи для предшествующего момента времени. Таким образом, нестационарный коэффициент теплоотдачи находился из решения квазистационарной задачи теплопроводности.

Исходные данные для решения задачи были следующие:

$\lambda_1 = 37 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; $\lambda_2 = 0,8 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; $a_1 = 0,8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$; $a_2 = 0,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; $\delta_1 = 0,15 \text{ м}$; $\delta_2 = 0,3 \text{ м}$; $\alpha_2 = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $t_{\text{п}} = 530 \text{ }^\circ\text{С}$; $t_{\text{ср}} = 30 \text{ }^\circ\text{С}$.

ВЫВОДЫ

1. Информационно-диагностическая система турбогенератора Т-100-130 Самарской ТЭЦ позволяет с помощью персонального компьютера контролировать изменение около 180 параметров с прогнозом некоторых из них. При этом для разности температур отдельных элементов корпуса, разности перемещений корпуса и вала прогноз на 1...3 мин. вперед практически всегда подтверждается. Прогноз на большие интервалы времени подтверждается лишь в тех случаях, когда кривая изменения параметра во времени не имеет перегиба на данном интервале.

2. Анализ экспериментальных данных по температуре корпуса ЦВД турбины позволяет сделать заключение о том, что наиболее низкая температура в процессе пуска наблюдается в правой его части (рис. 2, 3). Этот факт, по-видимому, следует объяснять тем, что в этой зоне ввиду наличия

большого количества диафрагм и лабиринтовых уплотнений значения скорости пара относительно поверхности корпуса невелики (имеют место застойные зоны), что обуславливает, как показали проведенные авторами исследования, низкие значения коэффициентов теплоотдачи от пара к корпусу (п. 3 выводов).

Отмечается также большая неравномерность температуры по длине корпуса. В частности, область паровпускного клапана (сечение 5) на отдельных моментах времени пуска имеет примерно на 240 °С большую температуру, чем концевые части корпуса (включая и стационарный режим работы).

3. Изменение коэффициента теплоотдачи при передаче теплоты от пара к корпусу происходит с существенной неравномерностью. Средняя величина его относительно невелика и составляет $\alpha \approx 60 \dots 70 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Однако в отдельные моменты времени наблюдаются скачки. Например, для времени 20 ч 30 мин. с момента начала пуска (пуск после планового ремонта) коэффициент теплоотдачи $\alpha = 124 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Такой скачок можно объяснить увеличением подачи пара. В эти моменты перепад температуры на стенке возрастает с 10...15 до 25...30 °С. Основной перепад температуры имеет место в слое тепловой изоляции. При этом наиболее интенсивное ее падение наблюдается в зоне, непосредственно прилегающей к корпусу. Вблизи наружной поверхности градиент температуры уменьшается, а температура внешней поверхности изоляции возрастает с 30 до 50 °С [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Теплоперенос и термоупругость в многослойных конструкциях / В. А. Кудинов, В. В. Калашников, Э. М. Карташов и др. – М.: Энергоатомиздат, 1997. – 426 с.
2. Кудинов В. А. Аналитические методы решения краевых задач для многослойных конструкций: Обзор // Изв. АН. Энергетика. – 1999. – № 5. – С. 86–107.
3. Экспериментальное и теоретическое исследование температурного состояния корпуса паровой турбины ПТ-60-130/13 / В. А. Кудинов, В. В. Дикоп, А. Б. Ремезенцев, В. А. Обухов // Изв. АН. Энергетика. – 1998. – № 5. – С. 120–126.
4. Карташов Э. М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. – М.: Высш. шк., 1985. – 480 с.

Представлена кафедрой
теоретических основ
теплотехники и гидромеханики

Поступила 26.12.2001