

2. Резонансные колебания лопаток 30-й и 31-й ступеней приходится на частоты вращения 43,3 и 45,5 с<sup>-1</sup> (2600 и 2730 об/мин).

3. Отклонения виброхарактеристик рабочих лопаток последних ступеней при их старении и при эрозионных повреждениях выходных кромок настоятельно требуют необходимости разработки электронной системы такой вибродиагностики.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. О частотной диаграмме аксиальных колебаний облопаченного диска осевой турбины / И. П. Усачев, В. М. Неуймин, В. В. Ильиных, В. В. Колясников // Энергомашиностроение. – 1981. – № 9. – С. 3–5.

2. Исследование вибрационной надежности лопаток последних ступеней теплофикационных турбин: Отчет ПО ТМЗ / В. Н. Осипенко, В. И. Водичев, В. А. Леснов и др. – Свердловск, 1977. – 183 с.

3. Возбуждение аксиальных колебаний колес паровых турбин в эксплуатационных условиях / И. П. Усачев, В. М. Неуймин, В. В. Ильиных и др. // Энергомашиностроение. – 1981. – № 3. – С. 5–9.

Представлена кафедрой ТЭС

Поступила 4.09.2001

УДК 621.311

### ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИСХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ

Инж. ЕВТУШЕНКО Е. А., канд. техн. наук ЩИННИКОВ П. А.

*Новосибирский государственный технический университет*

Анализ экспериментальных результатов исследования процессов горения топлива по литературным данным свидетельствует о значительном разбросе точек (до 30 %) по отношению к теоретическим зависимостям.

Это объясняется, прежде всего, колебаниями элементарного состава рабочей массы топлива по сравнению с расчетными значениями в отдельных кусках, а также погрешностями при измерении расхода воздуха, давления, температуры горения и некоторых других факторов. Вместе с тем известны методики, позволяющие путем привлечения дополнительной информации при проведении эксперимента получать уточненные значения экспериментальных величин. Примерами таких методик являются аналитическая методика согласования балансов [1], численная методика, основанная на использовании оптимизационных программ [2, 3] и методики, основанные на согласовании балансовых уравнений и накоплении статистической информации [4].

Применение оптимизационной методики согласования балансовых уравнений оправдано при массивах исходной информации большой размерности. Методика, использующая статистически накопленную информацию на установке, требует стационарных состояний энергообъекта, в то время как, строго говоря, на энергетических установках состояния бывают только квазистационарными, а измерения – одноразовыми. Для экспериментальных исследований с небольшим количеством измеряемых переменных

более подходит аналитическая методика согласования балансов [1]. Ее суть заключается в следующем: априорно принимается, что всякая измеренная величина  $x$  в общем случае отличается от ее истинного значения  $x^*$ . Разница между значениями величины – это погрешность измерения. Совокупность погрешностей по всем измеряемым величинам распределяется по нормальному закону. Так же все неизвестные величины, которые определяются из системы балансовых уравнений  $l$ , отличаются от их фактических значений  $l^*$ .

Разница между истинным значением величины и ее измеренным или вычисленным значением является поправкой:  $x^* - x = v$ ;  $l^* - l = y$ .

Подстановка измеренных и вычисленных значений величин в балансовые уравнения приводит к их незамыканию (дебалансу)

$$\sum_{k=1}^r F(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n, l_1, l_2, l_3, \dots, l_u) = W_k, \quad (1)$$

где  $k = 1, \dots, r$  – порядковый номер балансового уравнения. Подстановка в уравнения истинных значений величин дает соответственно

$$\sum_{k=1}^r F(x_1^*, x_2^*, x_3^*, \dots, x_n^*, l_1^*, l_2^*, l_3^*, \dots, l_u^*) = 0 \quad (2)$$

или

$$\sum_{k=1}^r F(x_1 + v_1, x_2 + v_2, \dots, x_n + v_n, l_1 + y_1, l_2 + y_2, \dots, l_u + y_u) = 0. \quad (3)$$

Решение задачи об определении  $v$  и  $y$  производится в предположении о малости этих поправок по сравнению с самой величиной путем разложения уравнения (3) в ряд Тейлора в окрестностях величин и отбрасывании членов ряда высших порядков малости.

Кроме того, вводится допущение о нормальном законе распределения поправок и наиболее вероятном их отклонении от истинного значения величин в соответствии с минимумом взвешенной суммы квадратов поправок.

Окончательно решение имеет вид системы уравнений условий:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^n a_{ki} v_i + \sum_{l=1}^u b_{kl} y_l &= -W_k; \\ m_i^{-2} v_i &= \sum_{k=1}^r a_{ki} k_k; \\ \sum_{k=1}^r b_{kl} k_k &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где  $i = 1, \dots, n$  – порядковый номер измеряемой величины;  $k = 1, \dots, r$  – то же балансового уравнения;  $l = 1, \dots, u$  – то же определяемой величины;  $a_{ki}, b_{kl}$  – производная уравнения  $k$  по измеряемой величине и определяемой неизвестной величине;  $v_i, y_i$  – поправка к измеряемой и определяемой величинам;  $k_k$  – неопределенный коэффициент Лагранжа;  $m_i$  – среднеквадратичная абсолютная погрешность измерения.

Рассмотрим изложенную выше методику в приложении к конкретному исследованию сжигания гранул топлива в экспериментальной установке (рис. 1).

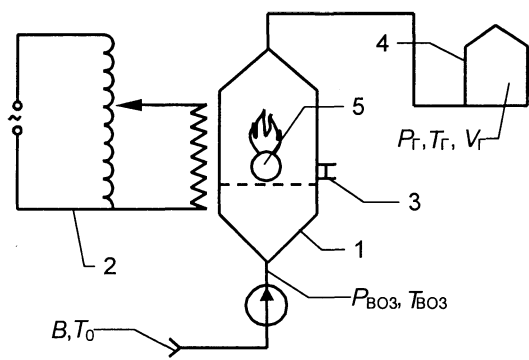


Рис. 1. Схема экспериментальной установки сжигания гранул топлива: 1 – щелевая печь; 2 – автоматическая система регулирования температуры печи; 3 – визуальное наблюдение; 4 – газоходер; 5 – топливная гранула

В опытах измерялся расход воздуха  $G_{\text{в03}}$ , масса гранул  $G_{\text{г}}$ , объем  $V_{\text{г}}$ , давление  $p_{\text{г}}$  и температура  $T_{\text{г}}$  топочных газов, состав топочных газов  $\text{RO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , а также барометрическое давление и температура атмосферного воздуха  $B$  и  $T_0$ .

Состав топлива принимался как некоторый осредненный, определенный предварительно в лаборатории. Так как гранулы имели колебания в составе топлива, то именно эти величины подлежали коррекции. В силу технических причин грубо определялся расход воздуха. Данные величины представлены в табл. 1.

Таблица 1

Величины, измеряемые в эксперименте

| Величина             | Обозначение          | Размерность    | Абсолютная среднеквадратичная погрешность |
|----------------------|----------------------|----------------|-------------------------------------------|
| Масса гранулы        | $G_{\text{г}}$       | кг             | $m_{\text{г}}$                            |
| Состав топлива:      |                      |                |                                           |
| углерод              | C                    | кг             | $m_{\text{C}}$                            |
| азот                 | N                    | кг             | $m_{\text{N}}$                            |
| кислород             | O                    | кг             | $m_{\text{O}}$                            |
| водород              | H                    | кг             | $m_{\text{H}}$                            |
| сера                 | S                    | кг             | $m_{\text{S}}$                            |
| влага                | L                    | кг             | $m_{\text{L}}$                            |
| минерал. ост.        | A                    | кг             | $m_{\text{A}}$                            |
| Расход воздуха       | $G_{\text{в03}}$     | кг             | $m_{\text{в03}}$                          |
| Объем газов          | $V_{\text{г}}$       | м <sup>3</sup> | $m_{\text{г}}$                            |
| Состав газов:        |                      |                |                                           |
| $\text{RO}_2$        | $\text{RO}_2$        | кг             | $m_{\text{RO}_2}$                         |
| CO                   | CO                   | кг             | $m_{\text{CO}}$                           |
| $\text{H}_2$         | $\text{H}_2$         | кг             | $m_{\text{H}_2}$                          |
| $\text{O}_2$         | $\text{O}_2$         | кг             | $m_{\text{O}_2}$                          |
| $\text{N}_2$         | $\text{N}_2$         | кг             | $m_{\text{N}_2}$                          |
| $\text{H}_2\text{O}$ | $\text{H}_2\text{O}$ | кг             | $m_{\text{H}_2\text{O}}$                  |

В методике согласования баланса были использованы балансовые уравнения на основе закона сохранения массы вещества. При этом сера и минеральная часть (зола) не включены в состав балансовых уравнений, так как часть серы улавливается золой и неизвестна ее контракция (угар). Окись углерода и водород в составе продуктов сгорания отсутствуют. Сернистый ангидрид вошел в состав продуктов сгорания в небольшом количестве (обнаружены лишь следы). Таким образом, балансовые уравнения имеют вид:

по углероду

$$G_T C - \frac{12}{44} g_{CO_2} - \frac{12}{28} g_{CO} = W_1; \quad (5)$$

по кислороду, водороду и влаге

$$G_T H + G_T O + G_T L + 0,23 G_{BO_3} - \frac{32}{44} g_{CO_2} - \frac{16}{28} g_{CO} - g_{O_2} - g_{H_2O} - g_{H_2} = W_2; \quad (6)$$

по азоту

$$G_T N + 0,77 G_{BO_3} - g_{N_2} = W_3. \quad (7)$$

В ходе эксперимента были заданы расчетные величины состава топлива и измеренные значения в пределах погрешности, определяемой приборами и методикой измерений. Погрешность определяется как погрешность наблюдения, прибора и методики измерения. По уточняемым величинам уравнений (5)–(7) были взяты производные.

Система уравнений для конкретных условий эксперимента запишется в виде:

$$G_T v_C = -W_1; \quad (8)$$

$$G_T v_H + G_T v_O + 0,23 v_{G_{BO_3}} + G_T v_L = -W_2; \quad (9)$$

$$G_T v_N + 0,77 v_{G_{BO_3}} - v_{N_2} = -W_3; \quad (10)$$

$$m_C^{-2} v_C = G_T k_1; \quad (11)$$

$$m_H^{-2} v_H = G_T k_2; \quad (12)$$

$$m_N^{-2} v_N = G_T k_3; \quad (13)$$

$$m_O^{-2} v_O = G_T k_2; \quad (14)$$

$$m_{G_{BO_3}}^{-2} v_{G_{BO_3}} = 0,23 k_2 + 0,77 k_3; \quad (15)$$

$$m_L^{-2} v_L = G_T k_2; \quad (16)$$

$$m_{N_2}^{-2} v_{N_2} = k_3. \quad (17)$$

Исходные данные для расчетного эксперимента и результаты вычислений в соответствии с системой уравнений показаны в табл. 2.

Таблица 2

**Результаты расчетного эксперимента согласования материального баланса**

| Величина              | Обозн.,<br>разм.      | Ист.<br>значе-<br>ние | Погрешность                |                       | Изм.<br>знач.<br>велич. | По-<br>правка |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------|-----------------------|-------------------------|---------------|
|                       |                       |                       | Отн. ср.<br>кв. $\delta_i$ | Абс. ср. кв.<br>$m_i$ |                         |               |
| Масса топлива         | $G_{\text{т}}$ , кг   | 1,000                 | –                          | –                     | –                       | –             |
| Состав топлива:       |                       |                       |                            |                       |                         |               |
| углерод               | C, кг                 | 0,7247                | 0,0078                     | 0,0056                | 0,7135                  | 0,0119        |
| водород               | H, кг                 | 0,0344                | 0,0250                     | 0,0009                | 0,0335                  | 0,0000        |
| азот                  | N, кг                 | 0,0144                | 0,2000                     | 0,0029                | 0,0163                  | 0,0000        |
| кислород              | O, кг                 | 0,0208                | 0,1000                     | 0,0021                | 0,0225                  | 0,0000        |
| сера                  | S, кг                 | 0,0043                | 0,3500                     | 0,0015                | 0,0020                  | 0,0000        |
| влага                 | L, кг                 | 0,0800                | 0,0840                     | 0,0067                | 0,0767                  | 0,0010        |
| зола                  | A, кг                 | 0,1214                | 0,0285                     | 0,0034                | 0,1282                  | –             |
| Воздух                | $G_{\text{воз}}$ , кг | 11,5150               | 0,0300                     | 0,3454                | 10,8242                 | 0,5638        |
| Состав дымовых газов: |                       |                       |                            |                       |                         |               |
| тр. атом. газ.        | RO <sub>2</sub> , кг  | 2,6240                | 0,0300                     | 0,0787                | 2,6600                  | –             |
| азот                  | N <sub>2</sub> , кг   | 8,6884                | 0,0300                     | 0,2606                | 8,7100                  | –0,0217       |
| водяной пар           | H <sub>2</sub> O, кг  | 0,4730                | 0,0300                     | 0,0141                | 0,4585                  | –             |
| кислород              | O <sub>2</sub> , кг   | 0,4868                | 0,0300                     | 0,0146                | 0,5014                  | –             |
| окись углерода        | CO, кг                | 0,0000                | 0,0300                     | –                     | –                       | –             |
| зола                  | A, кг                 | –                     | –                          | –                     | –                       | –             |

В результате согласования балансов изменялись значения четырех величин, существенно влияющих на точность эксперимента: содержание углерода в топливе, расход воздуха, влажность и содержание азота в продуктах сгорания. Для остальных величин поправки лежат за пределами четвертого значащего знака.

В табл. 3 дано сопоставление истинных значений величин и откорректированных измеренных их значений. Из сопоставления результатов следует, что улучшилось значение C,  $G_{\text{воз}}$ , L и N<sub>2</sub>. Остальные величины остались без изменения. Таким образом, в целом произошло улучшение ситуации.

Таблица 3

**Сопоставление результатов согласования балансов**

| Величина                | Истинное<br>значение | Исправленное<br>значение | Отн. погрешность, % |             |
|-------------------------|----------------------|--------------------------|---------------------|-------------|
|                         |                      |                          | До согл.            | После согл. |
| Содержание углерода, кг | 0,7247               | 0,7254                   | –1,5                | 0,1         |
| Содержание влаги, кг    | 0,0800               | 0,0777                   | –4,1                | –2,8        |
| Расход воздуха, кг      | 11,5150              | 11,3880                  | –5,9                | –1,1        |
| Азот в топ. газах, кг   | 8,6884               | 8,6883                   | 0,24                | –0,0        |

## ВЫВОДЫ

1. Применение методики согласования балансов позволяет уточнить значение измеренных величин и в целом улучшить ситуацию по массиву исходной информации при постановке эксперимента по горению топлива. При этом уточнению в первую очередь подлежат наиболее грубые измерения.

2. Наибольший эффект при согласовании балансов достигается, когда: массив погрешностей подчиняется нормальному закону распределения; адекватная оценка среднеквадратичных погрешностей измерений осуществляется с учетом методики измерений; производится учет возможно большего числа балансовых уравнений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Szargut J. Energetyka cieplna w hutnictwie. – Katowice: Śląsk, 1971. – 654 с.
2. Ноздренко Г. В., Овчинников Ю. В. Принцип неравноценности потоков при моделировании процессов производства тепла и электроэнергии на ТЭЦ // Energetyka № 564, Zeszyty naukowe Politechniki Śląskiej. – Gliwice, 1978. – С. 15–21.
3. Овчинников Ю. В., Ноздренко Г. В., Алтухов И. М. Согласование энергобалансов для уточнения исходной информации по ТЭУ // Управление режимами и развитием энергетических систем в условиях АСУ: Сб. тр. – Новосибирск, 1980. – С. 26–31.
4. Михеев А. В. Оценивание режимов работы и идентификация характеристик оборудования тепловых электрических станций // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Иркутск, 2000. – 23 с.

Представлена кафедрой ТЭС

Поступила 30.01.2001

УДК 621.186.2.001.24

## АНАЛИЗ ТЕПЛОПОТЕРЬ ОДИНОЧНОГО ТЕПЛОПРОВОДА

Докт. техн. наук БАЙРАШЕВСКИЙ Б. А.,  
канд. техн. наук, доц. СЕДНИН В. А., инж. АБРАЖЕВИЧ С. И.

*Белорусская государственная политехническая академия*

Механизм потерь теплоты через ограждающие поверхности теплопроводов представляет практический интерес. Возможности вычислительной техники позволяют изучать закономерности теплопотерь при любых режимах работы сетей и соответственно управлять этим процессом в целях его оптимизации согласно реальным обстоятельствам. Такая постановка вопроса на предприятиях, имеющих на своем балансе теплопроводы, способствует повышению уровня их эксплуатации. Предприятия могут быть заинтересованы в подобных программных средствах и использовать их в полном соответствии с действующими правилами технической эксплуатации.

В данной работе излагаются теоретические основы создания программного средства, разработанного и рекомендуемого для использования.