

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОПРАВОЧНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ПРИ
ПЕРЕСЧЕТЕ ВЫБРОСОВ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ
DETERMINATION OF THE CORRECTION FACTOR FOR
RECALCULATION OF EMISSIONS OF RATED POLLUTANTS

Айдарова З. Б., Рыжова Т. В., к-т техн. наук; Ярмольчик М. А.,
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь
Z. Aidarova, T. Ryzhova, Candidate of technical Sciences; M. Yarmolchik
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Аннотация. Приведена методика расчета выбросов оксидов азота в зависимости от условий измерения. Получены коэффициенты пересчета значений выбросов загрязняющих веществ из принятых единиц в ЕС (мг/ кВт·ч) в единицы, указанные по экологическим правилам ЕАС (мг/м³) с учетом соответственно нормируемого коэффициента избытка воздуха.

Abstract. A method for calculating emissions of nitrogen oxides depending on the measurement conditions is given. Conversion factors for pollutant emissions from accepted units in the EU (mg/kWh) to units specified in accordance with the EAC environmental rules (mg/m³) are obtained, taking into account the correspondingly normalized excess air coefficient.

Ключевые слова: выбросы, оксиды азота, коэффициент пересчета.

Key words: emissions, nitrogen oxides, conversion factor.

ВВЕДЕНИЕ

Отметим, что производители горелок по стандарту EN DIN [1] определяют количественные значения концентрации загрязняющих веществ на выходе из камеры сгорания в мг/ кВт·ч для сухих газов при влажности воздуха, поступающего на горение $d = 10$ г/кг [2]. Эти единицы (мг/ кВт·ч) выбраны потому, что при их использовании количество загрязняющих веществ относится к единице выработанной тепловой энергии и, в таком случае, не имеет значения при стехиометрическом или нестехиометрическом горении производятся измерения, т. е. количество O₂ в дымовых газах учитывать не требуется. На первый взгляд подобный подход кажется верным. Действительно, с увеличением избытка воздуха увеличивается объем выбросов, но при этом уменьшается средняя температура уходящих газов. Теплоемкость же CO₂ [3] и H₂O [4] – основных компонентов дымовых газов – в диапазоне температур устойчивого горения изменяется незначительно, и количество теплоты, определенное как произведение средней температуры и объема, остается близким к неизменному при разных значениях коэффициента избытка воздуха. В Республике Беларусь и в странах СНГ показатели выбросов определяются в мг/м³. Такие единицы непосредственно зависят от объема выбросов. В результате возникает задача одно-

значного пересчета указанных единиц. Для этого требуется задаться дополнительным значением – либо коэффициентом избытка воздуха α , либо объемной концентрацией кислорода $K_{V_{O_2}}$ в дымовых газах. Т. к. качественное сжигание топливовоздушной смеси современными дутьевыми горелками с наименьшими тепловыми потерями с уходящими газами возможно при $\alpha \sim 1,15 \dots 1,20$, что соответствует концентрации кислорода $K_{V_{O_2}} \sim 2,8 \dots 3,5 \%$, то производители горелок установили удобное правило пересчета для среднего целого фиксированного значения $K_{V_{O_2}} = 3 \%$ [5]. Но для полной однозначности требуется также иметь коэффициент прямого пересчета $\text{мг/кВт}\cdot\text{ч}$ в мг/м^3 . Для этого обычно указывается обратный коэффициент f , значение которого по разным источникам варьируется, например, $f = 1,001$ [5] или $f = 1,164$ [6] для природного газа класса E (H) и $f = 1,018$ для природного газа класса L (LL) [5] при $K_{V_{O_2}} = 3 \%$ или $f = 0,857$ при $K_{V_{O_2}} = 0 \%$ [7]. Условия нахождения коэффициента пересчета при этом не оговариваются. Более того, эмпирически удобное, но нелегитимное для прямых расчетов установление $K_{V_{O_2}} = 3 \%$ в информационно-справочных каталогах производителей горелок [5] приводит к получению не совсем точных расчетных значений коэффициентов пересчета. Это связано, прежде всего, с тем, что в Европейских странах очень часто используются смешенные горючие газы различного происхождения.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Для природных газов теоретически необходимый объем воздуха на горение можно рассчитать по сокращенной формуле:

$$V_e^T = \frac{1}{V_{O_2}^0} \left[\sum \left(m + \frac{n}{4} \right) C_m H_n - O_2 \right], \quad (1)$$

где $V_{O_2}^0 = 20,946$ – объемная концентрация кислорода в атмосферном воздухе [8];

$C_m H_n$ – углеводороды, входящие в состав газа;

m и n – индексы углеводорода соответственно по углероду и водороду;

O_2 – объемная концентрация кислорода в горючем газе.

Для технологических и искусственных горючих газов, где присутствуют CO , H_2 и H_2S :

$$V_e^T = \frac{1}{V_{O_2}^0} \left[0,5(CO + H_2) + 1,5H_2S + \sum \left(m + \frac{n}{4} \right) C_m H_n - O_2 \right]. \quad (2)$$

Производители дутьевых горелок определяют концентрацию вредных выбросов при остаточном кислороде $K_{V_{O_2}} = 3 \%$, что соответствует

$\alpha = 1,167$. Но вопрос для поставленной задачи заключается не в том, чтобы определить коэффициент пересчета для данного конкретного значения кислорода в дымовых газах, а в том, чтобы определить лимитирующие показатели выбросов для того или иного эмиссионного класса горелок. Хотя показания в мг/ кВт·ч действительно практически не зависят от количества кислорода в дымовых газах, но, т. к. с ростом избытка воздуха будет увеличиваться и объем отходящих газов, коэффициент пересчета в мг/м³ будет также увеличиваться. Если нам понадобится определить коэффициент пересчета при остаточном содержании кислорода в дымовых газах $K_{V_{O_2}} = X\%$, то расчет надо отнести к объему воздуха на горение увеличенному на коэффициент избытка воздуха:

$$V_{\text{в-при-O}_2=X\%}^R = V_{\text{в}}^T \cdot \frac{V_{O_2}}{V_{O_2} - K_{V_{O_2}}} = \alpha \cdot V_{\text{в}}^T. \quad (3)$$

После нахождения этой величины, казалось бы, можно вычислить коэффициент пересчета тепловых единиц в объемные. Однако в применяемых стандартных газоанализаторах, чтобы влага дымовых газов (а в ней растворен NO₂, что придает ей некоторую степень агрессивности) из взятой пробы не попала на чувствительный элемент, ее конденсируют и сливают. В результате показания газоанализатора относятся к сухим дымовым газам. Вследствие этого, необходимо рассчитать объем сухих продуктов сгорания. Для этого удобнее найти сначала количество влаги в дымовых газах:

$$V_{H_2O}^{O_2=X\%} = 0,01 \left(\sum \frac{n}{2} C_m H_n + 0,1 \frac{\rho_{\text{в}}^0}{\rho_{H_2O}^0} RH \times V_{\text{в-при-O}_2=X\%}^R \right), \quad (4)$$

где $\rho_{\text{в}}^0 = 1,293 \text{ кг} / \text{м}^3$ – плотность сухого воздуха при нормальных условиях;

$\rho_{H_2O}^0 = 0,840 \text{ кг} / \text{м}^3$ – плотность водяного пара при нормальных условиях;

RH – относительная влажность воздуха, г/кг;

0,01 – коэффициент пересчет содержания ингредиентов % → доли;

0,01×0,1 = 0,001 – коэффициент пересчета кг → г.

Т. к. мы определили удельный теоретический объем воздуха на горение, то для нахождения удельного объема дымовых газов прибавим 1 м³ (т. е. объем горючего газа). Тогда объем сухих продуктов сгорания:

$$V_{\text{с.г.-при-O}_2=X\%}^R = \left(V_{\text{в-при-O}_2=X\%}^R + 1 \right) - V_{H_2O}^{O_2=X\%}. \quad (5)$$

Для расчета принимаем условия относительной влажности воздуха в соответствии с принятыми в [5]: $RH = 10 \text{ г/кг}$. В результате для пересчета мг/ кВт·ч в мг/м³ находим обратный коэффициент:

$$f = \frac{3,6}{\frac{Q_p^H}{V_{с.г. при O_2=X \%}^R}}, \quad (6)$$

где 3,6 – коэффициент пересчета кВт·ч→МДж.

Применяя такой метод пересчета можно получить значения выбросов загрязняющих веществ в мг/м³, если лимитирующие значения указаны в мг/ кВт·ч, но специально оговорено при каком значении остаточного кислорода или коэффициенте избытка воздуха. Действительно, при подтверждении сертификата эмиссионного класса для конкретного типа горелочных устройств квалификационные испытания проводятся при избытке воздуха для полного сгорания топлива. Для качественной горелки этот избыток и будет составлять ~3 % кислорода в дымовых газах. А т. к. мг/ кВт·ч относится к выделенному теплу, то и значения концентраций в этих единицах практически не будут зависеть от содержания кислорода. Поэтому не требуется никакого пересчета на стехиометрические параметры и производители горелок обоснованно утверждают те значения кислорода, которые были замерены при квалификационных испытаниях.

В результате можно определить предельные значения вредных выбросов в мг/м³ для того или иного типа горелок, получивших Европейскую классификацию в мг/ кВт·ч для конкретного состава горючего газа, подставляя в формулы (3–6) значение $K_{V_{O_2}} = 3 \%$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены факторы, определяющие расчетные значения нормированных загрязняющих веществ при сжигании углеводородного топлива. Проанализированы коэффициенты пересчета загрязняющих веществ при сжигании природного газа. Предложен оптимальный метод определения предельных значений вредных выбросов в мг/м³ при указанных значениях производителями горелочных устройств по Европейской классификации в мг/ кВт·ч.

ЛИТЕРАТУРА

1. E DIN EN 676:2017-02 (D/E) Erscheinungsdatum: 2017-01-13 Gebläsebrenner für gasförmige Brennstoffe; Deutsche und Englische Fassung FprEN 676:2016
2. Der Arbeitsausschuss NA 041-01-63 AA "Gasbrenner mit Gebläse (SpA CEN/TC 131)"
3. Вукалович М. П., Алтунин В. В. Теплофизические свойства двуокиси углерода. – М.: Атомиздат, 1965. – 456 с.
4. Александров А. А. Теплофизические свойства рабочих веществ теплоэнергетики : справочник / А. А. Александров, К. А. Орлов, В. Ф. Очков. – М. : Издательский дом МЭИ, 2009. – 224 с.

5. Руководство по формулам для расчета данных в теплотехнике. – Режим доступа: https://www.weishaupt.ru/service/complex/pdf/1841_RU_Januar_2015.pdf. – Дата доступа: 30.04.2023.

6. BREEAM International 2013 manual. – Режим доступа: http://www.breeam.com/BREEAMInt2013SchemeDocument/content/12_pollution/pol_02.htm. – Дата доступа: 30.04.2023.

7. "Air Composition". The Engineering ToolBox. – Режим доступа: https://www.engineeringtoolbox.com/air-composition-d_212.html. – Дата доступа: 30.04.2023.