

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ИЗБЫТКА ВОЗДУХА С УЧЕТОМ КЛИМАТИЧЕСКОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ

Артур Запорожец

ИТТ НАН Украины, 03057, г. Киев, ул. Желябова, 2а, e-mail: art.morco@gmail.com

Резюме: Рассматриваются методы определения коэффициента избытка воздуха, основанные на измерении концентрации газообразных продуктов горения тепловых агрегатов. Показано, что величина объемной концентрации кислорода в окружающей среде, используемая для определения коэффициента избытка воздуха, не является постоянной (21% по объему), а зависит от ряда климатических факторов – температуры, абсолютного давления и относительной влажности. Предложены способы измерения коэффициента избытка воздуха с учетом текущей концентрации кислорода в воздухе.

Ключевые слова: коэффициент избытка воздуха, горение, оптимизация, измерение, кислородные сенсоры, уходящие газы, теплоэнергетика

Введение

Рациональное использование топлива и повышение эффективности его сжигания на современном этапе является важной задачей энергетики. Ее решение позволит только за счет потерь тепла получить до 20% экономии топлива и энергии [1]. При решении указанной задачи особое место занимает проблема контроля избыточного кислорода в уходящих газах.

Для того чтобы обеспечить выбор оптимального режима сжигания важно правильно регулировать поступление воздуха в камеру сгорания. Если воздуха будет поступать мало, то количество кислорода для полного сгорания топлива будет недостаточно, и часть горючих материалов вместе с продуктами неполного сгорания, будет поступать в атмосферу. Очевидно, что такое сжигание приводит к чрезмерному расходу топливных ресурсов и ухудшение экологической ситуации.

Для обеспечения процесса полного сгорания топлива нужно подводить достаточное количество воздуха, при этом избыток воздуха в камере сгорания недопустим. В таком случае большое тепла расходуется на нагрев воздуха, которое не участвует в химическом процессе горения из-за недостаточного перемешивания с топливом.

Для контроля качества сжигания топлива вводится коэффициент избытка воздуха (КИВ), теоретическое значение которого:

$$\alpha = M / M_{\text{теор}},$$

где M – действительная масса воздуха, которая подается в камеру сгорания на 1 кг топлива, $M_{\text{теор}}$ – теоретически необходимая масса воздуха для обеспечения стехиометрической реакции горения. На практике КИВ зависит от вида топли-

ва, способа его сжигания, конструкции камеры сгорания и определяется на основе опытных данных. Отклонение от стехиометрического состава ($\alpha \approx 1$) в сторону недостатка или избытка воздуха приводит к образованию обогащенной ($\alpha < 1$) или обедненной ($\alpha > 1$) смеси соответственно (рис. 1).

1. Методы, используемые для определения КИВ

На практике для определения КИВ используются расчетные методы. Наиболее точно данный коэффициент определяется по «азотной» формуле, которая при полном сжигании топлива имеет вид:

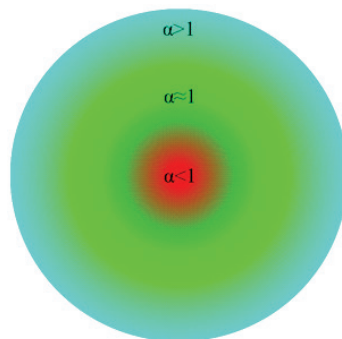


Рис. 1. Показательная схема изменения состава воздушно-топливной смеси в зависимости от КИВ

$$\alpha = \frac{[N_2]}{[N_2] - 3,76 \cdot [O_2]}, \quad (1)$$

где $[N_2]$, $[O_2]$ – содержание азота и кислорода в сухих продуктах горения, об. %, 3,76 – соотно-

шение содержаний азота и кислорода в воздухе,

$$[N_2] = 100 - ([RO_2] + [O_2]), \quad (2)$$

$[RO_2]$ – содержание трехатомных газов в сухих продуктах горения, об. %.

При неполном сгорании топлива «азотная» формула приобретает вид:

$$\alpha = \frac{[N_2]}{[N_2] - 3,76 \cdot A}, \quad (3)$$

$$A = [O_2] - 2 \cdot [CH_4] - 0,5 \cdot [CO] - 0,5 \cdot [H_2], \quad (4)$$

где $[CH_4]$, $[CO]$ и $[H_2]$ – содержание в продуктах горения соответственно метана, монооксида углерода и водорода, об. %, 2 и 0,5 – стехиометрические коэффициенты реакций горения.

Для примерной оценки значения α при отсутствии в дымовых газах горючих компонентов пользуются «углекислотной» формулой:

$$\alpha = \frac{[RO_2^{max}]}{[RO_2]}, \quad (5)$$

где $[RO_2^{max}]$ – максимально возможное содержание трехатомных газов в продуктах горения, об. %,

$$[RO_2^{max}] = \frac{[RO_2]}{100 - 4,76 \cdot [O_2]} \cdot 100, \quad (6)$$

4,76 – коэффициент пересчета содержания кислорода в воздухе.

Наиболее часто на практике значение КИВ определяют «кислородной» формуле. В случае полного сгорания топлива:

$$\alpha = \frac{21}{21 - [O_2]}, \quad (7)$$

где 21 – «принятое» содержание кислорода в воздухе, об. %.

Таким образом, при расчете КИВ значение объемной концентрации кислорода в воздухе считается постоянным (на уровне 21%). Однако данный параметр не является константой, что подтверждается основными термодинамическими законами.

2. Расчет текущей концентрации кислорода в воздухе

Согласно закону Дальтона, состав и процентное соотношение газов, входящих в воздух, строго постоянны, как по объему, так и по массе.

Соотношение газов воздуха считается одним и тем же в любом районе земного шара, почти не изменяясь ни от высоты, ни от широты местности. В горах на большой высоте, на экваторе и в районе полюсов, так же как и на равнине, долю кислорода в воздухе детерминируют на одном уровне.

За постоянством процентного соотношения газов воздуха завуалированы значительные колебания абсолютных величин газов воздуха, в том числе и кислорода, так как совершенно ясно, что «доля» одного процента кислорода в смеси газов будет разной при различных физических состояниях воздуха (влажного или сухого, плотного или разреженного, холодного или теплого).

На основании этих утверждений и проведенных экспериментов была предложена новая количественная величина параметра кислорода – парциальная плотность кислорода [2]. Ее суть в том, что при суточной (сезонной) динамике колебаний основных метеорологических характеристик (температуры, абсолютной влажности воздуха, абсолютного атмосферного давления), обусловленных динамикой атмосферных процессов, происходит перераспределение во времени и пространстве парциальной плотности кислорода в воздухе, что проявляется в суточной (сезонной) периодичности и погодных аномалиях. Таким образом, можно с уверенностью говорить о том, что концентрация кислорода в воздухе (в том числе и объемная) не является постоянной величиной и может значительно колебаться не только в течение всего календарного года, но и суток, влияя тем самым на текущее значение такой величины как КИВ.

Аналитическое значение парциальной плотности кислорода (E , г/м³) прямо пропорционально атмосферному давлению (P , гПа) за вычетом парциального давления водяного пара (e , гПа) и обратно пропорционально температуре воздуха (T , К):

$$E = 23,15 \cdot 10^3 \cdot \frac{P - e}{R \cdot T}, \quad (8)$$

где R – удельная газовая постоянная для сухого воздуха, гПа.

Расчет парциального давления водяного пара определяется по формуле:

$$e = \varphi \cdot p_{нас}, \quad (9)$$

где φ – влажность воздуха, а $p_{нас}$ – величина, которую можно определить согласно рекомендациям Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation [3]:

$$p_{нас}(P, T') = f(P) \cdot r(T'); \quad (10)$$

$$f(P) = 1,0016 + 3,15 \cdot 10^{-6} \cdot P - 0,074 \cdot P^{-1}; \quad (11)$$

$$r(T') = 6,112 \cdot e^{\frac{17,62 \cdot T'}{243,12 + T'}}, \quad (12)$$

где T' – температура воздуха в градусах Цельсия, °С.

Переход к объемной концентрации кислорода происходит по следующему соотношению:

$$[O_2] = \frac{6,236 \cdot E \cdot T}{P' \cdot M_{O_2}}, \quad (13)$$

где $[O_2]$ – объемная концентрация кислорода в воздухе, P' – атмосферное давление в мм.рт.ст., M_{O_2} – молярная масса кислорода.

В ходе исследования были проанализированы изменения температуры, абсолютного давления и относительной влажности во всех областных центрах Украины (за исключением Донецка, Луганска, Севастополя) на протяжении 2014 года. На основании этих данных построены графические характеристики сезонного изменения объемной концентрации кислорода в воздухе (рис 2).

3. Повышение точности измерения КИВ

Решение выявленной проблемы основывается на усовершенствовании стандартного способа определения коэффициента избытка воздуха путем измерения текущей концентрации кислорода в окружающей среде [4]. Данное предложение обеспечивает исключение методической погрешности и повышает точность измерения указанного способа. Таким образом, конечная формула для определения КИВ выглядит следующим образом:

$$\alpha = \frac{[O_2']}{[O_2] - [O_2]}, \quad (14)$$

где $[O_2']$ – текущее содержание кислорода в воздухе, об.%, $[O_2]$ – содержание кислорода в продуктах горения, об.%

Способ определения КИВ, основанный на измерении текущей концентрации кислорода в окружающей среде, реализуется при помощи схемы, представленной на рис. 3, где 1 – уходящие газы, 2 – внутренний кислородный сенсор, 3 – аналитический блок, 4 – дисплей, 5 – внешний кислородный сенсор [4].

В отверстие дымового тракта устанавливается внутренний кислородный сенсор, измеряющий

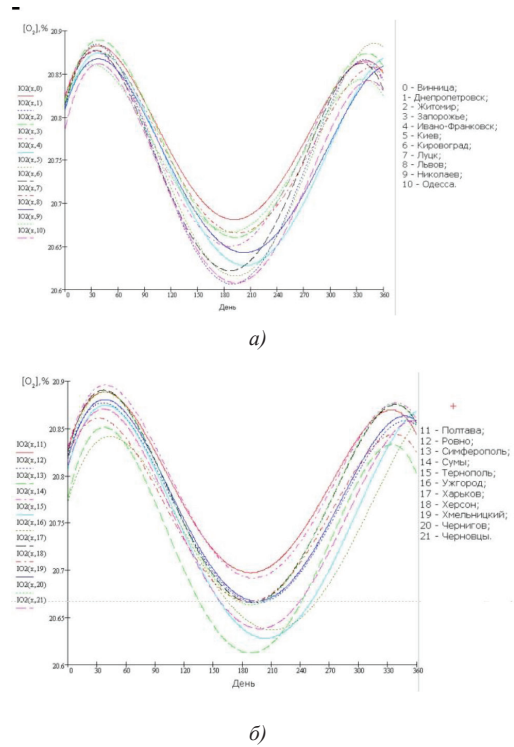


Рис. 2. Сезонные изменения объемной концентрации кислорода в воздухе на территории Украины в 2014 году (а – Винниця, Днепропетровск, Житомир, Запорожье, Ивано-Франковск, Киев, Кировоград, Луцк, Львов, Николаев, Одесса; б – Полтава, Ровно, Симферополь, Сумы, Тернополь, Ужгород, Харьков, Херсон, Хмельницкий, Чернигов, Черновцы)

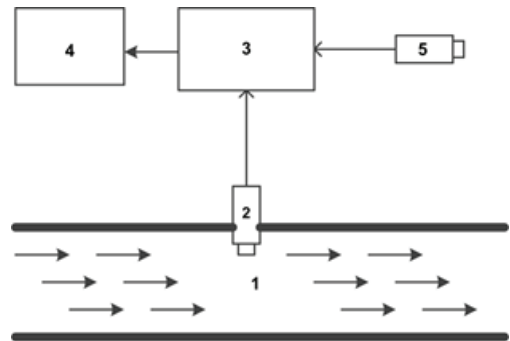


Рис. 3. Способ реализации повышения точности определения КИВ с использованием двух кислородных сенсоров

остаточную концентрацию кислорода в дымовых газах. Внешний кислородный сенсор размещается в окружающей среде (вне дымового тракта) и измеряет концентрацию кислорода в воздухе. Сигналы с обоих сенсоров поступают в аналитический блок, который определяет КИВ согласно формулы (14). Значение КИВ отображается на дисплее.

Измерение КИВ с учетом текущей концентрации кислорода в воздухе позволит существенно повысить точность и стабильность определения КИВ, уменьшить эксплуатационные расходы при оптимизации процесса горения.

Заключение

Предложенное решение повышения точности измерения КИВ (для всех газоанализирующих устройств) имеет чрезвычайную перспективность, поскольку учитывает методическую погрешность измерения, которая изначально заложена в электронную систему большого числа газоанализаторов. Применение предложенного способа позволит значительно повысить точность измерения КИВ (до 10%).

Литература

[1] **В.П. Бабак, А.О. Запорожець.** Система якості горіння повітряно-паливної суміші в котлоагрегатах малої та середньої потужності. *Методи та прилади контролю якості*, №2(33), 2015, С. 106-114.

[2] **В.Ф. Овчарова.** О содержании кислорода в атмосферном воздухе. *Труды международного симпозиума ВМО/ВОЗ/ЮНЕП СССР, 22-26 сентября 1986.*, Ленинград, СССР.

[3] Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. *World Meteorological Organization*, №8, 2008, 119 p.

[4] **А.О. Запорожець, В.П. Бабак, О.О. Редько.** Підвищення точності вимірювання коефіцієнта надлишку повітря в котлоагрегатах із застосуванням газоаналізаторів електрохімічного типу. *Промислова теплотехніка*, №1, 2015, С. 82-96.

Сведения об авторах

Запорожец Артур Александрович. Национальный авиационный университет (2013), аспирант (с 2013), м.н.с. (с 2013), Институт технической теплофизики НАН Украины, отдел теплотметрии, диагностики и оптимизации в энергетике. Научные интересы: теплоэнергетика

IMPROVING THE METHOD OF EXCESS AIR RATIO DETERMINATION DUE TO CLIMATE VARIATION

Arthur Zaporozhets

IET NAS of Ukraine, 03057, Kiev, 2a Zhelyabova Str., e-mail: art.morco@gmail.com

Abstract: Considered the methods excess air ratio determination based on the measurement of the combustion gases concentration in the thermal units. Showed that the value of oxygen volume concentration in the environment, which used in excess air ration measuring, is not constant (21% in volume), and depends from climatic factors – temperature, absolute pressure and relative humidity. Proposed the method for excess air ratio measuring based on the oxygen current concentration in the air.

Keywords: excess air ratio, combustion, optimization, measurement, oxygen sensors, exhaust gas, power system

References

[1] **V.P. Babak, A.O. Zaporozhets.** Systema jakosti gorinnja povitrjano-palyvnoi sumishi v kotloagregatah maloi ta seredn'oi potuzhnosti. *Metody ta pryklady kontrolju jakosti*, №2(33), 2015, S. 106-114.

[2] **V.F. Ovcharova.** O sodержanii kisloroda v atmosfernom vozduhe. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma VMO/VOZ/JuNEP SSSR, 22-26 sentjabrja 1986., Leningrad, SSSR.*

[3] Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. World Meteorological Organization, №8, 2008, 119 p.

[4] **A.O. Zaporozhets, V.P. Babak, O.O. Redko.** Pidvyshennja tochnosti vymirjuvannja koeficijenta nadlyshku povitlja v kotloagregatah iz zastosuvannjam gazoanalizatoriv elektrohimičnogo typu. *Promyslova teplotehnika*, №1, 2015, S. 82-96.

МЕТОД ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ НА КОЕФИЦИЕНТА НА ИЗЛИШЪК НА ВЪЗДУХ С ОТЧИТАНЕ НА КЛИМАТИЧНИТЕ КОЛЕБАНИЯ

Артур Запорожец

ИТТ НАН Украйна, 03057, г. Киев, ул. Желябова, 2а, e-mail: art.morco@gmail.com

Резюме: В доклада се разглеждат методите за определяне на коефициента на излишък на въздух, основаващи се на измерване на концентрацията на газообразни горивни продукти на топлинни агрегати. Посочено е, че стойността на обемната концентрация на кислород в околната среда, използвана за определяне на коефициента на излишък на въздух не е постоянна (21% от обема), а зависи от редица климатични фактори - температура, абсолютно налягане и относителна влажност. Предложени са начини за измерване на коефициента на излишък на въздух, отчитащ текущата концентрация на кислород във въздуха.

Ключови думи: коефициент на излишък на въздух, горене, оптимизация, измерване, кислородни сензори, изгорели газове, топлоенергетика.