

Изобретение относится к области испытаний и диагностирования машин и может быть использовано для оценки технического состояния газотурбинных установок в эксплуатационных условиях.

Наиболее близким к изобретению является способ определения к.п.д. (см. А. с. СССР № 1114143 кл. G01M15/00), включающий измерение в исходный и текущий моменты эксплуатации температуры и давления на входе в двигатель, температуры торможения газов перед его силовой турбиной, статическое давление воздуха за компрессором и теплотворную способность топлива, причем измерение всех параметров в текущий момент эксплуатации осуществляется при значениях теплотворной способности топлива и степени сжатия компрессора, равных их значениям в исходный момент эксплуатации, и определяют коэффициент изменения к.п.д. двигателя и расхода топлива из следующих уравнений

$$\Delta\eta = \eta_{исх} \left[ 0,75 + 1 / \left( (T_T / T_{и})_{исх} - 1 \right) \right] \cdot \left[ (T_T / T_{и})_{тек} / (T_T / T_{и})_{исх} - 1 \right]$$

$$K_G = 1 - (\Delta\eta / \eta_{исх}),$$

где:  $\Delta\eta$ ,  $K_G$  – соответственно, коэффициенты изменения к.п.д. двигателя и расхода топлива;

$\eta_{исх}$  – исходный к.п.д. двигателя;

$(T_T / T_{и})_{исх}$ ,  $(T_T / T_{и})_{тек}$  – отношение температуры торможения газов перед силовой турбиной и температуры воздуха на входе в двигатель в исходный и текущий моменты эксплуатации, соответственно.

Недостатком известного способа является то, что он позволяет определить только отклонение фактического к.п.д. от исходного к.п.д. Фактический к.п.д. ГТУ известным способом может быть определен только в том случае, если известен исходный к.п.д., найденный каким-либо другим способом в исходный момент эксплуатации. Кроме того, фактический к.п.д. не может быть определен известным способом на произвольном режиме, а только на тех режимах, на которых проводились испытания в исходный момент эксплуатации.

В основу изобретения поставлена задача создания способа, обладающего более широкими функциональными возможностями по сравнению с прототипом, обеспечивающего определение к.п.д. ГТУ на рабочих режимах в условиях эксплуатации на компрессорных станциях газопроводов. В частности, без использования измерений индивидуального расхода топливного газа и индивидуальной производительности газоперекачивающего агрегата, которые невозможно (либо очень сложно) обеспечить в условиях эксплуатации.

Поставленная задача решается тем, что в способе определения к.п.д. газотурбинной установки, заключающемся в измерении температуры на входе в двигатель, теплотворной способности топлива, согласно изобретению, измеряют на эксплуатационном режиме температуру топлива и температуру уходящих газов, определяют теоретически необходимое количество воздуха для полного сгорания единицы массы топлива, измеряют концентрацию кислорода в уходящих газах, рассчитывают коэффициент избытка воздуха, рассчитывают относительную массу уходящих газов ГТУ, приходящуюся на единицу массы топлива, потребляемого ГТУ, равную произведению коэффициента избытка воздуха и теоретически необходимого количества воздуха для полного сгорания единицы массы топлива, измеряют концентрации не полностью сгоревших газов в продуктах сгорания и рассчитывают относительные потери тепла вследствие неполного сгорания единицы массы топлива, определяют относительную полезную энергию газотурбинной установки, равную разности подводимой и отводимой от газотурбинной установки тепловой энергии, приходящейся на единицу массы топлива, учитывая при этом относительные потери тепла с уходящими газами ГТУ, приходящимися на единицу массы топлива, относительные потери тепла вследствие неполного сгорания единицы массы топлива, относительные потери тепла через корпус ГТУ, приходящиеся на единицу массы топлива, и относительные механические потери энергии, приходящиеся на единицу массы топлива, а к.п.д. газотурбинной установки определяют в виде отношения относительной полезной энергии газотурбинной установки, приходящейся на единицу массы топлива к теплотворной способности единицы массы топлива.

Предлагаемый способ заключается в том, что на эксплуатационном режиме измеряют температуру атмосферного воздуха на входе в двигатель термометрами. Определяют теплотворную способность топлива по данным сертификата на топливо. Измеряют на эксплуатационном режиме температуру топлива и температуру уходящих газов с помощью термометров (термопар). Теоретически необходимое количество воздуха для полного сгорания единицы массы топлива определяют по концентрациям отдельных горючих составляющих в одном килограмме топлива. Концентрации горючих составляющих в топливе определяют с помощью хроматографов и считают известными, так как состав топлива, его теплотворная способность и другие характеристики даются в сертификате на топливо. Количество воздуха, необходимое для сжигания единицы массы каждой горючей составляющей топлива, также считается известным. Концентрацию кислорода в уходящих газах измеряют газоанализатором, например, широко распространенным газоанализатором TESTO-33. Коэффициент избытка воздуха в уходящих газах с высокой точностью определяется величиной отношения концентрации кислорода в воздухе к разности концентраций кислорода в воздухе и уходящих газах. Определение коэффициента избытка воздуха в уходящих газах производится также вычислительными блоками ряда газоанализаторов, в том числе и газоанализатора TESTO-33. Относительную массу уходящих газов ГТУ, приходящуюся на единицу массы топлива, потребляемого ГТУ, и равную произведению коэффициента избытка воздуха и теоретически необходимого количества воздуха для полного сгорания единицы массы топлива, определяют по формуле

$$g_{yr} = \alpha L_0,$$

где  $g_{yr}$  - относительная масса уходящих газов ГТУ, приходящаяся на единицу топлива, потребляемого ГТУ;  
 $L_0$  - теоретически необходимое количество воздуха для полного сгорания единицы массы топлива;  
 $\alpha$  - коэффициент избытка воздуха.

Концентрации не полностью сгоревших газов в продуктах сгорания (например, оксидов углерода CO, углеводородов и др.) измеряют газоанализатором, и по измеренным концентрациям рассчитывают потери тепла вследствие неполного сгорания единицы массы топлива, при этом считая известными теплотворные способности не полностью сгоревших газов и используя рассчитанную относительную массу уходящих газов ГТУ, приходящуюся на единицу топлива, потребляемого ГТУ

$$q_{nc} = g_{yr} \sum_{i=1}^n H_i K_i,$$

где  $q_{nc}$  - потери тепла вследствие неполного сгорания единицы массы топлива кДж/кг;  
 $g_{yr}$  - относительная масса уходящих газов ГТУ, приходящаяся на единицу топлива, потребляемого ГТУ;  
 $K_i$  - концентрация не полностью сгоревшей  $i$ -той компоненты несгоревших газов в продуктах сгорания;  
 $H_i$  - теплотворная способность  $i$ -той компоненты несгоревших газов в продуктах сгорания кДж/кг;

Растет потеря тепла, вследствие неполного сгорания топлива, производится также вычислительными блоками современных газоанализаторов.

Относительную полезную энергию газотурбинной установки, равную разности подводимой и отводимой от газотурбинной установки тепловой энергии, приходящейся на единицу массы топлива, рассчитывают по формуле

$$E_{n1} = H + C_{pt} t_T + (g_{yr} - 1) C_{pv} t_{атм} - \\ - q_{nc} - g_{yr} C_{pyr} t_{yr} - q_{корп} - \eta_{мех}$$

где:  $E_{n1}$  - относительная полезная энергия газотурбинной установки, приходящаяся на единицу массы топлива, кДж/кг;

$H$  - теплотворная способность топлива, кДж/кг;

$C_{pt}$  - теплоемкость топлива, кДж/(кг °C);

$t_T$  - температура топлива, °C;

$g_{yr}$  - относительная масса уходящих газов ГТУ, приходящаяся на единицу массы топлива, потребляемого ГТУ;

$C_{pv}$  - теплоемкость атмосферного воздуха, кДж/(кг °C);

$t_{атм}$  - температура атмосферного воздуха, °C;

$q_{nc}$  - потери тепла, вследствие неполного сгорания единицы массы топлива кДж/кг;

$C_{pyr}$  - теплоемкость уходящих газов, определяемая их температурой и коэффициентом избытка воздуха, кДж/(кг °C);

$t_{yr}$  - температура уходящих газов, °C;

$q_{корп}$  - потери тепла через корпус ГТУ, приходящиеся на единицу массы топлива, потребляемого ГТУ, кДж/кг;

$\eta_{мех}$  - механические потери энергии в ГТУ, приходящиеся на единицу массы топлива, потребляемого ГТУ, кДж/кг.

Приведенная формула учитывает относительные потери тепла с уходящими газами ГТУ, приходящимися на единицу массы топлива, относительные потери тепла из-за неполного сгорания единицы массы топлива, относительные потери тепла через корпус ГТУ, приходящиеся на единицу массы топлива и относительные механические потери энергии, приходящиеся на единицу массы топлива.

Для ГТУ мощностью более 5 МВт потери тепла через корпус ГТУ составляют не более 1% от всего подводимого к ГТУ тепла. Для ГТУ мощностью более 12 МВт потерями тепла через корпус ГТУ можно пренебречь. Если допустить, что потери тепла через корпус ГТУ являются функцией разности температур уходящих газов и атмосферного воздуха, то для оценки потерь тепла через корпус ГТУ (из-за их относительно малых значений) можно воспользоваться первым дифференциалом этой функции. В этом случае потери тепла через корпус ГТУ, приходящиеся на единицу массы топлива, потребляемого ГТУ, рассчитываются по формуле

$$q_{корп} = C_{корп1}(t_{yr} - t_{атм}),$$

$C_{корп1}$  - коэффициент, зависящий от типа ГТУ и определяемый индивидуально для каждого типа ГТУ;

$t_{yr}$  - температура уходящих газов;

$t_{атм}$  - температура атмосферного воздуха.

Механические потери в ГТУ составляют несколько десятых долей процента от всей потребляемой ГТУ тепловой энергии и для каждого типа ГТУ являются известной величиной, определенной техническими условиями ГТУ.

Коэффициент полезного действия газотурбинной установки определяют в виде отношения

относительной полезной энергии газотурбинной установки, приходящейся на единицу массы топлива, к теплотворной способности единицы массы топлива по формуле

$$\eta_{\text{ГТУ}} = E_{\text{п1}} / H,$$

где  $\eta_{\text{ГТУ}}$  - коэффициент полезного действия ГТУ;

$E_{\text{п1}}$  - относительная полезная энергия газотурбинной установки, приходящаяся на единицу массы топлива, кДж/кг;

$H$  - теплотворная способность топлива, кДж/кг;

Технический результат от применения предложенного способа заключается в том, что способ обеспечивает определение к.п.д. ГТУ на рабочих режимах в условиях эксплуатации на компрессор-ных станциях газопроводов, причем без использования измерений индивидуального расхода топливного газа и индивидуальной производительности газоперекачивающего агрегата, которые невозможно (либо очень сложно) обеспечить в условиях эксплуатации. Способ не предусматривает никаких трудоемких операций, может быть применен в газовой промышленности, энергетике и других отраслях хозяйства.

Пример. В настоящем примере приведены результаты испытаний газоперекачивающего агрегата ГПУ-16 с газотурбинной установкой ДЖ-59-П2 с помощью предлагаемого способа. В процессе испытаний на фактическом эксплуатационном режиме произведены следующие измерения и расчеты: измерена температура атмосферного воздуха  $t_{\text{атм}} = 35^\circ \text{C}$ ; определена по данным сертификата газа теплотворная способность топливного газа  $H = 48193 \text{ кДж/кг}$ ; измерена температура  $t_{\text{г}} = 10^\circ \text{C}$  топливного газа; измерена температура  $t_{\text{уг}} = 315^\circ \text{C}$  уходящих газов газотурбинной установки в выхлопном газоход; по данным сертификата газа определено теоретически необходимое количество воздуха для полного сгорания одного килограмма топливного газа  $L_0 = 17,2 \text{ кг}$ ; измерена прибором TESTO-33 концентрация кислорода  $K_{O_2} = 17,6\%$  в уходящих газах; рассчитан коэффициент избытка воздуха по формуле  $\alpha = 21/(21-K_{O_2}) = 21/(21-17,6) = 6,176$ ; рассчитана относительная масса уходящих газов ГТУ, приходящаяся на единицу массы топлива потребляемого ГТУ, равная произведению коэффициента избытка воздуха и теоретически необходимого количество воздуха для полного сгорания единицы массы топлива  $g_{\text{уг}} = \alpha L_0 = 6,176 \times 17,2 = 106,2 \text{ кг}$ ; газоанализатором определены концентрации не полностью сгоревших газов в продуктах сгорания (учтена массовая концентрация несгоревших углеводородов  $K_{\text{уг}} = 46 \times 10^{-6}$ ) и рассчитаны потери тепла из-за неполного сгорания топлива, составившие  $q_{\text{нс}} = g_{\text{уг}} H K_{\text{уг}} = 106,2 \times 48193 \times 46 \times 10^{-6} = 235 \text{ кДж/кг}$ ; определена относительная полезная энергия газотурбинной установки равная разности подводимой и отводимой от газотурбинной установки тепловой энергии, приходящейся на единицу массы топлива, учитывая при этом относительные потери тепла с уходящими газами ГТУ, приходящиеся на единицу массы топлива, относительные потери тепла из-за неполного сгорания единицы массы топлива, относительные потери тепла через корпус ГТУ, приходящиеся на единицу массы топлива и относительные механические потери, приходящиеся на единицу массы топлива по формуле

$$\begin{aligned} E_{\text{п1}} &= H C_{\text{рт}} t_{\text{г}} + (g_{\text{уг}} - 1) C_{\text{рв}} t_{\text{атм}} - q_{\text{нс}} - \\ &- g_{\text{уг}} C_{\text{руг}} t_{\text{уг}} - q_{\text{корп}} - n_{\text{мех}} = H + C_{\text{рт}} t_{\text{г}} + (g_{\text{уг}} - 1) C_{\text{рв}} t_{\text{атм}} - q_{\text{нс}} - g_{\text{уг}} C_{\text{руг}} t_{\text{уг}} - C_{\text{корп}} (t_{\text{уг}} - t_{\text{атм}}) - n_{\text{мех}} = \\ &= 48193 + 2,52 \times 10 + (106,2 - 1) \times 1,0028 \times 35 - 235 - \\ &- 106,2 \times 1,0337 \times 315 - 2,9 \times (315 - 35) - 450 = 15833 \text{ кДж}. \end{aligned}$$

В формулу для вычисления относительной полезной энергии газотурбинной установки подставлены значения: теплоемкость топливного газа  $C_{\text{рт}} = 2,52 \text{ кДж/(кг } ^\circ\text{C)}$  (данные сертификата на газ), теплоемкость воздуха  $C_{\text{рв}} = 1,0028 \text{ кДж/(кг } ^\circ\text{C)}$ , теплоемкость уходящих газов, имеющих коэффициент избытка воздуха  $\alpha = 6,176$  и температуру  $t_{\text{уг}} = 315^\circ \text{C}$ , а также значения  $C_{\text{корп1}} = 2,9 \text{ кДж/}^\circ\text{C}$  и  $n_{\text{мех}} = 300 \text{ кДж}$ , определяемые конструкцией агрегата (значения  $n_{\text{мех}}$  и  $C_{\text{корп1}}$  определены по результатам проведенных ранее для агрегатов данного типа испытаний). Рассчитан к.п.д. газотурбинной установки в виде отношения относительной полезной мощности газотурбинной установки, приходящейся на единицу массы топлива, к теплотворной способности единицы массы топлива по формуле

$$\eta_{\text{ГТУ}} = E_{\text{п1}} / H = 15833 / 48193 = 0,328.$$

