

УДК 621.438 : 504.3.064

В.П. ГЕРАСИМЕНКО, д-р техн. наук, М.С. ЕФРЕМОВ

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт», г. Харьков, Украина*

УЧЕТ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ВЫХЛОПНЫМИ ГАЗАМИ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ

Викладена методика розрахунку шкідливих речовин у вихлопних газах ГТД газоперекачувальних агрегатів за результатами випробувань.

The calculation method of bad substance in exit gas GTE gas pump unit on the result test's is proposed.

Газовая отрасль наряду с химической, металлургической, энергетической и др. вносит существенное загрязнение атмосферы выхлопными газами газотурбинных приводов газоперекачивающих агрегатов (ГПА) и газомотокомпрессоров (ГМК) ввиду развитой газотранспортной системы с компрессорными станциями (КС) магистральных газопроводов, дожимных КС месторождений и подземных хранилищ газа (ПХГ), а также газоперерабатывающих заводов. Отличительной особенностью нынешнего состояния этой отрасли является моральное и физическое старение основной части энергетического оборудования, включая ГПА, о чем свидетельствуют часто неудовлетворительные их экологические характеристики. Создание объективных методов учета вредных выбросов, их нормирования и проведение природоохранных мероприятий на всех этапах жизненного цикла газотурбинной техники при проектировании, доводке, изготовлении и эксплуатации – неотъемлемые условия совершенствования этих характеристик. Согласно Постановления Кабинета Министров Украины [1] основанием для сборов за загрязнение окружающей среды как эксплуатационных расходов на ее охрану являются усредненные вредные выбросы, используемые для определения валовых выбросов загрязняющих атмосферный воздух при компримировании природного газа в ГПА. Поэтому разработка мероприятий по улучшению экологических характеристик наряду с обновлением ГПА путем замены отработавших ресурс агрегатов на современные с малоэмиссионными камерами сгорания, а также совершенствование методик учета загрязнения атмосферы – одна из актуальных задач отрасли.

Целью данной статьи является определение усредненных выбросов ГПА при транспорте природного газа, необходимых для учета загрязнения атмосферы. Отсутствие непрерывного мониторинга с прямым контролем экологических характеристик ГПА требует создания косвенных методов расчета в эксплуатационных условиях загрязняющих веществ в выхлопных газах. Если учет выбросов CO₂, на которые имеются межгосударственные квоты по причине «парникового эффекта», может проводиться по расходу топливного газа, то для других выбросов необходимы специальные методики.

Вредные выбросы в выхлопных газах газотурбинных приводов ГПА определяют по отраслевой методике [2]. Объемные концентрации [CO], [NO], [NO₂] измеряют газоанализатором testo 350 или др. в единицах ppm (10⁻⁶). Эти концентрации пересчитывают в массовые (мг/нм³) умножением их на соответствующие плотности при нормальных условиях ($t = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$; $p = 101,3\text{ кПа}$):

$$C_{CO} = 1,25[CO]; \quad C_{NO_x} = 1,34[NO] + 2,05[NO_2]. \quad (1)$$

Одновременно с этими концентрациями измеряют содержание кислорода $[O_2]$ и двуокиси углерода $[CO_2]$, позволяющих определять коэффициент избытка воздуха в сухих продуктах сгорания $\alpha_{сп}$ и мощности выбросов (массы в единицу времени – г/с). Первоначально измеряемые концентрации получают в сухих продуктах сгорания поскольку в технологической схеме газоанализатора предусмотрена пробоподготовка – фильтрация и осушивание от влаги проб выхлопных газов. Связь действительного коэффициента избытка воздуха α с коэффициентом избытка воздуха в сухих продуктах сгорания $\alpha_{сп}$, называемого «коэффициентом разбавления сухих продуктов», может быть получена на основе анализа процесса горения метано-воздушной смеси по модели «суммарной реакции» [3] при полном сгорании топлива ($\eta_r \approx 1,0$), когда концентрации вредных веществ в продуктах сгорания малы в сравнении с основными продуктами,



Формула (2) записана для горения одной молекулы метана в воздухе, в котором 21 % по объему составляет кислород и 79 % – азот. Отсюда объемные концентрации кислорода во влажных и сухих продуктах сгорания соответственно составляют:

$$[O_2] = 2(\alpha - 1)/(9,524\alpha + 1); \quad [O_2]_{сп} = 2(\alpha - 1)/(9,524\alpha - 1). \quad (3)$$

Отношение этих концентраций называют коэффициентом соотношения объемных расходов влажных и сухих продуктов сгорания

$$K_{св} = [O_2]/[O_2]_{сп} = (9,524\alpha - 1)/(9,524\alpha + 1) = (\alpha - 0,105)/(\alpha + 0,105). \quad (4)$$

Коэффициент избытка воздуха в сухих продуктах сгорания $\alpha_{сп}$, как отношение объемной концентрации кислорода в исходном воздухе к величине, на которую уменьшилась эта концентрация в результате окисления топлива, определяют по формуле:

$$\alpha_{сп} = 0,21/(0,21 - [O_2]_{сп}). \quad (5)$$

После подстановки в эту формулу (5) выражения для объемной концентрации кислорода в сухих продуктах сгорания $[O_2]_{сп}$ (3) получим связь коэффициентов избытка воздуха в сухих и влажных продуктах сгорания:

$$\alpha = 0,895\alpha_{сп} + 0,105. \quad (6)$$

Для объективности сопоставления экологических характеристик газотурбинных приводов ГПА, кроме учета влажности выхлопных газов, принято «приводить» концентрации выбросов к стандартизованным продуктам сгорания с 15-ти процентной концентрацией кислорода. Такая концентрация кислорода, принятая за условную, в продуктах сгорания по сравнению с 21-но процентной объемной концентрацией кислорода в стандартном атмосферном воздухе предусматривает расходование 6-ти % кислорода воздуха на окисление углеводородов в камере сгорания. Эти 6 % условно приняты за потребное стехиометрическое количество кислорода, а следовательно,

относительное количество воздуха, которое определяет условный коэффициент избытка воздуха, составляет $\alpha_y = 21/6 = 3,5$.

Таким образом, массовые концентрации CO и NO_x (1), приведенные к условной 15-ти процентной концентрации кислорода в сухих продуктах сгорания, определяют по формулам:

$$C_{CO}^{15} = C_{CO} \cdot \alpha_{сп} / \alpha_y; \quad C_{NO_x}^{15} = C_{NO_x} \cdot \alpha_{сп} / \alpha_y. \quad (7)$$

Описанные выкладки положены в основу методики расчета экологических характеристик ГПА по результатам измерений газоанализатором. Для пересчета концентраций вредных веществ, измеренных газоанализатором в сухих продуктах сгорания, к их действительным концентрациям во влажных выхлопных газах используют коэффициент $K_{св}$ (4).

По измерению расхода топливного газа в ГПА $Q_{тг}$ (нм³/час), коэффициенту избытка воздуха α (6) и стехиометрическому коэффициенту L_0 , который для метано-воздушной смеси составляет $L_0 = 9,524 \text{ м}^3/\text{м}^3$, определяют объемный расход воздуха в нормальных условиях через газотурбинный привод – двигатель

$$Q_b = \alpha L_0 Q_{тг} / 3600, \text{ нм}^3/\text{с}. \quad (8)$$

Весовой расход воздуха при этом составляет $G_b = \rho_0 Q_b = 1,293 Q_b$, кг/с, а расход выхлопных газов –

$$Q_r = (1 + \alpha L_0) Q_{тг} / 3600, \text{ нм}^3/\text{с}; \quad G_r = (1 + 1/\alpha L_0) G_b,$$

где $L'_0 = 17,1 \text{ кг}/\text{кг}$; $\rho_0 = 1,293 \text{ кг}/\text{нм}^3$ – плотность воздуха при нормальных условиях.

По расходу выхлопных газов Q_r и массовым концентрациям вредных веществ C_i (1) рассчитывают «мощности выбросов» по каждому веществу i $M_i = Q_r C_i K_{св} \cdot 10^{-3}$, г/с.

В ГПА под удельным выбросом m_i понимают количество вредного вещества, отнесенное к единице располагаемого тепла топлива, подводимого в камеру сгорания за 1 секунду $m_i = 3600 M_i / (Q_{тг} \cdot H_u)$, (г/МДж), где $H_u = 34,54 \text{ МДж}/\text{м}^3$ – теплота сгорания метана.

Изложенная методика была использована при обработке результатов испытаний 13-ти ГПА типа ГТК-10И. Результаты испытаний представлены на рисунке в виде зависимости мощности выбросов окислов азота от расхода топливного газа. Целью испытаний и их статистической обработки было получение корреляционной зависимости мощности выбросов NO_x от режима работы ГПА ГТК-10И, которую можно было бы использовать как среднестатистическую экологическую характеристику ГТК-10И при учете

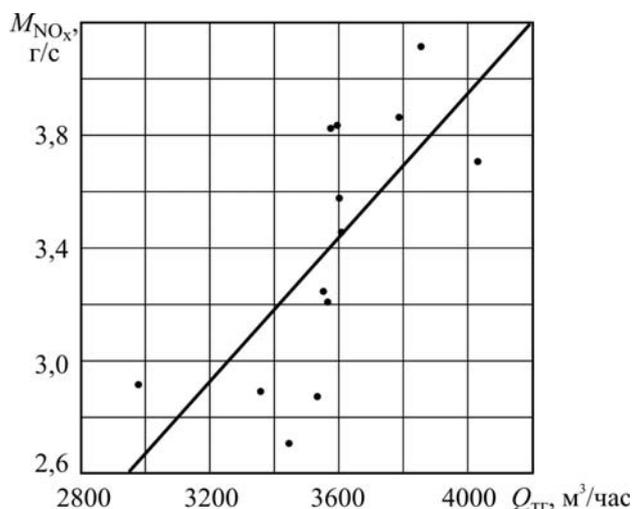


Рис. Экологическая характеристика ГПА ГТК-10И

загрязнения окружающей атмосферы и в расчетах материального возмещения отраслью за такое загрязнение. Необходимость такого типа зависимостей, позволяющих по расходу топлива газа, как режимному параметру ГПА, рассчитывать среднестатистические вредные выбросы для данной группы ГПА, объясняется отсутствием их непрерывного измерения во время эксплуатации штатными системами контроля. Обработка результатов испытаний (рис.) методом линейного корреляционного анализа [4] позволила получить уравнение регрессии $M_{NO_x} = 1,244 \cdot 10^{-3} Q_{ТГ} - 1,079$. Подобные зависимости могут быть получены и по другим вредным выбросам (CO , C_nH_m , CO_2 , SO_2).

Внешнее сравнительно большое рассеивание опытных точек относительно прямой регрессии на рисунке объясняется несколькими причинами:

- приборными и методическими погрешностями;
- разным техническим состоянием ГПА при большой их выборке;
- особенностью программы регулирования ГПА ГТК-10И и др.

Особенность программы регулирования ГПА ГТК-10И с регулируемым сопловым аппаратом силовой турбины заключается в перекрестной ее схеме, при которой постоянная частота вращения турбокомпрессора обеспечивается автоматом поворота сопловых лопаток, а потребная мощность на валу силовой турбины для заданной оператором ее частоты вращения обеспечивается регулятором подачи топливного газа. Эта особенность свидетельствует о том, что точность уравнения регрессии может быть повышена переходом к двум режимным переменным из контролируемых параметров: $Q_{ТГ}$, $n_{ТГ}$, T_T^* . Учет технического состояния ГПА, уровня его загрузки нагнетателем и др., как дополнительных факторов, может не только повысить точность расчетов выбросов загрязняющих веществ, но и принимать технологические меры по их уменьшению.

Необходимо также отметить, что изложенная методика позволяет определять расходы воздуха (8) и выхлопных газов. Расход воздуха-газа является одним из важнейших параметров, прямое измерение которого отсутствует в штатных системах контроля ГПА. Наличие сведений о расходе воздуха через двигатель расширяет возможности решения задач теплотехнической диагностики и определения технического состояния ГПА, а также решения других задач, связанных с эксплуатацией агрегата.

Литература

1. Порядок встановлення нормативів збору за забруднення навколишнього природного середовища і стягнення цього збору / Постанова Кабінету Міністрів України № 303 від 01.03.99 р.
2. Методика визначення питомих викидів забруднювальних речовин від основних виробництв ДК «Укртрансгаз». – К.: ВАТ «УЦЕБОПнафтогаз», 2000. – 24 с.
3. Герасименко В.П. О неустойчивости горения в камерах сгорания ГТД // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. Вестник НТУ «ХПИ»: Сб. научн. трудов. – 2007. – № 2. – С. 83-85.
4. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул: Учебное пособие. – М.: Высш. школа, 1982. – 224 с.

© Герасименко В.П., Ефремов М.С., 2008