



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ОБЪЕМНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ КИСЛОРОДА В ВОЗДУХЕ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ПРОЦЕСС ГОРЕНИЯ

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ НА ПРОМЕНИТЕ ОБЕМНАТА КОНЦЕНТРАЦИЯ НА КИСЛОРОД ВЪВ ВЪЗДУХА И НЕГОВОТО ВЛИЯНИЕ ВЪРХУ ПРОЦЕСА НА ГОРЕНЕ

EXPERIMENTAL RESEARCH OF CHANGES THE VOLUME CONCENTRATION OF OXYGEN IN THE AIR AND INFLUENCE ON THE COMBUSTION PROCESS

член-корр. НАН Украины, проф., д.т.н. Бабак В.П.*, аспирант, м.н.с. Запорожец А.А.*, аспирант Редько А.А.**

*Институт технической теплофизики НАН Украины – Киев, Украина

**Национальный авиационный университет – Киев, Украина

art.morco@gmail.com

Abstract: The effect of changes the volume oxygen concentration in the air on the combustion process are showed. Suggested the model for calculating the current concentration of oxygen in air depending from the main meteorological parameters – temperature, absolute pressure and relative humidity. Performed the experimental studies of the daily/seasonal changes of volume oxygen concentration in the air on the basis of direct and indirect measurements. Performed a metrological evaluation of results, confirmed the adequacy of the proposal model. Proposed a formula for calculating the air excess ratio based on the current concentration of oxygen in the air.

KEYWORDS: oxygen concentration, air, weather, temperature, humidity, pressure, burning, air excess ratio

1. Введение

Для определения эффективности и экономичности процесса горения используют коэффициент избытка воздуха (КИВ, α), который определяется как отношение действительного расхода воздуха V_p к его теоретическому значению V_t .

На практике (в газоанализирующих устройствах) для определения КИВ используют «кислородную» формулу, которая при полном сгорании имеет вид [1]:

$$(1) \alpha = \frac{21}{21 - O_2}$$

где 21 – «традиционное» содержание кислорода в воздухе, об.%, O_2 – содержание кислорода в продуктах горения, об.%

Значение КИВ зависит от вида сжигаемого топлива, конструкции горелочного и топочного устройства, а также от текущей концентрации кислорода в воздухе. При расчете КИВ уровень объемной концентрации кислорода в воздухе детерминируют на уровне 21%. Однако многолетние климатофизические исследования позволяют опровергнуть это утверждение.

Воздух – это естественная смесь газов, на 98-99% состоит из азота и кислорода, а также углекислого газа, воды, водорода, инертных газов и др. (табл. 1).

Таблица 1

Состав воздуха

Компонент	Обозначение	Об. кон., %	Мас. кон., %
Азот	N_2	78.08	75.50
Кислород	O_2	20.95	23.15
Аргон	Ar	0.93	1.29
Углекислый газ	CO_2	31.4×10^{-3}	4.6×10^{-2}
Неон	Ne	18.18×10^{-4}	1.4×10^{-3}

Метан	CH_4	2×10^{-4}	8.4×10^{-5}
Гелий	He	5.24×10^{-4}	7.3×10^{-5}

Согласно закону Дальтона, состав и процентное соотношение газов, входящих в воздух, строго постоянны, как по объему, так и по массе. Однако процентное содержание кислорода в атмосферном воздухе как относительная величина, свидетельствует лишь о постоянстве газового состава и соотношения соотношения газов в воздухе, и не может быть использована в качестве количественного параметра кислорода.

Для подтверждения рассмотренной проблемы в работе [2] была предложена новая количественная величина параметра кислорода – парциальная плотность кислорода.

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, концентрация кислорода (в том числе и объемная), не является постоянной величиной и может значительно колебаться не только в течении всего календарного года, но и суток, влияя тем самым на текущее значение такой величины как КИВ.

Аналитическое значение парциальной плотности кислорода (E , $г/м^3$) прямо пропорционально атмосферному давлению (P , гПа) за вычетом парциального давления водяного пара (e , гПа) и обратно пропорционально температуре воздуха (T , К):

$$(2) E = 23.15 \cdot 10^3 \cdot \frac{P - e}{R \cdot T}$$

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

Расчет парциального давления водяного пара определяется по формуле:

$$(3) e = \varphi \cdot p_{\text{нас}},$$

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

$$(4) p_{\text{нас}}(P, T) = f(P) \cdot r(T),$$

$$(5) 1.0016 + 3.15 \cdot 10^{-5} \cdot P - 0.074 \cdot P^{-1},$$

$$(6) r(T) = 6.112 \cdot e^{\frac{17.62T}{243.12+T}},$$

где T – температура воздуха в градусах Цельсия, °C.

Переход к объемной концентрации кислорода происходит по следующему соотношению:

$$(7) [O_2] = \frac{6.236 \cdot E \cdot T}{P \cdot M_{O_2}},$$

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

Таким образом, конечный аналитический вид для расчета объемной концентрации кислорода в воздухе имеет вид [4]:

$$[O_2](P, f, \varphi) = 20.957 \cdot \left(1 - \frac{e(P, T, \varphi)}{P} \right).$$

2. Постановка задачи

Цель работы – провести экспериментальные исследования изменения суточной/сезонной объемной концентрации кислорода в воздухе. На основе полученных результатов провести их метрологическую оценку и проверить адекватность предлагаемой модели расчета текущей объемной концентрации кислорода в воздухе с учетом метеорологических параметров – температуры, абсолютного давления и относительной влажности.

3. Решение проблемы

В работе проводился эксперимент по проверке адекватности предложенной модели суточного/сезонного изменения концентрации кислорода в воздухе путем сравнения результатов прямых измерений концентрации кислорода в воздухе, проведенных с помощью газоанализатора ОКСИ-5М ($\Delta_{O_2} = \pm 0,1\%$), и косвенных – на основе анализа метеорологических параметров – температуры (метеорологический психрометрический термометр ТМ4-1, $\Delta_T = \pm 0,2$ °C), абсолютного давления (барометр-анероид БАММ-1, $\Delta_P = \pm 20$ гПа) и относительной влажности ($\Delta_\varphi = \pm 3\%$).

В результате проведенного эксперимента было проведено 475 параллельных измерений концентрации кислорода в воздухе и метеорологических показателей (по 3 ежедневно в период с августа 2015 по январь 2016 года) (рис. 1).

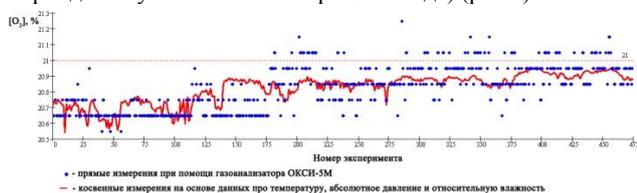


Рис. 1. Объемные концентрации кислорода в воздухе рассчитанные прямым и косвенным методом

Полученные результаты прямых и косвенных значений объемной концентрации кислорода сформированы в 25 групп (по 19 измерений в каждой группе). На рис. 2 и в табл. 2 приведены медианные оценки значений концентрации кислорода полученных прямым и косвенным методом (каждое значение соответствует приблизительно временному интервалу 7 дней).

Результаты прямых и непрямых измерений объемной концентрации кислорода в воздухе

№	1	2	3	4	5
$[O_2]_{\text{косв. \%}}$	20,72	20,69	20,62	20,74	20,70
$[O_2]_{\text{прям. \%}}$	20,65	20,65	20,65	20,65	20,65
№	6	7	8	9	10
$[O_2]_{\text{косв. \%}}$	20,65	20,78	20,77	20,76	20,87
$[O_2]_{\text{прям. \%}}$	20,65	20,75	20,65	20,65	20,65
№	11	12	13	14	15
$[O_2]_{\text{косв. \%}}$	20,81	20,81	20,86	20,84	20,85
$[O_2]_{\text{прям. \%}}$	20,85	20,95	20,85	20,85	20,85
№	16	17	18	19	20
$[O_2]_{\text{косв. \%}}$	20,88	20,88	20,88	20,86	20,85
$[O_2]_{\text{прям. \%}}$	20,95	20,95	20,95	20,95	20,85
№	21	22	23	24	25
$[O_2]_{\text{косв. \%}}$	20,94	20,92	20,90	20,93	20,90
$[O_2]_{\text{прям. \%}}$	20,95	20,95	20,95	20,95	20,95

Экспериментальные исследования проводились в широком диапазоне метеорологических параметров, при этом максимальные и минимальные значения температуры, абсолютного давления и относительной влажности соответственно составляли: $T_{\text{max}} = 31,8$ °C; $T_{\text{min}} = -15,1$ °C; $P_{\text{max}} = 1046$ гПа; $P_{\text{min}} = 990$ гПа; $\varphi_{\text{max}} = 86\%$; $\varphi_{\text{min}} = 29\%$.

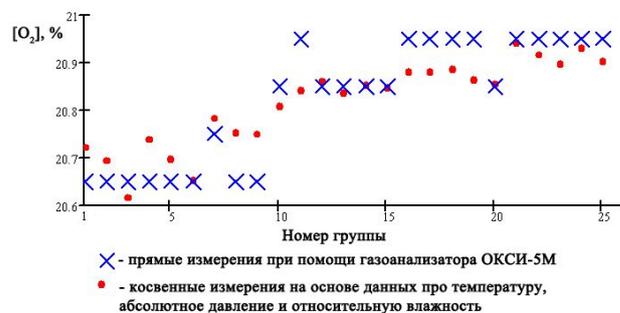


Рис. 2. Графическое сравнение прямых и косвенных измерений концентраций кислорода в воздухе (каждая группа содержит 19 отдельных измерений)

Для сравнения двух методов были найдены доверительные интервалы полученных медианных оценок измеренных значений по группам, что представляют собой абсолютную погрешность многократного измерения (считая закон распределения погрешностей нормальным), которая рассчитывается следующим образом [5]:

$$[O_2]_{\text{прям}} = \overline{[O_2]_{\text{прям}}} \pm \Delta [O_2]_{\text{прям}}, P = 0,95;$$

$$[O_2]_{\text{косв}} = \overline{[O_2]_{\text{косв}}} \pm \Delta [O_2]_{\text{косв}}, P = 0,95$$

$$\Delta [O_2] = \sqrt{(t_{P,n} \cdot S_{[O_2]})^2 + (t_{P,\infty} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \theta_{[O_2]})^2}$$

где $\Delta(P)_{O_2} = t_{P,n} \cdot S_{[O_2]}$ и $\theta(P)_{O_2} = t_{P,\infty} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \theta_{O_2}$ – случайная и систематическая составляющие соответственно, приведенные к одному и тому же значению доверительной вероятности $P=0,95$; $t_{P,\infty}$ – коэффициент Стьюдента при $n = \infty$; θ_{O_2} – предельная погрешность средства измерения.

Случайная составляющая погрешности измерения концентрации кислорода газоанализатором рассчитывается по следующей формуле:

$$(8) S_{[O_2]} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n ([O_2]_i - \overline{[O_2]})^2},$$

где $\overline{[O_2]} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [O_2]_i$;

Определение абсолютной погрешности измерения кислорода по выведенной формуле (7), рассчитывается как для невоспроизводимых косвенных измерений. Случайную погрешность измерения кислорода находят как для прямых многократных измерений (8). Систематическую составляющую погрешности измерения определяют по следующей формуле:

Результаты попадания медианных оценок измеренных значений кислорода в группах в совместный доверительный интервал

№	1	2	3	4	5
Метод					
Прямой	1	1	1	0	1
Косвенный	1	1	1	1	1
№	6	7	8	9	10
Прямой	1	1	1	0	1
Косвенный	1	1	1	1	1
№	11	12	13	14	15
Прямой	1	1	1	1	1
Косвенный	1	1	1	1	1
№	16	17	18	19	20
Прямой	0	0	0	0	1
Косвенный	1	1	1	1	1
№	21	22	23	24	25
Прямой	1	1	0	1	1
Косвенный	1	1	1	1	1

$$\sigma_{[O_2]} = \sqrt{\left(\frac{\partial [O_2]}{\partial T}\right)^2 \cdot \Delta T^2 + \left(\frac{\partial [O_2]}{\partial P}\right)^2 \cdot \Delta P^2 + \left(\frac{\partial [O_2]}{\partial \varphi}\right)^2 \cdot \Delta \varphi^2}$$

где ΔT , ΔP и $\Delta \varphi$ – приборные погрешности непосредственно измеряемых величин.

Максимальная по группам предельная систематическая погрешность расчетного метода в 3,3 раза меньше чем по методу с использованием газоанализатора. Но максимальная по группам предельная случайная погрешность расчетного метода в 2,6 раза больше чем у прямого метода.

На рис. 3 представлены медианные оценки значений концентрации кислорода в группах измеренные газоанализатором. Точками отображены рассчитанные доверительные интервалы.

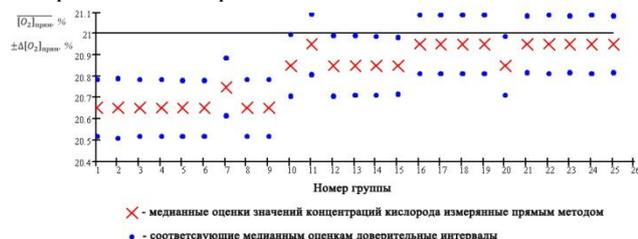


Рис. 3. Отображение рассчитанных медианных оценок измерений прямым методом с доверительными интервалами по группам

На рис.4 представлены медианные оценки значений концентрации кислорода по группам полученные по формуле (7). Точками отображены рассчитанные доверительные интервалы.

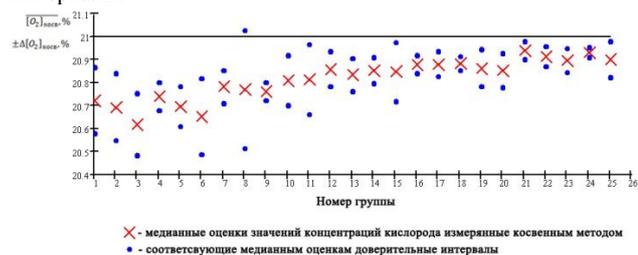


Рис. 4. Отображение рассчитанных медианных оценок измерений косвенным методом с доверительными интервалами по группам

На рис. 5 точками отображены совместные доверительные интервалы для двух методов, большими крестами обозначены медианные оценки значений концентрации кислорода по группам полученные по расчетной формуле, малыми крестами – медианные оценки значений концентрации кислорода по группам измеренные газоанализатором.

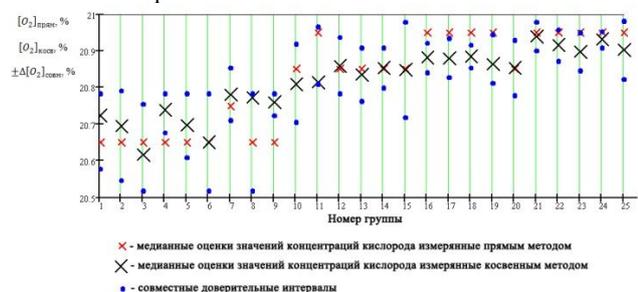


Рис. 5. Медианные оценки значений концентраций кислорода по группам рассчитанные двумя методами с совместными доверительными интервалами

Попадание медианных оценок измеренных значений кислорода в группах по двум методам отображены в таблице 2, где «1» обозначено попадание значения оценки медианы, полученного соответствующим методом в совместный доверительный интервал, а «0» – не попадание соответственно.

Из таблицы 3 видно, что в совместный доверительный интервал попали все значения оценок медиан по группам концентрации кислорода в воздухе определенной по расчетному методу, который базируется на значениях метеопараметров. 28% значений медианных оценок по группам концентрации кислорода в воздухе измеренной газоанализатором, не попали в совместный доверительный интервал.

Следовательно, предложенный расчетный метод определения концентрации кислорода в воздухе не уступает прямому методу с использованием газоанализирующих устройств.

К усовершенствованию анализируемого метода можно отнести: использование средств измерительной техники высшего класса точности, что позволит уменьшить систематическую погрешность; увеличение числа измерений для уменьшения случайной составляющей основной погрешности.

4. Заключение

На основе проведенных в работе исследований установлено, что расчет объемной концентрации кислорода в воздухе косвенным методом (на основе данных про температуру, абсолютное давление и относительную влажность на открытой местности) не уступает прямому методу (при помощи газоанализирующих устройств).

Реализация предложенного метода измерения объемной концентрации кислорода в воздухе аппаратно-программным способом в задачах построения обратной связи автоматического регулирования подачи воздушно-топливной смеси в котлоагрегатах [6] может оптимизировать затраты на топливные материалы за счет повышения точности измерения КИВ (0,4 значения величины).

Таким образом, формула для расчета КИВ с учетом текущей концентрации кислорода в воздухе выглядит следующим образом:

$$\alpha = \frac{[O_2]}{[O_2] - O_2}$$

5. Литература

1. Соколов Б.А. Котельные установки и их эксплуатация: учебник для нач. проф. образования / Б.А. Соколов. – 2-е изд., испр. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – С. 50-51.

2. Методика расчета количества кислорода в атмосферном воздухе на основе метеорологических параметров с целью прогнозирования метеопатических эффектов атмосферы [Текст]: (метод. рекомендации) / Гл. упр. лечеб.-профилактич. помощи; сост. В. Ф. Овчарова. – М.: МЗ СССР. – 1983. – 13 с.
3. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation / World Meteorological Organization, 2008. – №8. – 119 p.
4. Бабак В.П. Підвищення точності вимірювання коефіцієнта надлишку повітря в котлоагрегатах із застосуванням газоаналізаторів електрохімічного типу / В.П. Бабак, А.О. Запорожець, О.О. Редько // Промислова теплотехніка. – 2015. – №1. – С. 82-96.
5. Горлач В.В. Обработка, представление, интерпретация результатов измерений / В.В.Горлач, В.Л.Егоров, Н.А.Иванов. – Омск: Издательство СибАДИ, 2006 – 85 с.
6. Пат. №110761, Україна, МПК F23N5/18, G01N27/419. Спосіб визначення коефіцієнта надлишку повітря / Бабак В.П., Запорожець А.О., Редько О.О.; заявник та патентовласник Інститут технічної теплофізики НАН України; заявл. 19.02.2015; опубл. 10.02.2016, Бюл. №3.