

Eastern -  
European  
Journal of  
Enterprise  
Technologies

jet.com.ua

ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКИЙ  
ЖУРНАЛ  
ПЕРЕДОВЫХ  
ТЕХНОЛОГИЙ

ISSN 1729-3774



6/8 (84)  
2016

информационные технологии

інформаційні технології

information  
technologies

новая экономика

нова економіка

промышленные технологии

промислові технології

industrial  
applications

- Energy-saving technologies and equipment

## 6/8 (84) 2016

# Content

### ENERGY-SAVING TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT

- 4 Model of the cascade thermoelectric cooling devices in the mode of the largest energy efficiency  
**V. Zaykov, V. Mescheryakov, Yu. Zhuravlov**
- 12 Decreasing the mass indices of gas turbine engines regenerators by means of choosing rational parameters  
**V. Gorbov, D. Solomonuk**
- 24 Thermoeconomic optimization of supercritical refrigeration system with the refrigerant R744 (CO<sub>2</sub>)  
**M. Kuznetsov, D. Kharlampidi, V. Tarasova, E. Voytenko**
- 33 Liquid jet cooler-based liquid hydrogen fueling and thermostating launch system development  
**Yu. Shakhov**
- 41 Substantiation of economic efficiency of using a solar dryer under conditions of personal peasant farms  
**M. Babych, S. Korobka, R. Skrynkovskyy, S. Korobka, R. Krygul**
- 48 Numerical integration of the process of cooling gas formed by thermal recycling of waste  
**V. Vambol**
- 54 Improving the efficiency of fuel combustion with regard to the uncertainty of measuring oxygen concentration  
**V. Babak, V. Mokiychuk, A. Zaporozhets, O. Redko**
- 60 Abstract&References



## ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР

**Бойник Анатолій Борисович**

д. т. н., професор, Український державний університет залізничного транспорту (Україна)

**Терзіян Ваган Якович**

д. т. н., професор, Харківський національний університет радіоелектроніки (Україна)  
професор Університету Ювяскюля (Фінляндія)

## РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

### ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ

**Бойник А. Б.**, д. т. н., проф., Український державний університет залізничного транспорту, Харків (Україна); **Бутко Т. В.**, д. т. н., проф., Український державний університет залізничного транспорту, Харків (Україна); **Годлевський М. Д.**, д. т. н., проф., Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків (Україна); **Cardoso Jorge**, Professor of University of Coimbra, Faculty of Science and Technology, Coimbra (Portugal); **Omelayenko Borys**, PhD, Senior Software Engineer at Elsevier Amsterdam Area, Amsterdam (Netherlands); **Rab Nawaz Lodhi**, PhD, COMSATS Institute of Information Technology Sahiwal Campus (Pakistan); **Рибак Л. О.**, д. т. н., проф., Старооскольський технологічний інститут, Старий Оскол (Росія); **Самсонкін В. М.**, д. т. н., проф., Державний науково-дослідний центр залізничного транспорту України, Київ (Україна); **Соболев Ю. В.**, д. т. н., проф., Український державний університет залізничного транспорту, Харків (Україна); **Terziyan Vagan**, Professor of University of Jyväskylä, Department of Mathematical Information Technology, Jyväskylä (Finland); **Фурман І. О.**, д. т. н., проф., Харківський державний технічний університет сільського господарства, Харків (Україна); **Jakab Frantisek**, Assoc. Professor of Technical University of Kosice, Department of Computers and Informatics, Kosice (Slovak Republic)

### МАТЕМАТИКА І КІБЕРНЕТИКА - ПРИКЛАДНІ АСПЕКТИ

**Ahmad Izhar**, Associate Professor of King Fahd University of Petroleum and Minerals, Department of Mathematics and Statistics, Dhahran (Saudi Arabia); **Weber Gerhard Wilhelm**, Professor of Middle East Technical University, Institute of Applied Mathematics, Ankara (Turkey); **Дьомін Д. О.**, д. т. н., проф., Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», директор ПП «Технологічний Центр», Харків (Україна); **Зелик Я. І.**, д. т. н., провідний науковий співробітник, Інститут космічних досліджень Національної академії наук України та Державне космічне агентство України, Київ (Україна); **Тєв'яшев А. Д.**, д. т. н., проф., Харківський Національний університет радіоелектроніки, Харків (Україна); **Trujillo Juan J.**, Professor of Universidad de la Laguna, Faculty of Mathematics, San Cristobal de La Laguna (Spain)

### ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА

**Andrianov Igor**, Professor of RWTH Aachen University, Department of General Mechanics, Aachen (Germany); **Дудніков А. А.**, к. т. н., професор, Полтавська державна аграрна академія, Полтава (Україна); **Львов Г. І.**, д. т. н., проф., Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків (Україна); **Machado Jose Antonio Tenreiro**, Professor of Polytechnic of Porto, Institute of Engineering, Department of Electrical Engineering, (Portugal); **Пермяков О. А.**, д. т. н., проф., Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків (Україна); **Подригало М. А.**, д. т. н., проф., Харківський Національний автодорожній технічний університет, Харків (Україна); **Самородов В. Б.**, д. т. н., проф., Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків (Україна)

### ПРИКЛАДНА ФІЗИКА

**Гламаздін О. В.**, к. ф.-м. н., старший науковий співробітник, Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут», Харків (Україна); **Мар'янчук П. Д.**, д. ф.-м. н., проф., Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича, Чернівці (Україна); **Новосядлий С. П.**, д. т. н., проф., Прикарпатський національний університет ім. Василя Стефаника, Івано-Франківськ (Україна); **Соболь О. В.**, д. ф.-м. н., проф., Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків (Україна); **Старіков В. В.**, к. ф.-м. н., старший науковий співробітник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків (Україна)

### МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО, ТЕХНОЛОГІЇ ОРГАНІЧНИХ І НЕОРГАНІЧНИХ РЕЧОВИН

**Вахула Я. І.**, д. т. н., проф., Національний університет «Львівська політехніка», Львів (Україна); **Arvidas Galdikas**, Professor Kaunas University of Technology, Department of Physics, Kaunas (Lithuania); **Глікін М. А.**, д. т. н., проф., Технологічний інститут Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, Северодонецьк (Україна); **Капустін О. Є.**, д. х. н., проф., Приазовський державний технічний університет, Маріуполь (Україна); **Carda Juan B.**, Professor of Universidad Jaume I, Department of Inorganic Chemistry, Castellon de la Plana (Spain); **Кондратов С. О.**, д. х. н., проф., Інститут хімічних технологій Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, Луганськ (Україна); **Михайлов В. М.**, д. т. н., проф., Харківський державний університет харчування і торгівлі, Харків (Україна); **Черевко О. І.**, д. т. н., проф., Харківський державний університет харчування і торгівлі, Харків (Україна); **Чумак В. Л.**, д. х. н., проф., Національний авіаційний університет, Київ (Україна)

### ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ

**Данько В. Г.**, д. т. н., проф., Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків (Україна); **Кліменко Б. В.**, д. т. н., проф., Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків (Україна); **Sutikno Tole**, Professor of Universitas Ahmad Dahlan, Department of Electrical Engineering, Yogyakarta (Indonesia); **Терещенко Т. О.**, д. т. н., проф., Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ (Україна)

## EDITOR IN CHIEF

**Boynyk Anatoly**

PhD, Professor of Ukrainian State University of Railway Transport (Ukraine)

**Terziyan Vagan**

PhD, Professor of Kharkov National University of Radioelectronics (Ukraine)  
Professor of the University of Jyvaskyla (Finland)

## EDITORIAL BOARD

### COMPUTER SCIENCE

**Boynyk Anatoly**, Professor of Ukrainian State University of Railway Transport, Department of Automation and Computer telecontrol traffic, Kharkov (Ukraine); **Butko Tatiana**, Professor of Ukrainian State University of Railway Transport, Department of operational work and international transportation, Kharkov (Ukraine); **Cardoso Jorge**, Professor of University of Coimbra, Faculty of Science and Technology, Coimbra (Portugal); **Furman Ilyia**, Professor of Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture, Department of Agricultural Mechanization, Kharkov (Ukraine); **Hodlyevskiy Mykhailo**, Professor of National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Department of Automated Control Systems, Kharkov (Ukraine); **Jakab Frantisek**, Assoc. professor of Technical University of Kosice, Department of Computers and Informatics, Kosice (Slovak Republic); **Omelayenko Borys**, PhD, Senior Software Engineer at Elsevier Amsterdam Area, Amsterdam (Netherlands); **Rab Nawaz Lodhi**, PhD, COMSATS Institute of Information Technology Sahiwal Campus (Pakistan); **Rybak Larisa**, Professor of Starooskol Institute of Technology, Department of Automation and Industrial Electronics, Sary Oskol (Russia); **Samsonkin Valery**, Professor, Director of the State Research Center Railway Transport of Ukraine, Kyiv (Ukraine); **Sobolev Yuriy**, Professor, Advisor to the Rector of Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkov (Ukraine); **Terziyan Vagan**, Professor of University of Jyvaskyla, Department of Mathematical Information Technology, Jyvaskyla (Finland)

### MATHEMATICS

**Ahmad Izhar**, Associate Professor of King Fahd University of Petroleum and Minerals, Department of Mathematics and Statistics, Dhahran (Saudi Arabia); **Demin Dmitriy**, Professor of National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», director of the Private Company «Technology Center», Kharkov (Ukraine); **Teviashev Andrew**, Professor of Kharkov National University of Radioelectronics, Department of Applied Mathematics, Kharkov (Ukraine); **Trujillo Juan J.**, Professor of Universidad de la Laguna, Faculty of Mathematics, San Cristobal de La Laguna (Spain); **Weber Gerhard Wilhelm**, Professor of Middle East Technical University, Institute of Applied Mathematics, Ankara (Turkey); **Zyelyk Yarema**, Leading Researcher of Space Research Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine and National Space Agency of Ukraine, Kyiv (Ukraine)

### ENGINEERING

**Andrianov Igor**, Professor of RWTH Aachen University, Department of General Mechanics, Aachen, (Germany); **Dudnikov Anatoly**, Professor of Poltava State Agrarian Academy, Department of the Repair machines and technology of constructional materials, Poltava (Ukraine); **Lvov Hennadiy**, Professor of National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Department of Dynamics and Strength of Machines, Kharkov (Ukraine); **Machado José António Tenreiro**, Professor of Polytechnic of Porto, Institute of Engineering, Department of Electrical Engineering, (Portugal); **Permiakov Alexander**, Professor of National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Department of Mechanical Engineering, Kharkov (Ukraine); **Podrigalo Mykhailo**, Professor of Kharkiv National Automobile and Highway University, Department of Mechanical Engineering Technologies and Repairs, Kharkov (Ukraine); **Samorodov Vadim**, Professor of National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Department of Cars and Tractors, Kharkov (Ukraine)

### APPLIED PHYSICS

**Glamazdin Alexander**, PhD, National Science Center «Kharkov Institute of Physics and Technology», Kharkov (Ukraine); **Novosiadlyi Stepan**, Professor of Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, Department of Physics and Technology, (Ukraine); **Maryanchuk Pavlo**, Professor of Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, Department of Physics, (Ukraine); **Sobol Oleg**, Professor of National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Department of Materials Science, Kharkov (Ukraine); **Starikov Vadim**, Senior Researcher of National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Department of Physics of metals and semiconductors, Kharkov (Ukraine)

### MATERIALS SCIENCE, CHEMISTRY AND CHEMICAL ENGINEERING

**Carda Juan B.**, Professor of Universidad Jaume I, Department of Inorganic Chemistry, Castellon de la Plana (Spain); **Cherevko Alexander**, Professor of Kharkiv State University of Food Technology and Trade, Kharkov (Ukraine); **Chumak Vitaliy**, Professor of National Aviation University, Department of Chemistry and Chemical Engineering, Kyiv (Ukraine); **Galdikas Arvidas**, Professor of Kaunas University of Technology, Department of Physics, Kaunas (Lithuania); **Glikin Marat**, Professor of East-Ukrainian National University, Technological Institute, Department of Technology of organic substances, fuels, and polymers, Severodonetsk (Ukraine); **Kapustin Alexey**, Professor of Pryazovskyi State Technical University, Department of Chemistry, Mariupol (Ukraine); **Kondratov Sergey**, Professor of Volodymyr Dahl East-Ukrainian National University, Department of Mathematics and Computer Science, Lugansk (Ukraine); **Mihaylov Valerii**, Professor of Kharkiv State University of Food Technology and Trade, Kharkov (Ukraine); **Yakhula Yaroslav**, Professor of Lviv Polytechnic National University, Department of Silicate Engineering, Lviv (Ukraine)

### ENERGY

**Danko Vladimir**, Professor of National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Department of Electrical Engineering, Kharkov (Ukraine); **Klimenko Boris**, Professor of National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Department of Electrical Apparatus, Kharkov (Ukraine); **Sutikno Tole**, Professor of Universitas Ahmad Dahlan, Department of Electrical Engineering, Yogyakarta (Indonesia); **Tereshchenko Tatiana**, Professor of National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Department of Industrial Electronics, Kyiv (Ukraine)

#### Honorary editor I. G. Filippenko

Doctor of Technical Sciences, Professor  
Ukrainian State University of Railway Transport (Ukraine)

**Establishers**  
PC «TECHNOLOGY CENTER»  
Ukrainian State University of  
Railway Transport

**Publisher**  
PC «TECHNOLOGY CENTER»

**Editorial office's and publisher's address:**  
Shatilova dacha str., 4, Kharkiv,  
Ukraine, 61145

**Contact information**  
Tel.: +38 (057) 750-89-90  
E-mail: eejet.kh@gmail.com  
Website: <http://www.jet.com.ua>,  
<http://journals.uran.ua/eejet>

#### Journal Indexing

- Scopus
- CrossRef
- American Chemical Society
- EBSCO
- Index Copernicus
- Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)
- Ulrich's Periodicals Directory
- DRIVER
- Bielefeld Academic Search Engine (BASE)
- WorldCat
- Electronic Journals Library
- DOAJ
- ResearchBib
- Polska Bibliografia Naukowa
- Directory of Research Journals Indexing
- Directory Indexing of International Research Journals
- Open Academic Journals Index
- Sherpa/Romeo

#### Свідоцтво про державну реєстрацію журналу

КВ № 21546-11446 ПР від 08.09.2015

#### Атестовано

Вищою Атестаційною Комісією України  
Перелік № 12 постанови Президії  
ВАК № 1-05.36 від 11.06.03

Постановою Президії ВАК України  
№ 1-05/2 від 27.05.2009, № 1-05/3 від 08.07.2009  
Бюлетень ВАК України

Наказом Міністерства освіти і науки України  
№793 від 04.07.2014

#### Рекомендовано

Вченою Радою  
протокол № 10 от 24.11.16 р.

**Підписано до друку**  
29.11.2016 р.

Формат 60 × 84 1/8.  
Ум.-друк. арк. 8,25. Обл.-вид. арк. 7,67  
Тираж 1000 екз.

*Досліджено вплив метеорологічних параметрів навколишнього середовища на процес спалювання палива в котлоагрегатах. Встановлено функціональний взаємозв'язок між температурою, абсолютним тиском, відносною вологістю і об'ємною концентрацією кисню в повітрі. Запропоновано спосіб підвищення точності вимірювання коефіцієнта надлишку повітря для зменшення втрат теплової енергії в котлоагрегатах*

*Ключові слова: коефіцієнт надлишку повітря, метеорологічні параметри, невизначеність вимірювання, метод Монте-Карло*

*Исследовано влияние метеорологических параметров окружающей среды на процесс сжигания топлива в котлоагрегатах. Установлена функциональная взаимосвязь между температурой, абсолютным давлением, относительной влажностью и объемной концентрацией кислорода в воздухе. Предложен способ повышения точности измерения коэффициента избытка воздуха для уменьшения потерь тепловой энергии в котлоагрегатах*

*Ключевые слова: коэффициент избытка воздуха, метеорологические параметры, неопределенность измерения, метод Монте-Карло*

UDC 621.182-5: 504.064.2.001.18

DOI: 10.15587/1729-4061.2016.85408

# IMPROVING THE EFFICIENCY OF FUEL COMBUSTION WITH REGARD TO THE UNCERTAINTY OF MEASURING OXYGEN CONCENTRATION

**V. Babak**

Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Corresponding Member of the NAS of Ukraine\*

E-mail: vdoo@ukr.net

**V. Mokiychuk**

PhD, Associate Professor\*\*

E-mail: nau\_307@ukr.net

**A. Zaporozhets**

Junior Researcher\*

E-mail: art.morco@gmail.com

**O. Redko**

Postgraduate Student\*\*

E-mail: ralex\_sh@mail.ru

\*Department heat measurement,  
diagnosis and optimization in power engineering  
Institute of Engineering Thermophysics of  
National academy of sciences of Ukraine  
Zhelyabov str., 2 a, Kyiv, Ukraine, 03057

\*\*Department of Information Measuring Systems  
National Aviation University  
Kosmonavta Komarova ave., 1, Kyiv, Ukraine, 03058

## 1. Introduction

Contemporary state of thermo-technical equipment in the post-Soviet countries is characterized by a considerable period of operation and low efficiency. In Ukraine, about 11 000 boilers of power from 0,1 Gcal/h to 1 Gcal/h have been in operation for more than 20 years, more than 6000 boiler plants function with the efficiency around 70 %. Technical condition of existing boiler units requires their immediate improvement. Maximum effect in a number of such technologies is possible to attain by the automation of the process of fuel combustion [1]. In this case, the optimization of the process of fuel combustion is directed toward the formation of stoichiometric air-fuel mixture (AFM).

In order to control the process of fuel combustion in the furnace of a boiler, the excess air ratio coefficient (EAC) is applied, which is determined by the ratio of the amount of air that enters a combustion chamber to theoretically necessary for full combustion of fuel. In practice, EAC depends on the volumetric concentrations of oxygen in air (constant, 21 %) and output gases.

Taking into account the EAC value for the process of fuel combustion, a relevant task is to increase the accuracy of measuring EAC with regard to meteorological environmental parameters.

## 2. Literature review and problem statement

Literary sources [2–5] present different methods for optimization of the process of fuel combustion in the industrial high power boiler units (exceeding 3,5 MW). Coal, brown coal, peat, shales, biomass, petroleum residue, other solid and liquid-fuel materials are often considered as fuel [2]. A highly effective process of fuel combustion is reached by the minimization of EAC, the boundary of which is a sharp increase of CO in the output gases (higher than 100 ppm) [3]. In this case, an amount of NO<sub>x</sub> is also reduced, the minimum value of which is reached at EAC in the range of 0,8–0,95 [4]. Frequently in the technological processes they use heat recovery of the waste gases, which makes it possible to reduce the consumption of fuel to 30 % [5].

To provide for a highly effective combustion of fuel, different types of the systems are used: biodiesel plant as a part of cogeneration system [6], a two-level intelligent control system of the process of fuel combustion in steam boilers and steam generators [7], a system of active carburation for the water-heating boilers with capacity of up to 600 MW [8], a multilevel system of recirculation of gases in steam generators [9].

Many examined methods and systems regard EAC as the informative parameter. Paper [10] proposed a method for increasing the accuracy of its measurement based on the assumption about inconstancy of the gas concentration in the air. The importance of predicting gas concentrations, which form part of atmospheric air, is given emphasis in article [11]. Paper [12] presents studies of the influence of pollutants in air on changes in the synoptic and meteorological parameters of medium.

In practice, for determining EAC, a so-called "oxygen" formula is used, which with complete fuel combustion takes the following form:

$$\alpha = \frac{21}{21 - [\text{O}_2]_{\text{out}}}, \quad (1)$$

where 21 is the volumetric concentration of oxygen (VCO) in air, %,  $[\text{O}_2]_{\text{out}}$  is the VCO in the flue gases, %.

The quantity of VCO is considered to be constant at any climatic changes and phenomena, in the mountains and in the plains. However, long-term climate and physical observations [13] refute this assertion, which necessitates conducting research in this field.

---

### 3. The aim and tasks of the study

---

The research we conducted set the goal of determining peculiarities of change in VCO in the air depending on meteorological environmental parameters, which will make it possible to increase the accuracy of determining EAC and, consequently, to increase efficiency of the fuel combustion in boiler units.

To achieve this aim, the following tasks were set:

- to determine functional interrelation between the current meteorological parameters (temperature, humidity, pressure) and VCO in the air;
- to explore daily/seasonal dynamics of the change in current VCO by direct (with the aid of a gas analyzing instrument) and indirect (based on meteorological parameters) methods;
- to carry out a metrological assessment of the obtained results;
- to propose a functional dependence of EAC on the current VCO in the air and to estimate the accuracy of its measurement.

---

## 4. Methods and equipment for research into the influence of meteorological parameters on the change in oxygen concentration in the air

---

### 4.1. Methods of determining volumetric concentration of oxygen in the air

An analytical value of the partial density of oxygen ( $E$ , g/m<sup>3</sup>) is directly proportional to atmospheric pressure

( $P$ , hPa) minus the partial pressure of water vapor ( $e$ , hPa) and it is inversely proportional to the temperature of air ( $T$ , K):

$$E = 23,15 \cdot 10^3 \cdot \frac{P - e}{R \cdot T}, \quad (2)$$

where  $R$  is the specific gas constant for dry air, J/kg·K; 23,15 is the mass concentration of oxygen in dry air, %.

Calculation of the partial pressure of water vapor is determined by formula:

$$e = \phi \cdot p_{\text{vap}}, \quad (3)$$

where  $\phi$  is the humidity of air, %;  $p_{\text{vap}}$  is the quantity, which can be determined according to recommendations of the Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation (Switzerland):

$$p_{\text{vap}}(P, T') = f(P) \cdot r(T'), \quad (4)$$

$$f(P) = 1,0016 + 3,15 \cdot 10^{-6} \cdot P - 0,074 \cdot P^{-1}, \quad (5)$$

$$r(T') = 6,112 \cdot e^{\frac{17,62T'}{243,2+T'}}, \quad (6)$$

where  $T'$  is the temperature of air in the Celsius degrees, °C.

Transition to the volumetric concentration of oxygen occurs by the following ratio:

$$[\text{O}_2] = \frac{6,236 \cdot E \cdot T}{P' \cdot M_{\text{O}_2}}, \quad (7)$$

where  $[\text{O}_2]$  is the volumetric concentration of oxygen in the air, %;  $P'$  is the atmospheric pressure, mm Hg;  $M_{\text{O}_2}$  is the molar mass of oxygen, g/mol.

The final analytical representation of functional dependence of the volumetric concentration of oxygen in the air on meteorological parameters takes the form [10]:

$$[\text{O}_2](P, T', \phi) = 20,957 \cdot \left( 1 - \frac{e(P, T', \phi)}{P} \right). \quad (8)$$

### 4.2. Equipment for investigating daily/seasonal dynamics of the change in the volumetric concentration of oxygen in the air

To determine the current VCO in the air by direct method, we used the portable gas analyzer OKSI-5M with absolute error of determining the oxygen concentration  $\Delta_{\text{O}_2} = \pm 0,1$  %.

To determine VCO in the air indirectly, we used a set of tools of measurement instruments, consisting of two meteorological psychometric thermometers TM4-1 ( $\Delta_t = \pm 0,2$  °C,  $\Delta_\phi = \pm 3$  %) and the barometer-aneroid BAMM-1 ( $\Delta_p = \pm 20$  hPa).

---

## 5. Results of research into the change in the volumetric concentration of oxygen in the air

---

To conduct experimental studies to determine the current volumetric concentration of oxygen in the air by direct (with the aid of a gas analyzer) and indirect (based on the meteorological data on temperature, absolute pressure and relative humidity) methods, we selected a locality in the territory of the city of Lubny, Poltava Region (Ukraine), with



the following geographical coordinates: latitude – 50,013°, longitude – 32,991°.

Moderate-cold climate predominates in the territory of the city of Lubny. According to the Koppen classification, climate in the territory of the city corresponds to the level Dfb (moderately cold climate with uniform humidification). Based on the statistical data between 1982 and 2012, average annual temperature in the city of Lubny is 8 °C. The average annual rainfall is 628 mm.

An experiment to determine the current VCO in the air by direct and indirect methods lasted for 8 months: from August 2015 to March 2016. Parallel measurements were taken 3 times per day around 09:00, 15:00 and 20:00 local time at any weather phenomena (rain, snow, gusty wind, etc.) in a special protected housing at the local meteorological station. Totally it was obtained 475 sets of measurements.

Fig. 1 demonstrates results of direct measurements of VCO in the air in the course of entire experiment.

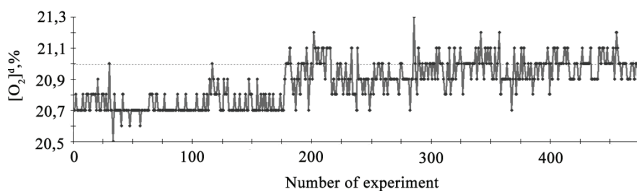


Fig. 1. Volumetric concentration of oxygen, measured by the gas analyzer OKSI-5N

In the course of conducting the experiment, in parallel with measuring the volumetric concentration of oxygen in the air using the gas analyzer OKSI-5M, we measured basic meteorological parameters – temperature, humidity and pressure (Fig. 2–4).



Fig. 2. Measured values of air temperature during experimental period

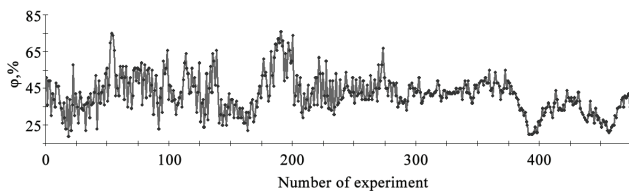


Fig. 3. Measured values of relative air humidity during experimental period



Fig. 4. Measured values of atmospheric pressure during experimental period

Based on the received data, taking into account dependence (8), we obtained theoretical dependence of the change

in the volumetric concentration of oxygen in the air over entire course of the experiment (Fig. 5).



Fig. 5. Indirect values of the volumetric concentration of oxygen during experimental period

Experimental studies were conducted over a wide range of meteorological parameters; in this case, maximum and minimum values of temperature, absolute pressure and relative humidity comprised, respectively:  $T_{max}=31,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{min}=-15,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $P_{max}=1046\text{ hPa}$ ;  $P_{min}=990\text{ hPa}$ ;  $\phi_{max}=86\%$ ;  $\phi_{min}=29\%$ .

The observed minimum of VCO in the air by the direct measurement reached 20,5 %, the maximum – 21,3 %; minimum value of VCO in the air by the indirect measurement reached 20,5 %, the maximum – 21,0 %.

### 6. Discussion of results of research into the volumetric concentration of oxygen in the air

To compare accuracy of the two methods of determining VCO, we performed calculation of measurement uncertainty using the MathCAD programming software.

*Direct method of measuring the volumetric concentration of oxygen*

The gas analyzer OKSI-5N in the mode of determining has a scale value of 0,1 %. Its absolute error of measurement (according to specifications) is also 0,1 %.

Experimental measurements were one-time and they were obtained at the different levels of output quantity. The array of the obtained values of VCO was divided into 95 groups of 5 values. An uncertainty of the A type is regarded as the median estimation of the mean-square deviations of the obtained groups, which comprised 0,024 %.

An uncertainty of the B type of the direct method of measurements for the uniform law of distribution of probabilities of random variables is:

$$\hat{u}_B = \frac{\Delta_{O_2}}{\sqrt{3}} = 0,058\% \tag{10}$$

The estimation of summary standard uncertainty is equal to:

$$\hat{u}_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = 0,063\% \tag{11}$$

The estimation of the extended expanded uncertainty of the direct method of measurements at the confidence coefficient 95 % is calculated according to [14]:

$$\begin{aligned} \hat{U}_1 &= t_p(\hat{v}_{eff}) \cdot \hat{u}_c = \\ &= t_{0,95} \left( f_{eff} \cdot \left[ 1 + \frac{\hat{u}_A^2}{\hat{u}_B^2} \right]^2 \right) \cdot \hat{u}_c = 0,104\%, \end{aligned} \tag{12}$$

where  $t_p(\hat{v}_{eff})$  is the Student's coefficient for probability P and the number of degrees of freedom  $f_{eff} = n_1 - 1$ ,  $n_1$  is the

number of measurements, carried out when assessing the i-th contribution of uncertainty.

Indirect method of measuring the volumetric concentration of oxygen.

Conducting the evaluation of the extended expanded uncertainty of the proposed indirect method of the measurement of VCO by a classic method is impossible since the analytical representation of the model of measurement takes the form of complex nonlinear functional dependence on three input values. When differentiating function (8), we have the not simplified polynomials of partial derivatives, which complicates subsequent calculations, including determining the correlation coefficients of input quantities. Therefore, to solve this problem, we propose to estimate the extended expanded uncertainty of the indirect method of measurement by using imitation simulation according to the Monte-Carlo method [15].

By the calculated values of VCO, based on the measurements of meteorological parameters, we isolated the sets of values of input values corresponding to 20 levels of output quantity. The values of each input quantity from the chosen sets were accepted as the estimation of mathematical expectation for the generation of arrays of random numbers. As an estimation of mean-square deviation (MSD), we accepted the ratio of absolute instrument error and coefficient, which connects MSD of the Gauss' law with its boundaries with  $(k=1,96$  at  $P=95\%$ ). A quantity of iterations of the generation of arrays of random input variables is equal to  $10^5$ .

According to data on the generated arrays of input random quantities, we obtained 20 arrays of output random quantity. Mathematical expectations of the simulated array of the VCO values differ in the fifth sign after comma from those calculated by formula (8) by the VCO value (Table 1), respectively.

A hypothesis on the normality of the law of distribution of the simulated output quantity is confirmed by the statistical criterion Pearson's  $\chi$ -square. The distribution of probabilities of the simulated VCO value is represented in Fig. 6 in the form of histogram.

An evaluation of the extended expanded uncertainty of VCO measured by indirect method according to the results of simulation by the Monte Carlo method is the interval of scope with confidence coefficient  $P=95\%$  (10). The values of estimation of the extended expanded uncertainty for the sets of input quantities are presented in Table 1.

$$\hat{U}_2 = \frac{(O_2)_m \frac{1-P}{2} - (O_2)_m \frac{1-P}{2}}{2}, \tag{13}$$

where  $f(O_2)_{mq}$  is the value of q-quantile of the function of distribution of the density of probabilities of the VCO value being simulated.

Fig. 7–9 demonstrate diagrams, which reflect dependence of the change in the extended expanded uncertainty of output quantity (P, T,  $\phi$ ) with an increase of MSD of one input physical quantity by 2, 3 and 4 times, respectively. We examined the sets of values of the input quantities that correspond to the minimum, mean and maximum levels of output quantity.

Table 1

Calculated and simulated by the Monte Carlo method values of VCO

| Number of measurement | VCO values, calculated by (8) | Mathematical expectation of the simulated VCO | VCO uncertainty |
|-----------------------|-------------------------------|---|-----------------|
| 0                     | 20,71503                      | 20,71498                                      | 0,01288         |
| 35                    | 20,69303                      | 20,69298                                      | 0,02079         |
| 70                    | 20,76964                      | 20,76961                                      | 0,01162         |
| 105                   | 20,67201                      | 20,67198                                      | 0,02150         |
| 130                   | 20,77282                      | 20,77281                                      | 0,00960         |
| 140                   | 20,86138                      | 20,86136                                      | 0,00815         |
| 172                   | 20,84103                      | 20,84102                                      | 0,00710         |
| 204                   | 20,85621                      | 20,85620                                      | 0,00662         |
| 236                   | 20,85598                      | 20,85597                                      | 0,00687         |
| 268                   | 20,85677                      | 20,85677                                      | 0,00658         |
| 270                   | 20,84035                      | 20,84032                                      | 0,00683         |
| 295                   | 20,87586                      | 20,87586                                      | 0,00475         |
| 320                   | 20,88221                      | 20,88221                                      | 0,00492         |
| 345                   | 20,90193                      | 20,90193                                      | 0,00367         |
| 370                   | 20,87519                      | 20,87517                                      | 0,00495         |
| 375                   | 20,85319                      | 20,85318                                      | 0,00580         |
| 400                   | 20,93778                      | 20,93778                                      | 0,00168         |
| 425                   | 20,88545                      | 20,88546                                      | 0,00453         |
| 450                   | 20,93647                      | 20,93647                                      | 0,00183         |
| 474                   | 20,87782                      | 20,87781                                      | 0,00494         |

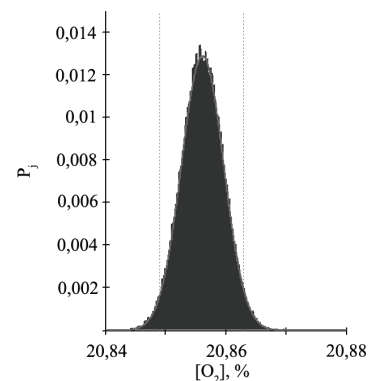


Fig. 6. Distribution of probabilities of the simulated VCO value that corresponds to the 236th set of input quantities

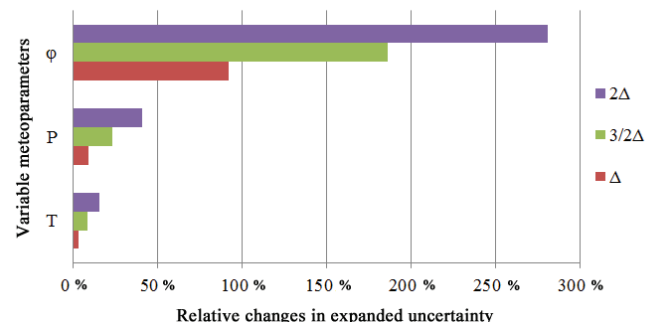


Fig. 7. Relative changes in the extended expanded uncertainty of minimum VCO value (for the set of measurements No. 105) on the change in MSD of measuring input quantities



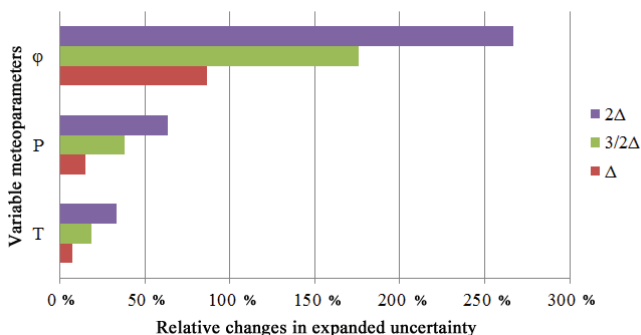


Fig. 8. Relative changes in the extended expanded uncertainty of mean value of VCO (for the set of measurements No. 270) on the change in MSD of measuring input quantities

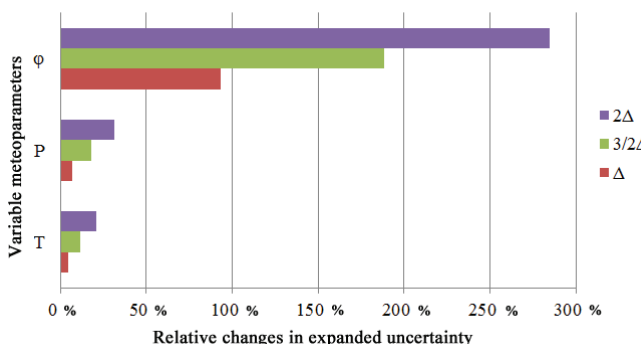


Fig. 9. Relative changes in the extended expanded uncertainty of maximum value of VCO (for the set of measurements No. 400) on the change in MSD of measuring input quantities

Based on the received data of research into the nature of change in the extended expanded uncertainty of VCO in the air on the MSD of meteorological parameters, it follows that relative air humidity is the most influencing input physical quantity. In this case, the effect of temperature and of atmospheric air pressure on the estimation of the extended expanded uncertainty of VCO at the mean level is less than that at the minimum and maximum levels.

Fig. 10 demonstrates dependence of the extended expanded uncertainty on the VCO value, calculated by the indirect method.

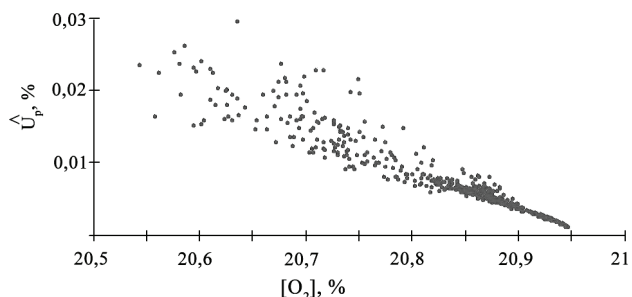


Fig. 10. Dependence of uncertainty on the indirect measurement of VCO

It follows from Fig. 10 that the proposed dependence has specific character, which is represented by the spread of estimation of the measurement uncertainty of VCO over the entire range. A variable set of values of input

quantities that corresponds to the narrow range of output quantity might be one of the probable reasons for this behavior of dependence.

A comparison of numerical results of uncertainties of the VCO values measured by the direct (0,104 %) and indirect (≤0,03 %) methods reveals that the former can be applied in practice for the calculation of VCO with a better accuracy.

Taking into account the data represented above on the instability of VCO in the air, it is relevant to consider daily/seasonal change in the meteorological parameters of medium and operating conditions of a boiler unit when executing control and managing the process of fuel combustion. The experiment performed in the work attests to the fact that VCO in the air (21 %) accepted as the constant cannot be used for the technological and ecological calculations of thermo-technical equipment performance. Thus, to increase the accuracy of EAC measurement, formula (1) must be transformed as follows:

$$\alpha = \frac{[O_2]}{[O_2] - [O_2]_{out}} = 1 + \frac{[O_2]_{out}}{20,957 \cdot \left(1 - \frac{e(P, T', \Phi)}{P}\right) - [O_2]_{out}} \quad (14)$$

Represented below is the two-parameter dependence of correction (absolute methodical error in the measurement of EAC):

$$\Delta\alpha([O_2], [O_2]_{out}) = \frac{[O_2]_{out} \cdot (21 - [O_2])}{([O_2] - [O_2]_{out}) \cdot (21 - [O_2]_{out})} \quad (15)$$

It is shown based on theoretical calculations that the application of the proposed method of EAC measurement, taking into account the current VCO in the air, makes it possible to considerably reduce methodological error of the measurement (to 1,2 of the absolute value of EAC quantity (at  $[O_2]=20,5 \%$ ,  $[O_2]_{out}=18 \%$ )).

The conducted research allows us to considerably enlarge the understanding of the effect of meteorological parameters on the gas composition of medium. The discovered functional interrelations make it possible to qualitatively increase the efficiency of fuel combustion due to an increase in the accuracy of measurement of EAC. However, the elimination of methodological error when determining EAC requires additional equipment in the form of an oxygen sensor, or a set of temperature sensors, pressure and humidity sensors, which will be introduced to the analytical block of a gas analyzing device. This may lead to additional financial expenditures.

Results of the conducted research can be used not only in the field of thermal-power engineering for the quality control over fuel materials combustion, but also:

- in medicine - for the creation of microclimatic zones with the assigned gas composition of the environment;
- in agriculture - to control growth of agricultural crops;
- in ecology when compiling climatic maps, as well as other areas.

We plan to conduct further experimental studies on the dynamics of change in VCO in the air in other climatic zones. The functional interrelations we received might be used as well for measuring the volumetric concentrations of nitrogen and carbon dioxide in the environment.

## 7. Conclusions

1. Based on basic gas laws and the Mendeleev-Klapeyron equation, we received function of dependence of VCO in the air on temperature, absolute pressure and relative humidity of the environment in the form  $[O_2]=f(T, P, \phi)$ .

2. It was established that VCO in the air depending on day or night and season can vary in the range of 0,1...0,6 %. These results are confirmed both by direct and indirect measurement of VCO.

3. An estimation of the extended expanded uncertainty of the direct method of measurement at confidence coefficient 95 % is 0,104 %. To evaluate the extended expanded uncertainty of the indirect method of measurement, we carried out imitation simulation, which consisted in a sequential increase in the instrumental errors of measuring tools. It was revealed as a result that the largest influence on the extend-

ed expanded uncertainty of measuring VCO by the indirect method is exerted by an increase in the instrumental error of hygrometer. In this case, a quantity of the extended expanded uncertainty of the indirect method of measurement did not exceed 0,03 %. A comparison of the uncertainties of VCO measurement by indirect ( $\leq 0,03$  %) and direct (0,104 %) methods reflects the possibility of applying the former in the course of technological and ecological calculations of functioning of thermo-technical equipment.

4. We proposed a method for measuring EAC, which is based on the calculation of the current VCO in the air, which makes it possible to exclude a methodological error in the measurement. It is shown that the quantity of determining EAC, according to the proposed method, may amount to 1,2 of absolute value of the quantity. In this case, its value may grow depending on VCO in the air and output gases.

## References

1. Volikov, A. N. Povyshenie jeffektivnosti szhiganija topliva v kotloagregatah [Text] / A. N. Volikov, O. N. Novikov, A. N. Okat'ev // Jenergonadzor-inform. – 2010. – Issue 1 (43). – P. 54–57.
2. Kouprianov, V. I. Optimization of excess air for the improvement of environmental performance of a 150 MW boiler fired with Thai lignite [Text] / V. I. Kouprianov, V. Tanetsakunvatana // Applied Energy. – 2003. – Vol. 74, Issue 3-4. – P. 445–453. doi: 10.1016/s0306-2619(02)00199-x
3. Kouprianov, V. I. Applications of a cost-based method of excess air optimization for the improvement of thermal efficiency and environmental performance of steam boilers [Text] / V. I. Kuprianov // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2005. – Vol. 9, Issue 5. – P. 474–498. doi: 10.1016/j.rser.2004.05.006
4. Houshfar, E. Effect of excess air ratio and temperature on NOx emission from grate combustion of biomass in the staged air combustion scenario [Text] / E. Houshfar, O. Skreiberg, T. Lovas, D. Todorovic, L. Sorum // Energy & Fuels. – 2011. – Vol. 25, Issue 10. – P. 4643–4654. doi: 10.1021/ef200714d
5. Ning, F.-H. Method for designing and calculating a boiler flue gas waste heat recovery system and its applications [Text] / F.-H. Ning, K. Wang, H.-Q. Zhang, K. Cheng // Journal of Engineering for Thermal Energy and Power. – 2015. – Issue 5. – P. 745–749.
6. Chajkovs'ka, Je. Je. The development of energy-saving operation technology of the biodiesel plant as a part of the cogeneration system [Text] / Je. Je. Chajkovs'ka // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – Vol. 1, Issue 8 (79). – P. 4–10. doi: 10.15587/1729-4061.2016.59479
7. Liu, X. J. An energy saving control for combined cycle power plant by supervisory predictive scheme [Text] / X. J. Liu, G. L. Hou, C. Yin // Proceedings of the European Control Conference. – Greece, 2007. – P. 2991–2998.
8. Ma, L. Effect of the separated overfire air location on the combustion optimization and NOx reduction of a 600 MWe FW down-fired utility boiler with a novel combustion system [Text] / L. Ma, Q. Fang, P. Tan, C. Zhang, G. Chen, D. Lv et. al. // Applied Energy. – 2016. – Vol. 180. – P. 104–115. doi: 10.1016/j.apenergy.2016.07.102
9. Luo, W. Exergy-based control strategy selection for flue gas recycle in oxy-fuel combustion plant [Text] / W. Luo, Q. Wang, J. Guo, Z. Liu, C. Zheng // Fuel. – 2015. – Vol. 161. – P. 87–96. doi: 10.1016/j.fuel.2015.08.036
10. Babak, V. P. Pidvyshennja tochnosti vymirjuvannja koeficijenta nadlyshku povitrja v kotloagregatah iz zastosuvannjam gazoanalizatoriv elektrohimichnogo typu [Text] / V. P. Babak, A. O. Zaporozhets, O. O. Redko // Promyslova teplotehnika. – 2015. – Vol. 37, Issue 1. – P. 82–96.
11. Klanova, J. Assessing the Influence of Meteorological Parameters on the Performance of Polyurethane Foam-Based Passive Air Samplers [Text] / J. Klanova, P. Eupr, J. Kohoutek, T. Harner // Environmental Science & Technology. – 2007. – Vol. 42, Issue 2. – P. 550–555. doi: 10.1021/es072098o
12. Katsoulis, B. D. The relationship between synoptic, mesoscale and microscale meteorological parameters during poor air quality events in Athens, Greece [Text] / B. D. Katsoulis // Science of The Total Environment. – 1996. – Vol. 181, Issue 1. – P. 13–24. doi: 10.1016/0048-9697(95)04953-3
13. Ovcharova, V. F. Metodika rascheta kolichestva kisloroda v atmosfernom vozduhe na osnove meteorologicheskikh parametrov s cel'ju prognozirovaniya meteopaticheskikh jeffektov atmosfery [Text]: metod. rekom. / V. F. Ovcharova. – Moscow: MZ SSSR, 1983. – 13 p.
14. Zaharov, I. P. Analiz chislennyh metodov ocenivaniya neopredelennosti v izmerenijah [Text] / I. P. Zaharov // Vestnik Nacional'nogo tehničeskogo universiteta Har'kovskij politehničeskij institut. – 2006. – Vol. 40. – P. 96–100.
15. Pereira, E. J. da S. Methodology of risk analysis by Monte Carlo Method applied to power generation with renewable energy [Text] / E. J. da S. Pereira, J. T. Pinho, M. A. B. Galhardo, W. N. Macedo // Renewable Energy. – 2014. – Vol. 69. – P. 347–355. doi: 10.1016/j.renene.2014.03.054

*Досліджено вплив метеорологічних параметрів навколишнього середовища на процес спалювання палива в котлоагрегатах. Встановлено функціональний взаємозв'язок між температурою, абсолютним тиском, відотною вологістю і об'ємною концентрацією кисню в повітрі. Запропоновано спосіб підвищення точності вимірювання коефіцієнта надлишку повітря для зменшення втрат теплової енергії в котлоагрегатах*

*Ключові слова: коефіцієнт надлишку повітря, метеорологічні параметри, невизначеність вимірювання, метод Монте-Карло*

*Исследовано влияние метеорологических параметров окружающей среды на процесс сжигания топлива в котлоагрегатах. Установлена функциональная взаимосвязь между температурой, абсолютным давлением, относительной влажностью и объемной концентрацией кислорода в воздухе. Предложен способ повышения точности измерения коэффициента избытка воздуха для уменьшения потерь тепловой энергии в котлоагрегатах*

*Ключевые слова: коэффициент избытка воздуха, метеорологические параметры, неопределенность измерения, метод Монте-Карло*

# ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА С УЧЕТОМ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ КИСЛОРОДА

**В. П. Бабак**

Доктор технических наук, профессор,  
член-корреспондент НАН Украины\*

E-mail: vdoe@ukr.net

**В. М. Мокийчук**

Кандидат технических наук, доцент\*\*

E-mail: nau\_307@ukr.net

**А. А. Запорожец**

Аспирант, младший научный сотрудник\*

E-mail: art.morco@gmail.com

**А. А. Редько**

Аспирант\*\*

E-mail: ralex\_sh@mail.ru

\*Отдел теплотриии, диагностики и  
оптимизации в энергетике

Институт технической теплофизики НАН Украины  
ул. Желябова, 2 а, г. Киев, Украина, 03057

\*\*Кафедра информационно-измерительных систем  
Национальный авиационный университет  
пр. Космонавта Комарова, 1, г. Киев, Украина, 03058

## 1. Введение

Современное состояние теплотехнического оборудования в странах постсоветского пространства характеризуется значительным сроком эксплуатации и низкой эффективностью. В Украине около 11 тысяч котлов мощностью от 0,1 Гкал/ч до 1 Гкал/ч находятся в эксплуатации более 20 лет, свыше 6000 котельных установок функционируют с КПД около 70 %. Техническое состояние парка существующих котлоагрегатов требует их незамедлительно усовершенствования. Максимального эффекта в ряде таких технологий можно добиться путем автоматизации процесса сжигания топлива [1]. При этом оптимизация процесса сжигания топлива направлена на формирование стехиометрической воздушно-топливной смеси (ВТС).

Для того чтобы контролировать процесс сжигания топлива в топке котла, применяют коэффициент избытка воздуха (КИВ), что определяется отношением количества воздуха, поступившего в камеру сгорания, к теоретически необходимому для полного сжигания топлива. На практике КИВ зависит от объемных кон-

центраций кислорода в воздухе (константа, 21 %) и выходных газах.

Принимая во внимание значение КИВ на процесс сжигания топлива, актуальной задачей является повышение точности измерения КИВ путем учета метеорологических параметров окружающей среды.

## 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

В литературных источниках [2–5] представлены разные способы оптимизации процесса сжигания топлива в промышленных котлоагрегатах большой мощности (свыше 3,5 МВт). В качестве топлива зачастую рассматриваются каменный уголь, бурый уголь, торф, сланцы, биомасса, мазут, другие твердо- и жидкотопливные материалы [2]. Высокоэффективный процесс сжигания топлива достигается путем минимизации КИВ, границей которого является резкое увеличение CO у выходящих газах (свыше 100 ppm) [3]. При этом также снижается количество NO<sub>x</sub>, минимальное значение которого достигается при КИВ



диапазоне 0,8–0,95 [4]. Часто в технологических процессах используют рекуперацию тепла отходящих газов, что позволяет сократить потребление топлива до 30 % [5].

Для обеспечения высокоэффективного сжигания топлива применяется разного рода системы: биодизельная установка в составе когенерационной системы [6], двухуровневая интеллектуальная система управления процессом сжигания топлива в паровых котлах и парогенераторах [7], система активного смесеобразования для водогрейных котлов мощностью до 600 МВт [8], многоуровневая система рециркуляции газов в парогенераторах [9].

Во многих рассмотренных методах и системах в качестве информативного параметра выступает КИВ. В работе [10] был предложен способ повышения точности его измерения на основании предположения о непостоянстве концентрации газов в воздухе. Важность прогнозирования концентраций газов, входящих в состав атмосферного воздуха, приведена в работе [11]. В работе [12] приведены исследования влияния загрязняющих веществ в воздухе на изменения синоптических и метеорологических параметров среды.

На практике для определения КИВ используют так называемую «кислородную» формулу, которая при полном сгорании топлива принимает следующий вид:

$$\alpha = \frac{21}{21 - [\text{O}_2]_{\text{out}}}, \quad (1)$$

где 21 – объемная концентрация кислорода (ОКК) в воздухе, %,  $[\text{O}_2]_{\text{out}}$  – ОКК в уходящих газах, %.

Считается, что величина ОКК постоянная при любых климатических изменениях и явлениях, в горной местности и на равнинах. Однако многолетние климато-физические наблюдения [13] опровергают это утверждение, что обуславливает необходимость проведения исследования в этой области.

### 3. Цель и задачи исследования

Проведенные исследования ставили целью определить особенности изменения ОКК в воздухе в зависимости от метеорологических параметров окружающей среды, что позволит повысить точность определения КИВ и, как следствие, повысить эффективность сжигания топлива в котлоагрегатах.

Для достижения цели ставились следующие задачи:

- определить функциональную взаимосвязь между текущими метеорологическими параметрами (температурой, влажностью, давлением) и ОКК в воздухе;
- исследовать суточную/сезонную динамику изменения текущей ОКК прямым (при помощи газоанализирующего прибора) и косвенным (на основе метеопараметров) способами;
- провести метрологическую оценку полученных результатов;
- предложить функциональную зависимость КИВ от текущей ОКК в воздухе и оценить точность его измерения.

## 4. Методы и оборудование исследования влияния метеорологических параметров на изменение концентрации кислорода в воздухе

### 4.1. Методы определения объемной концентрации кислорода в воздухе

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

$$E = 23,15 \cdot 10^3 \cdot \frac{P - e}{R \cdot T}, \quad (2)$$

где  $R$  – удельная газовая постоянная для сухого воздуха, Дж/кг·К; 23,15 – массовая концентрация кислорода в сухом воздухе, %.

Расчет парциального давления водяного пара определяется по формуле:

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

где  $\varphi$  – влажность воздуха, %, а  $p_{\text{нас}}$  – величина, которую можно определить согласно рекомендациям Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation (Швейцария):

$$p_{\text{нас}}(P, T') = f(P) \cdot r(T'), \quad (4)$$

$$f(P) = 1,0016 + 3,15 \cdot 10^{-6} \cdot P - 0,074 \cdot P^{-1}, \quad (5)$$

$$r(T') = 6,112 \cdot e^{\frac{17,62T'}{243,24 + T'}}, \quad (6)$$

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

Переход к объемной концентрации кислорода происходит по следующему соотношению:

$$[\text{O}_2] = \frac{6,236 \cdot E \cdot T}{P' \cdot M_{\text{O}_2}}, \quad (7)$$

где  $[\text{O}_2]$  – объемная концентрация кислорода в воздухе, %;  $P'$  – атмосферное давление, мм рт. ст.;  $M_{\text{O}_2}$  – молярная масса кислорода, г/моль.

Конечное аналитическое представление функциональной зависимости объемной концентрации кислорода в воздухе от метеопараметров имеет вид [10]:

$$[\text{O}_2](P, T', \varphi) = 20,957 \cdot \left( 1 - \frac{e(P, T', \varphi)}{P} \right). \quad (8)$$

### 4.2. Оборудование для исследования суточной/сезонной динамики изменения объемной концентрации кислорода в воздухе

Для определения текущей ОКК в воздухе прямым методом использовался портативный газоанализатор ОКСИ-5М с абсолютной погрешностью определения концентрации кислорода  $\Delta_{\text{O}_2} = \pm 0,1$  %.

Для определения ОКК в воздухе косвенным путем использовался набор средств измерительной техники, состоящий из двух метеорологических психометрических термометров ТМ4-1 ( $\Delta_T = \pm 0,2$  °С,  $\Delta_\phi = \pm 3$  %) и барометра-анероида БАММ-1 ( $\Delta_p = \pm 20$  гПа).

### 5. Результаты исследования изменения объемной концентрации кислорода в воздухе

Для проведения экспериментальных исследований по определению текущей объемной концентрации кислорода в воздухе прямым (с помощью газоанализатора) и косвенным (на основе метеорологических данных о температуре, абсолютном давлении и относительной влажности) методами, была выбрана местность на территории города Лубны Полтавской области (Украина) со следующими географическими координатами: широта – 50,013°, долгота – 32,991°.

На территории г. Лубны преобладает умеренно-холодный климат. Согласно классификации Кеппена, климат на территории города соответствует уровню Dfb (климат умеренно холодный с равномерным увлажнением). На основе статистических данных между 1982 г. и 2012 г. среднегодовая температура в городе Лубны составляет 8°C. Среднегодовая норма осадков составляет 628 мм.

Эксперимент по определению текущей ОКК в воздухе прямым и косвенным методами продолжался в течение 8 месяцев: с августа 2015 г. по март 2016 г. Параллельные измерения проводились 3 раза в день около 09:00, 15:00 и 20:00 по местному времени при любых погодных явлениях (дождь, снег, порывистый ветер и т. д.) в специальном защищенном корпусе на местной метеостанции. Всего получено 475 наборов измерений.

На рис. 1 приведены результаты прямых измерений ОКК в воздухе на протяжении всего эксперимента.

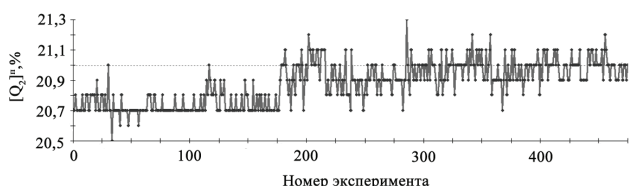


Рис. 1. Объемная концентрация кислорода, измеренная газоанализатором ОКСИ-5Н

При проведении эксперимента параллельно с измерением объемной концентрации кислорода в воздухе при помощи газоанализатора ОКСИ 5-М проводилось измерение главных метеорологических параметров – температуры, влажности и давления (рис. 2–4).

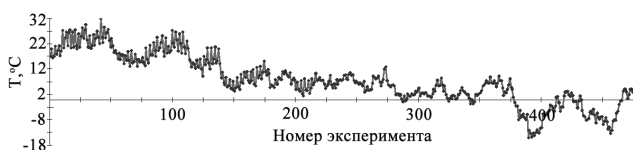


Рис. 2. Измеренные значения температуры воздуха в течение экспериментального периода

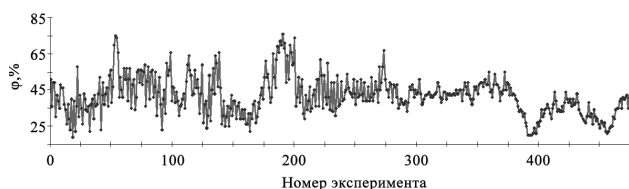


Рис. 3. Измеренные значения относительной влажности воздуха в течение экспериментального периода



Рис. 4. Измеренные значения атмосферного давления в течение экспериментального периода

На основе полученных данных с учетом зависимости (8) была получена теоретическая зависимость изменения объемной концентрации кислорода в воздухе на протяжении проведенного эксперимента (рис. 5).



Рис. 5. Косвенные значения объемной концентрации кислорода в течение экспериментального периода

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

Наблюдаемый минимум ОКК в воздухе при прямом измерении составил 20,5 %, максимум – 21,3 %; минимальное значение ОКК в воздухе при косвенном измерении составило 20,5 %, максимальное – 21,0 %.

### 6. Обсуждение результатов исследования объемной концентрации кислорода в воздухе

Для сравнения точности двух методов определения ОКК был произведен расчет неопределенности измерения при помощи программного продукта MathCad.

*Прямой метод измерения объемной концентрации кислорода*

Газоанализатор ОКСИ-5Н в режиме определения ОКК имеет цену деления 0,1 %. Его абсолютная погрешность измерения (по паспортным данным) также составляет 0,1 %.

Экспериментальные измерения были однократными и получены на разных уровнях выходной величины. Массив полученных значений ОКК был разделенный на 95 групп по 5 значений. Неопределенностью по типу А принято считать медианную оценку среднеквадратических отклонений полученных групп, что составило 0,024 %.

Неопределенность по типу Б прямого метода измерений для равномерного закона распределения вероятностей случайных величин составляет:

$$\hat{u}_B = \frac{\Delta_{O_2}}{\sqrt{3}} = 0,058\text{ \%}. \quad (10)$$

Оценка суммарной стандартной неопределенности равна:

$$\hat{u}_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = 0,063 \%. \tag{11}$$

Оценка расширенной неопределенности прямого метода измерений при доверительной вероятности 95 % рассчитана согласно [14]:

$$\begin{aligned} \hat{U}_1 &= t_p(\hat{\nu}_{\text{eff}}) \cdot \hat{u}_c = \\ &= t_{0,95} \left( f_{\text{eff}} \cdot \left[ 1 + \frac{\hat{u}_A^2}{\hat{u}_B^2} \right]^2 \right) \cdot \hat{u}_c = 0,104 \%, \end{aligned} \tag{12}$$

где  $t_p(\hat{\nu}_{\text{eff}})$  – коэффициент Стьюдента для вероятности P и числа степеней свободы  $f_{\text{eff}} = n_i - 1$ ,  $n_i$  – число измерений, проведенное при оценивании i-го вклада неопределенности.

*Косвенный метод измерения объемной концентрации кислорода*

Провести оценивание расширенной неопределенности предложенного косвенного метода измерения ОКК классическим методом не представляется возможным, поскольку аналитическое представление модели измерения имеет вид сложной нелинейной функциональной зависимости от трех входных величин. При дифференцировании функции (8) имеем не упрощаемые многочлены частных производных, что усложняет дальнейшие расчеты, в том числе определение коэффициентов корреляции входных величин. Следовательно, для решения этой задачи предлагается оценить расширенную неопределенность косвенного метода измерения путем имитационного моделирования по методу Монте-Карло [15].

По рассчитанным значениям ОКК, на основе измерений метеопараметров, были выделены наборы значений входных величин соответствующих 20-и уровням выходной величины. Значения каждой входной величины из выделенных наборов были приняты в качестве оценки математического ожидания для генерирования массивов случайных чисел. В качестве оценки среднеквадратического отклонения (СКО) было принято отношение абсолютной инструментальной погрешности и коэффициента, который связывает СКО закона Гаусса с его границами ( $k=1,96$  при  $P=95 \%$ ). Количество итераций генерирования массивов случайных входных величин равно  $10^5$ .

По данным сгенерированных массивов входных случайных величин были получены 20 массивов выходной случайной величины. Математические ожидания моделируемого массива значений ОКК отличаются в пятом знаке после запятой от рассчитанных по формуле (8) значением ОКК (табл. 1) соответственно.

Гипотеза о нормальности закона распределения моделируемой выходной величины подтверждена статистическим критерием  $\chi$ -квадрат Пирсона. Распределение вероятностей моделируемого значения ОКК представлено на рис. 6 в виде гистограммы.

Оценивание расширенной неопределенности измеренного косвенным методом ОКК по результатам моделирования методом Монте-Карло представляет собой интервал охвата с доверительной вероятностью  $P=95 \%$  (10). Значения оценки расширенной неопределенности для наборов входных величин представлены в табл. 1.

Таблица 1

Рассчитанные и моделируемые по методу Монте-Карло значения ОКК

| Номер измерения | Значения ОКК, рассчитанные по (8) | Математическое ожидание моделируемой ОКК | Неопределенность ОКК |
|-----------------|-----------------------------------|--|----------------------|
| 0               | 20,71503                          | 20,71498                                 | 0,01288              |
| 35              | 20,69303                          | 20,69298                                 | 0,02079              |
| 70              | 20,76964                          | 20,76961                                 | 0,01162              |
| 105             | 20,67201                          | 20,67198                                 | 0,02150              |
| 130             | 20,77282                          | 20,77281                                 | 0,00960              |
| 140             | 20,86138                          | 20,86136                                 | 0,00815              |
| 172             | 20,84103                          | 20,84102                                 | 0,00710              |
| 204             | 20,85621                          | 20,85620                                 | 0,00662              |
| 236             | 20,85598                          | 20,85597                                 | 0,00687              |
| 268             | 20,85677                          | 20,85677                                 | 0,00658              |
| 270             | 20,84035                          | 20,84032                                 | 0,00683              |
| 295             | 20,87586                          | 20,87586                                 | 0,00475              |
| 320             | 20,88221                          | 20,88221                                 | 0,00492              |
| 345             | 20,90193                          | 20,90193                                 | 0,00367              |
| 370             | 20,87519                          | 20,87517                                 | 0,00495              |
| 375             | 20,85319                          | 20,85318                                 | 0,00580              |
| 400             | 20,93778                          | 20,93778                                 | 0,00168              |
| 425             | 20,88545                          | 20,88546                                 | 0,00453              |
| 450             | 20,93647                          | 20,93647                                 | 0,00183              |
| 474             | 20,87782                          | 20,87781                                 | 0,00494              |

$$\hat{U}_2 = \frac{(O_2)_{m_{\frac{1+P}{2}}} - (O_2)_{m_{\frac{1-P}{2}}}}{2}, \tag{13}$$

где  $f(O_2)_{m_q}$  – значение q-квантиля функции распределения плотности вероятностей моделируемого значения ОКК.

На рис. 7–9 представлены диаграммы, отображающие зависимость изменения расширенной неопределенности выходной величины (P, T,  $\phi$ ) при увеличении СКО одной входной физической величины в 2, 3 и 4 раза соответственно. Рассматривались наборы значений входных величин, соответствующих минимальному, среднему и максимальному уровням выходной величины.

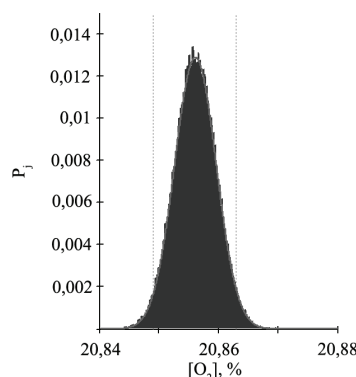


Рис. 6. Распределение вероятностей моделируемого значения ОКК, соответствующего 236-му набору входных величин



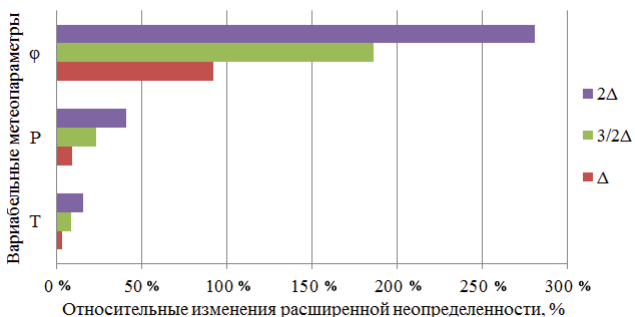


Рис. 7. Относительные изменения расширенной неопределенности минимального значения ОКК (для набора измерений № 105) от изменения СКО измерения входных величин

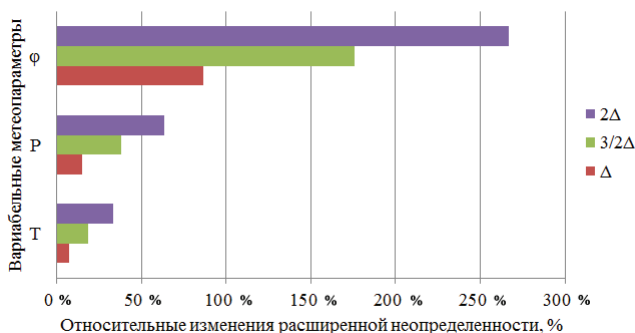


Рис. 8. Относительные изменения расширенной неопределенности среднего значения ОКК (для набора измерений № 270) от изменения СКО измерения входных величин

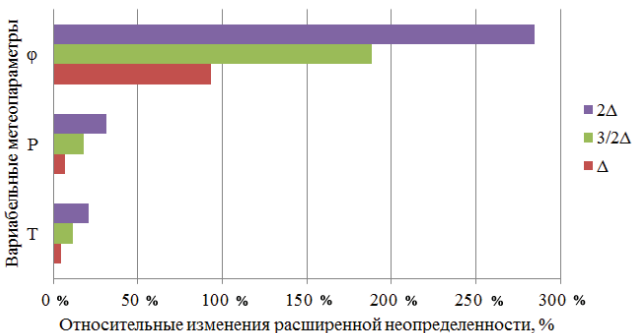


Рис. 9. Относительные изменения расширенной неопределенности максимального значения ОКК (для набора измерений № 400) от изменения СКО измерения входных величин

Исходя из полученных данных исследования о характере изменения расширенной неопределенности ОКК в воздухе от СКО метеорологических параметров, следует, что наиболее влияющей входной физической величиной является относительная влажность воздуха. При этом влияние температуры и давления атмосферного воздуха на оценку расширенной неопределенности ОКК на среднем уровне меньше, чем на минимальном и максимальном уровнях.

На рис. 10 приведена зависимость расширенной неопределенности от значения ОКК, рассчитанного косвенным методом.

Из рис. 10 следует, что предложенная зависимость имеет специфический характер, что отображено раз-

бросом оценки неопределенности измерения ОКК на всем диапазоне. Одной из вероятных причин такого поведения зависимости может быть переменный набор значений входных величин, соответствующий узкому диапазону значений выходной величины.

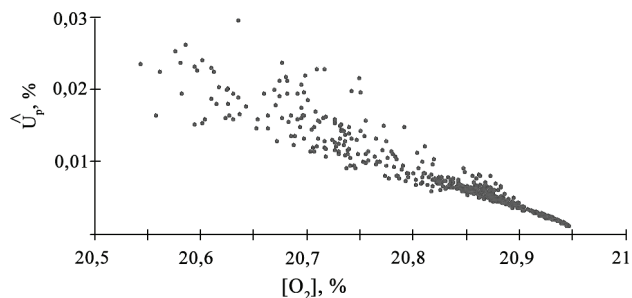


Рис. 10. Зависимость неопределенности от косвенного измерения ОКК

Сравнение численных результатов неопределенностей измеренных значений ОКК прямым (0,104 %) и косвенным ( $\leq 0,03$  %) методами показывает, что первый может применяться на практике для вычисления ОКК с большей точностью.

Принимая во внимание приведенные выше данные о нестабильности ОКК в воздухе, актуальным является учет суточного/сезонного изменения метеорологических параметров среды и условий эксплуатации котлоагрегата при проведении контроля и управления процессом сжигания топлива. Проведенный в работе эксперимент свидетельствует о том, что принятая за константу ОКК в воздухе (21 %) не может быть использована при технологических и экологических расчетах работы теплотехнического оборудования. Таким образом, для повышения точности измерения КИВ формула (1) должна быть преобразована следующим образом:

$$\alpha = \frac{[O_2]}{[O_2] - [O_2]_{out}} = 1 + \frac{[O_2]_{out}}{20,957 \cdot \left(1 - \frac{e(P, T', \phi)}{P}\right) - [O_2]_{out}} \quad (14)$$

Ниже представлена двухпараметрическая зависимость поправки (абсолютной методической погрешности измерения КНП):

$$\Delta\alpha([O_2], [O_2]_{out}) = \frac{[O_2]_{out} \cdot (21 - [O_2])}{([O_2] - [O_2]_{out}) \cdot (21 - [O_2]_{out})} \quad (15)$$

На основе теоретических расчетов показано, что применение предложенного метода измерения КИВ, с учетом текущей ОКК в воздухе, позволяет значительно сократить методическую погрешность измерения (до 1,2 абсолютного значения величины КИВ (при  $[O_2] = 20,5$  %,  $[O_2]_{out} = 18$  %)).

Проведенные исследования позволяют значительно расширить понимание влияние метеорологических параметров на газовый состав среды. Обнаруженные функциональные взаимосвязи позволяют качественно повысить эффективность сжигания топлива за счет увеличения точности измерения КИВ. Однако исключение методической погрешности определения КИВ

требует дополнительного оборудования в виде сенсора кислорода, либо набора сенсоров температуры, давления и влажности, которые будут введены в аналитический блок газоанализирующего устройства. Это может привести к дополнительным финансовым затратам.

Результаты проведенного исследования могут быть использованы не только в сфере теплоэнергетики при контроле за качеством сжигания топливных материалов, но и:

- в медицине – для создания микроклиматических зон с заданным газовым составом окружающей среды;
- в аграрном секторе – для контроля за ростом сельскохозяйственных культур;
- в экологии при создании климатических карт, а также других сферах.

Планируется проведение дальнейших экспериментальных исследований по динамике изменения ОКК в воздухе в других климатических зонах. Полученные функциональные взаимосвязи можно использовать также для измерения объемных концентраций азота и углекислого газа в окружающей среде.

---

## 7. Выводы

---

1. На базе основных газовых законов и уравнения Клайперона-Менделеева получена функция зависимости ОКК в воздухе от температуры, абсолютного давления и относительной влажности окружающей среды в виде  $[O_2]=f(T, P, \phi)$ .

2. Установлено, что ОКК в воздухе в зависимости от суток и сезона может колебаться в диапазоне 0,1...0,6 %. Данные результаты подтверждаются как прямым, так и косвенным измерением ОКК.

3. Оценка расширенной неопределенности прямого метода измерения при доверительной вероятности 95 % составляет 0,104 %. Для оценки расширенной неопределенности косвенного метода измерения проведено имитационное моделирование, которое заключалось в последовательном увеличении инструментальных погрешностей средств измерительной техники. В результате было выявлено, что наибольшее влияние на расширенную неопределенность измерения ОКК косвенным методом имеет увеличение инструментальной погрешности гигрометра. При этом величина расширенной неопределенности косвенного метода измерения не превышала 0,03 %. Сравнение неопределенностей измерения ОКК косвенным ( $\leq 0,03$  %) и прямым (0,104 %) методами отображают возможность применения первого при технологических и экологических расчетах функционирования теплотехнического оборудования.

4. Предложен метод измерения КИВ, который базируется на учете текущей ОКК в воздухе, что позволяет исключить методическую погрешность измерения. Показано, что величина поправки определения КИВ, согласно предложенному методу, может составлять до 1,2 абсолютного значения величины. При этом ее значение может возрастать в зависимости от ОКК в воздухе и выходных газах.

## Литература

1. Воликов, А. Н. Повышение эффективности сжигания топлива в котлоагрегатах [Текст] / А. Н. Воликов, О. Н. Новиков, А. Н. Окадьев // Энергонадзор-информ. – 2010. – № 1 (43). – С. 54–57.
2. Kouprianov, V. I. Optimization of excess air for the improvement of environmental performance of a 150 MW boiler fired with Thai lignite [Text] / V. I. Kouprianov, V. Tanetsakunvatana // Applied Energy. – 2003. – Vol. 74, Issue 3-4. – P. 445–453. doi: 10.1016/S0306-2619(02)00199-X
3. Kouprianov, V. I. Applications of a cost-based method of excess air optimization for the improvement of thermal efficiency and environmental performance of steam boilers [Text] / V. I. Kuprianov // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2005. – Vol. 9, Issue 5. – P. 474–498. doi: 10.1016/j.rser.2004.05.006
4. Houshfar, E. Effect of excess air ratio and temperature on NOx emission from grate combustion of biomass in the staged air combustion scenario [Text] / E. Houshfar, O. Skreiberg, T. Lovas, D. Todorovic, L. Sorum // Energy & Fuels. – 2011. – Vol. 25, Issue 10. – P. 4643–4654. doi: 10.1021/ef200714d
5. Ning, F.-H. Method for designing and calculating a boiler flue gas waste heat recovery system and its applications [Text] / F.-H. Ning, K. Wang, H.-Q. Zhang, K. Cheng // Journal of Engineering for Thermal Energy and Power. – 2015. – Issue 5. – P. 745–749.
6. Чайковська, Є. Є. Розробка енергозберігаючої технології підтримки функціонування біодизельної установки у складі когенераційної системи [Текст] / Є. Є. Чайковська // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2016. – Т. 1, № 8 (79). – С. 4–10. doi: 10.15587/1729-4061.2016.59479
7. Liu, X. J. An energy saving control for combined cycle power plant by supervisory predictive scheme [Text] / X. J. Liu, G. L. Hou, C. Yin // Proceedings of the European Control Conference. – Greece, 2007. – P. 2991–2998.
8. Ma, L. Effect of the separated overfire air location on the combustion optimization and NOx reduction of a 600 MWe FW down-fired utility boiler with a novel combustion system [Text] / L. Ma, Q. Fang, P. Tan, C. Zhang, G. Chen, D. Lv et. al. // Applied Energy. – 2016. – Vol. 180. – P. 104–115. doi: 10.1016/j.apenergy.2016.07.102
9. Luo, W. Exergy-based control strategy selection for flue gas recycle in oxy-fuel combustion plant [Text] / W. Luo, Q. Wang, J. Guo, Z. Liu, C. Zheng // Fuel. – 2015. – Vol. 161. – P. 87–96. doi: 10.1016/j.fuel.2015.08.036
10. Бабак, В. П. Підвищення точності вимірювання коефіцієнта надлишку повітря в котлоагрегатах із застосуванням газоаналізаторів електрохімічного типу [Текст] / В. П. Бабак, А. О. Запорожець, О. О. Редько // Промислова теплотехніка. – 2015. – Т. 37, № 1. – С. 82–96.

11. Klanova, J. Assessing the Influence of Meteorological Parameters on the Performance of Polyurethane Foam-Based Passive Air Samplers [Text] / J. Klanova, P. Eupr, J. Kohoutek, T. Harner // Environmental Science & Technology. – 2007. – Vol. 42, Issue 2. – P. 550–555. doi: 10.1021/es072098o
12. Katsoulis, B. D. The relationship between synoptic, mesoscale and microscale meteorological parameters during poor air quality events in Athens, Greece [Text] / B. D. Katsoulis // Science of The Total Environment. – 1996. – Vol. 181, Issue 1. – P. 13–24. doi: 10.1016/0048-9697(95)04953-3
13. Овчарова, В. Ф. Методика расчета количества кислорода в атмосферном воздухе на основе метеорологических параметров с целью прогнозирования метеопатических эффектов атмосферы [Текст]: метод. реком. / В. Ф. Овчарова. – М.: МЗ СССР, 1983. – 13 с.
14. Захаров, И. П. Анализ численных методов оценивания неопределенности в измерениях [Текст] / И. П. Захаров // Вестник Национального технического университета Харьковский политехнический институт. – 2006. – Т. 40. – С. 96–100.
15. Pereira, E. J. da S. Methodology of risk analysis by Monte Carlo Method applied to power generation with renewable energy [Text] / E. J. da S. Pereira, J. T. Pinho, M. A. B. Galhardo, W. N. Macedo // Renewable Energy. – 2014. – Vol. 69. – P. 347–355. doi: 10.1016/j.renene.2014.03.054

