

Вимірюйте
усе доступне вимірюванню
й робіть недоступне вимірюванню
доступним.

Галілео Галілей

ISSN 2307-2180

Метрологія



Та прилади

METROLOGY AND INSTRUMENTS

№ 2(82), 2020

Науково-виробничий журнал
Scientific and production journal

Засновники:

Академія метрології України,
Харківський національний
університет радіоелектроніки (ХНУРЕ),
Державне підприємство
«Всеукраїнський державний
науково-виробничий центр
стандартизації, метрології, сертифікації
та захисту прав споживачів»
(ДП «Укрметрестандарт»),
ТОВ Виробничо-комерційна
фірма (ВКФ) «Фавор ЛТД»

Видається з березня 2006 року
Рік випуску п'ятнадцятий
Передплатний індекс 92386

Головний редактор

Володарський Є. Т., д. т. н., проф.

Редакційна колегія:

Величко О.М., д. т. н., проф.
Захаров І.П., д. т. н., проф.
Коломієць Л.В., д. т. н., проф.
Косач Н.І., д. т. н., проф.
Кошева Л.О., д. т. н., проф.
Кошовий М.Д., д. т. н., проф.
Кучерук В.Ю., д. т. н., проф.
Кухарчук В.В., д. т. н., проф.
Назаренко Л.А., д. т. н., проф.
Пістун Є.П., д. т. н., проф.
Семенець В.В., д. т. н., проф.
Середюк О.Є., д. т. н., проф.
Туз Ю.М., д. т. н., проф.

Іноземні члени редколегії:

Tadeusz Skubis, dr hab. inż., prof.
(Польща)
Zygmunt Warsza, doc., dr inż. (Польща)
Михалченко В.М., к. т. н. (Казахстан)

Експертна рада:

Большаков В.В., д. т. н., с. н. с.,
заступник головного редактора
Кузьменко Ю.В., к. т. н., с. н. с.
Петришин І.С., д. т. н., проф.
Рожнов М.С., к. х. н., с. н. с.
Сурду М.М., д. т. н., проф.

Редакційна група:

Фісун В.П., заступник головного
редактора
Винокуров Л.І., науковий редактор —
відповідальний секретар
Проненко М.П., модератор сайту,
дизайнер
Зайцев Ю.О., дизайнер-верстальник

Журнал **рекомендовано до друку**
вченою радою ХНУРЕ
(протокол №2 від 28.02.2020)

Адреса редакції:

61001, Харків, вул. Рижівська, 11, к. 2;
Тел.: (057) 703-23-28; (095) 00-68-665
E-mail: metrolog-prylady@ukr.net
<http://www.amu.in.ua/journal1>
<https://mmi-journal.org/index.php/journal/issue/view/1>

Видавець та виготовлювач:

ВКФ «Фавор ЛТД»
61140, Харків, пр-т Гагаріна, 94-А, кв. 35;
Свідцтво про внесення
до Держреєстру видавців,
виготівників і розповсюджувачів
видавничої продукції
серія ХК № 90 від 17.12.2003.

Підписано до друку 02.05.2020.
Формат 60×84/8. Папір крейдований.
Ум. друк. арк. 8,43. Обл.-вид. арк. 7,13.
Друк офсетний. Тираж 400 прим.
Замовлення № 14.

© «Метрологія та прилади», 2020

Журнал зареєстровано
у Міністерстві юстиції України,
свідцтво
серія КВ № 22796-12696П
від 03.07.2017;
включено до Переліку наукових
фахових видань України, наказ
Міністерства освіти і науки України
№ 747 від 13.07.2015
Журнал включено до Міжнародної
наукометричної бази даних
Index Copernicus, лист від 08.03.2013
ICV 2018 = 56,77

The Journal is **Registered**
in Ministry of Justice of Ukraine,
Certificate series KB № 22796-12696P
dated 03.07.2017;
is included in the List of scientific
professional editions of Ukraine,
the order of the Ministry of Education
and Science of Ukraine
No. 747 dated 13.07.2015
The journal is included in the
International Scientific Databases Index
Copernicus, Letter dated 08.03.2013
ICV 2018 = 56,77

Co-founders:

Kharkiv National University
of Radio Electronics (KNURE);
Public Organization
«Academy of Metrology of Ukraine»;
State Enterprise «Ukrainian State
Research and Production Centre
for Standardisation, Metrology,
Certification and Consumers
Rights Protection»
(SE «Ukrmetreststandart»);
LLC Production and Commercial Firm
(PCF) «FAVOR, LTD»

Published since march 2006.
Release year fifteenth
Subscription index 92386.

Chief editor:

Volodarskyi Ye.T., D.Sc. (Eng.), prof.

Editorial board:

Kolomiyets L.V., D.Sc. (Eng.), prof.
Kosach N.I., D.Sc. (Eng.), prof.
Kosheva L.O., D.Sc. (Eng.), prof.
Koshoviy M.D., D.Sc. (Eng.), prof.
Kucheruk V.Yu., D.Sc. (Eng.), prof.
Kukharchuk V.V., D.Sc. (Eng.), prof.
Nazarenko L.A., D.Sc. (Eng.), prof.
Pistun Ye.P., D.Sc. (Eng.), prof.
Semenets V.V., D.Sc. (Eng.), prof.
Serediuk O.Ye., D.Sc. (Eng.), prof.
Tuz Yu.M., D.Sc. (Eng.), prof.
Velychko O.M., D.Sc. (Eng.), prof.
Zakharov I.P., D.Sc. (Eng.), prof.

Foreign members of the editorial board:

Tadeusz Skubis, prof. dr hab. inż.
(Poland)
Zygmunt Warsza, doc., dr inż. (Poland)
Mykhailchenko V.M., Ph.D.
in Engineering Science (Kazakhstan)

Advisory Board:

Bolshakov V.B., D.Sc. (Eng.), S.Sc.Off.
Deputy Chief Editor
Kuzmenko Yu.V., Ph.D. (Eng.), S.Sc.Off.,
Petryshyn I.S., D.Sc. (Eng.), prof.
Rozhnov M.S., Ph.D. (Chem.), S.Sc.Off.
Surd M.M., D.Sc. (Eng.), prof.

Editorial Team:

Fisun V.P., Deputy Chief Editor
Vynokurov L.I., Scientific Editor,
Executive Secretary
Pronenko M.P., site moderator, designer
Zaitsev Yu.O., maker-up designer

The journal is recommended for publication

by the scientific council of KNURE
(protocol number 2 dated 28.02.2020)

Editorial Address:

61001, Kharkiv, st. Ryzhivska, 11, r. 2;
tel.: (057) 703-23-28; (095) 00-68-665
e-mail: metrolog-prylady@ukr.net
<https://www.amu.in.ua/journal1>
<https://mmi-journal.org/index.php/journal/issue/view/1>

Publisher and manufacturer:

PCF «Favor LTD»
61140, Kharkiv,
pr-t. Gagarin, 94-A, sq. 35;
Certificate of inclusion in the State
Register of Publishers, Manufacturers
and Distributors of Publishing Products,
series XK № 90 dated 17.12.2003.

Signed for printing dated 02.05.2020
Format 60 × 84/8. Paper is coated.
Conditional printed sheets 8.43.
Accounting and publishing sheets 7.13.
Offset printing. Circulation 400 copies
Order number 14.

ISSN (print) 2307-2180

ISSN (online) 2663-9564

DOI: 10.33955/2307-2180

© «Metrology and Instruments», 2020

НАЦІОНАЛЬНА ЕТАЛОННА БАЗА

Рожнов М. С., Кузьменко Ю. В., Мельник Д. М., Левбарг О. С.,
Рак А. М., Пашун В. І., Погрібна Л. М.

Державний первинний еталон
одиниць об'єму та об'ємної витрати газів
у діапазоні тиску від 1 МПа до 5 МПа (PVTt-15) 3

МЕТОДИ ТА МЕТОДИКИ

Сіренко М. М., Горкунов Б. М., Львов С. Г., Лисенко В. В.
Автоматизована установка
для намагнічування висококоерцитивних магнітів
електромагнітних приводів 13

ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ ТА СИСТЕМИ

Орнатський Д. П., Кривокульська О. О., Бурбела О. О., Близняк О. Д.
Вимірювальна система
для неруйнівного контролю металевих прутків 22

ПОХИБКИ ТА НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

Костик І. В., Матіко Ф. Д., Роман В. І.
Дослідження додаткових складових
невизначеності результату вимірювання
витрати нестационарного потоку 25

Ігнаткін В. У., Забулонов Ю. Л., Туз Ю. М., Фаррахов О. В.
Розрахунок і оцінка невизначеності
викидів забруднювальних речовин
у навколишнє середовище 34

NATIONAL METROLOGICAL STANDARDS BASE

Rozhnov M. S., Kuzmenko Yu. V., Melnyk D. M., Levbarg O. S.,
Rak A. M., Pashun V. I., Pohribna L. M.

State Primary Standard
of Gas Volume and Flow Rate Units
for the Pressure Range of 1 MPa to 5 MPa (PVTt-15)

METHODS AND PROCEDURES

Sirenko M. M., Gorkunov B. M., Lvov S. G., Lysenko V. V.
Automated Unit for Magnetization
of Strong Magnets
of Electromagnetic Drives

MEASURING INSTRUMENTS AND SYSTEMS

Ornatsky D. P., Krivokulska O. O., Burbela O. O., Bliznyuk O. D.
Measuring System
for Non-Destructive Testing of Metal Rods

ERRORS AND UNCERTAINTY

Kostyk I. V., Matiko F. D., Roman V. I.
Investigating the Additional Components
of Uncertainty of Measurement Result
of Unsteady Flow

Ihnatkin V. U., Zabulonov Yu. L., Tuz Yu. M., Farrakhov O. V.
Calculation and Estimation
of the Uncertainty of Pollution Emissions
in the Environment

СТАТТЮ ВИЛУЧЕНО

За результатами аналізу статті В. У. Ігнаткін, Ю. Л. Забулонов, Ю. М. Туз, О. В. Фаррахов
«РОЗРАХУНОК І ОЦІНКА НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИКИДІВ ЗАБРУДНЮВАЛЬНИХ РЕЧОВИН У НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ»
на наявність плагіату статтю вилучено з онлайн видання журналу у відповідності до положень політики протидії плагіату, як таку що містить фактично
переклад статті аналогічної назви та змісту, що була надрукована у журналі «Измерительная техника», № 2, 2009, Росія.

THE ARTICLE IS ELLIMINATED

As the result of the article V. U. Ihnatkin, Yu. L. Zabulonov, Yu. M. Tuz, O. V. Farrakhov
«CALCULATION AND ESTIMATION OF THE UNCERTAINTY OF POLLUTION EMISSIONS IN THE ENVIRONMENT»
revision for borrowings from third parties work this article had been eliminated according to the policy of anti-plgiarism as such, that contains, in fact,
the complete plagiarism with the similar article published by «Measurement Technics» journal, Russia, N 2, 2009

МЕТРОЛОГІЧНА СЛУЖБА

Дзябенко О. М.
Метрологічна діяльність на підприємстві 40

METROLOGICAL SERVICE

Dziabenko O. M.
Metrological Activity At the Enterprise

ОБЛІК ЕНЕРГОНОСІЇВ

Середюк О. Є., Малісевич Н. М.
Дослідження впливу температурного фактору
за експрес-контролю теплоти згорання
природного газу 44

ACCOUNTING OF ENERGY CARRIERS

Seredyuk O. E., Malisevich N. M.
Research of the Influence of Temperature Factor
on Express Control of Natural Gas
Combustion Heat

МОДЕЛІ ТА МОДЕЛЮВАННЯ

Олейник О. Ю., Тараненко Ю. К.
Комп'ютерна модель динаміки
гетерогенної середовища жидкість-тверде тело
в технологическом аппарате с барботажем 51

MODELS AND MODELING

Oliyynyk O. Yu., Taranenko Yu. K.
A Computer Model of the Dynamics
of a Heterogeneous Liquid-Solid Medium
in a Technological Apparatus with Bubbling

НАНОМЕТРОЛОГІЯ

Кальна О. А., Курський Ю. С.
Фемтосекундна оптична томографія 57

NANOMETROLOGY

Kalnaya O. A., Kurskoy Yu. S.
Femtosecond Optical Tomography

ХІМІЧНА МЕТРОЛОГІЯ

Калинюк М. М., Грицьків Я. П., Капітанчук Л. М.
Розроблення методик визначення
вмісту домішок кисню, азоту, водню
в алюмінідах титану 61

CHEMICAL METROLOGY

Kalyniuk M. M., Gritskiv Ya. P., Kahitanchuk L. M.
Elaboration of Methods for Determination
on Content of the Oxygen, Nitrogen, Hydrogen Admixtures
in Titanium Aluminides

КОМПЕТЕНТНІСТЬ ЛАБОРАТОРІЙ

Никитюк О. А., Новіков В. М.
Визначення та аналізування головних вимог
до компетентності лабораторій 68

COMPETENCE OF LABORATORIES

Nykyrtyuk O. A., Novikov V. M.
Definition and Analysis of the Main Requirements
for Laboratory Competence

ІНФОРМАЦІЯ

XII Міжнародна науково-технічна конференція
«Метрологія та вимірювальна техніка» 72

INFORMATION

XII International Scientific & Technical Conference
«Metrology and Measurement Techniques

DOI: 10.33955/2307-2180(2)2020.3-12

УДК 681.121

ДЕРЖАВНИЙ ПЕРВИННИЙ ЕТАЛОН ОДИНИЦЬ ОБ'ЄМУ ТА ОБ'ЄМНОЇ ВИТРАТИ ГАЗІВ У ДІАПАЗОНІ ТИСКУ ВІД 1 МПА ДО 5 МПА (PVTt-15)

State Primary Standard of Gas Volume and Flow Rate Units for the Pressure Range of 1 MPa to 5 MPa (PVTt-15)



М. С. Рожнов, кандидат хімічних наук,
заступник директора науково-виробничого інституту,
Ю. В. Кузьменко, кандидат технічних наук,
заступник генерального директора,
Д. М. Мельник, начальник науково-дослідного відділу,
О. С. Левбарг, начальник науково-дослідної лабораторії,
А. М. Рак, заступник начальника відділу,
В. І. Пашун, начальник сектору,
Л. М. Погрібна, провідний науковий співробітник,
ДП «Укрметртестстандарт», м. Київ, Україна,
e-mail: dmytro.melnyk50@gmail.com

M. S. Rozhnov, candidate of chemical sciences,
deputy director of the Research and Production Institute,
Yu. V. Kuzmenko, candidate of technical sciences,
deputy director general,
D. M. Melnyk, head of the research department,
O. S. Levbarg, head of the research laboratory,
A. M. Rak, deputy head of department,
V. I. Pashun, head of sector,
L. M. Pohribna, leading researcher,
SE «Ukrmetrteststandart», Kyiv, Ukraine,
e-mail: dmytro.melnyk50@gmail.com

В Україні вперше створено первинний еталон одиниць об'єму та об'ємної витрати газів, заснований на відтворенні одиниць за методом PVTt та передаванні розміру одиниць через критичні сопла Вентури в діапазоні тиску від 1 МПа до 5 МПа. Застосування створеного еталона забезпечить метрологічну простежуваність результатів вимірювання об'єму та об'ємної витрати газів за високого тиску в діапазоні витрати до 100 м³/год та калібрування первинних еталонних сопел з діаметром горловини від 0,1 мм до 3 мм.

final pressure and temperature values. The structural and functional scheme of the measurement standard is shown in Figure 3. The standard consists of two units. The first unit is intended to realise, keep and transfer the units of gas volume and flow rate. The general view of the block is shown in Figure 4. The unit contains high pressure collection tank, precision water thermostat, vacuum pump, piston gas pressure gauge, flow switch, fine filter, a set of seven Venturi nozzles with diameters from 0.1 mm to 3.0 mm. The second unit is designed to form a stationary gas flow and provide a critical gas flow rate (at the speed of sound) at the nozzle throat. In the case of an elementary reversible adiabatic (isentropic) process at a critical velocity, the mass flow rate of gas passing through the nozzle is maximally possible. The unit consists of equipment for reducing the pressure from 150 bar to 70 bar and from 70 bar to 10 bar, the heat exchanger and the instruments measuring the pressure and temperature of the gas flow. The created measurement standard will assure metrological traceability of the measurements of gas volume and volume flow rate at high pressures for the flow rate up to 100 m³/h and calibration of the primary reference nozzles with a throat diameter from 0.1 mm to 3 mm.

For the first time in Ukraine a primary measurement standard of gas volume and flow rate units in a pressure range of 1 MPa to 5 MPa has been created. The standard is based on realisation of the units by PVTt principle and units dissemination using critical Venturi nozzles. Gas passing through the nozzle during its calibration fills an evacuated collection tank located downstream the nozzle, and the respective time interval is measured. Mass flow rate is calculated by multiplying the volume of the collection tank by the gas density change and dividing by the tank filling time. Density values are determined by the equation of state and the measured initial and

Ключові слова: витрата газу, еталон витрати, метод PVTt, сопло Вентури, ланцюг простежуваності.
Keywords: gas flow rate, flow rate standard, PVTt method, Venturi nozzle, traceability chain.

Прилади для вимірювання об'єму та об'ємної витрати газів (зокрема, природного газу) широко застосовують для комерційного обліку газів та під час виробництва продукції в різних галузях економіки. На сьогодні чинною є ієрархічна структура (повірочна схема), що встановлює підпорядкованість еталонів, які беруть участь у передаванні одиниць об'єму та об'ємної витрати газів тільки за атмосферного тиску [1]. Ієрархічну структуру очолює Державний первинний еталон одиниць об'єму газу

(кубічний метр, м³) та об'ємної витрати газу (кубічний метр на годину, м³/год), до складу якого входять еталонні установки дзвонового типу та комплекс допоміжних засобів вимірювальної техніки. Діапазони значень, які відтворює еталон, становлять: для об'єму газу — від 0,4 м³ до 1,0 м³ і для об'ємної витрати газу — від 4 м³/год до 200 м³/год.

Більшість промислових витратомірів працює за тиску від 2 бар до 50 бар, й їхня допустима відносна похибка повинна бути в межах ± 1,5 % [2].

Таблиця 1. Первинні еталони одиниці об'ємної витрати газу за високого тиску, засновані на методі PVTt
 Table 1. Primary standards of the gas volume flow-rate unit at high pressure based on the PVTt method

| № з/п | Розміщення еталона | Джерела | Рік уведення в експлуатацію та реконструкції | Діапазон тиску, бар | Витрата, м ³ /год | Розширена невизначеність, % | Об'єм накопичувальної ємності, л | Робочі гази |
|-------|---|---------|--|---------------------|---|-----------------------------|----------------------------------|------------------------------|
| 1 | PVTt 26 м ³ , NIST, США | [5] | 1960, 1997, 2002 | 1...8 | 54...4600 | 0,13 | 26000 | Природний газ, повітря |
| 2 | PVTt 34 L, NIST, США | [6] | 2002 | 1...70 | 0,06...6 | 0,03...0,045 | 34 | Безпечні гази |
| 3 | PVTt 677 L, NIST, США | | | 1...8 1...17 | 0,6...9 0,6...120 | 0,02...0,05 | 677 | Безпечні гази, природний газ |
| 4 | PVTt-Piscine LNE-LADG, Alfortville, Франція | [7] | 1970 | 6...55 | 9...90000 | 0,15...0,18 | 2070 | Природний газ |
| 5 | PVTt-M6, LNE м. Пуатьє, Франція | [8] | 2008 | 3...60 | 6...10800 | 0,15 | 100, 2500 | Природний газ, повітря, азот |
| 6 | PTKGP, Kharagpur, India | [9] | 1999 | 1...7,5 | до 45 | 0,1 | 2000 | Повітря |
| 7 | CMS, Hsinshu, Тайвань | [10] | 2013 | 2...10 | 0,006...18 | 0,1 | 2, 30, 500 | Безпечні гази |
| 8 | NMIJ, Японія | [11] | 2013 | 2...10 | 0,1...18 | 0,17 | 11000 | Повітря |
| 9 | NIM, Zhenjiang, КНР | [12] | 2015 | 1...6 | 0,2...1600 (P = 1 бар) 0,5...400 (P = 6 бар) | 0,067 | 30000, 34000 | Повітря |

Таблиця 2. Первинні еталони одиниці об'ємної витрати газу за високого тиску, засновані на об'єметричному та гравіметричному методах

Table 2. Primary standards of the gas volume flow-rate unit at high pressure based on the volumetric and gravimetric methods

| № з/п | Розміщення еталона | Джерела | Рік уведення в експлуатацію та реконструкції | Діапазон тиску, бар | Витрата, м ³ /год | Розширена невизначеність, % | Принцип дії | Робочі гази |
|-------|---|---------|--|---------------------|------------------------------|-----------------------------|--|------------------------|
| 1 | РПДУ-41 ПГ, ВАТ «ДНІПРОГАЗ», м. Дніпро, Україна | [13] | 1989 | до 15 | 500 — 150000 | 0,3 | Поршень діаметром 80 см, довжина 18 м, з 4-х частин V = 0,5 м ³ | Природний газ, повітря |
| 2 | Pigsar™, Dorsten, Germany | [14] | 1993 | 14...50 | 8 — 6500 | 0,16 | Поршень діаметром 250 мм, змінний об'єм | Природний газ |
| 3 | Cesate LNE Quest, Пуатьє, Франція | [15] | 2000 | 1...40 | 0,01 — 4 | 0,2 | Поршень у закритій петлі | Природний газ, повітря |
| 4 | ГЭТ 118-2013, ВНИИР, Казань, Росія (установка ЭУ-4) | [16] | 2013 | до 10 | 10 — 2300 | 0,11 | Ваги з понтоном. Ємність для газу 1 м ³ | Природний газ, повітря |
| 5 | ДП «Івано-Франківська стандартметрологія», Україна | [17] | 2014 | до 16 бар | 4 — 200 | 0,2 | Дві поршневі секції діаметром 20 см; L = 2 м | Природний газ, повітря |

Насправді експлуатаційна похибка цих витратомірів у 2-3 рази перевищує паспортну. Розбіжності в результатах вимірювань кількості газу за допомогою лічильників за робочих умов, та тиску до 50 бар і за умов повірки, тобто за атмосферного тиску, призводять до суттєвих втрат природного газу під час його постачання й використання і не дають можливості перейти до обліку природного газу з урахуванням його теплоти згоряння. Тільки за перше півріччя 1996 р. невраховані втрати природного газу в Україні становили 4,2 млрд. м³, тобто понад 6 % від кількості розподіленого газу [3].

У 2001 році постановою Кабінету Міністрів України №1089 від 21.08.01 було затверджено «Концепцію створення єдиної системи обліку природного газу». Передбачені «Концепцією...» роботи з упровадження високоточних сучасних лічильників природного газу та стандартів, гармонізованих з європейськими, частково було виконано. Роботи зі створення спеціальних еталонів об'ємної витрати природного газу за робочих умов та тиску до 5 МПа було відкладено через складність технічних проблем.

У розвинених країнах єдність вимірювань витрати газів за високого тиску заснована на метрологічній простежуваності результатів вимірювань, яку реалізують через послідовність сопел критичного витікання Вентурі, що відіграють роль еталонних мір витрати [4]. Первинні еталонні сопла калібрують за допомогою первинних еталонів витрати газів, заснованих на використанні трьох методів: *PVTt*, об'ємометричного та гравіметричного. Характеристики найбільш відомих первинних еталонів одиниці об'ємної витрати газу за високого тиску, в яких застосовано метод *PVTt*, подано в таблиці 1 [5—12], об'ємометричний і гравіметричний методи — в таблиці 2 [13—17]. Міжнародну ієрархічну схему для засобів вимірювань витрати газів та міжнародний ланцюг метрологічної простежуваності результатів вимірювань об'ємної витрати газів за тиску до 50 бар подано на рис. 1 і 2 [18].

У ДП «Укрметрестандарт» створено Державний первинний еталон одиниць об'єму та об'ємної ви-

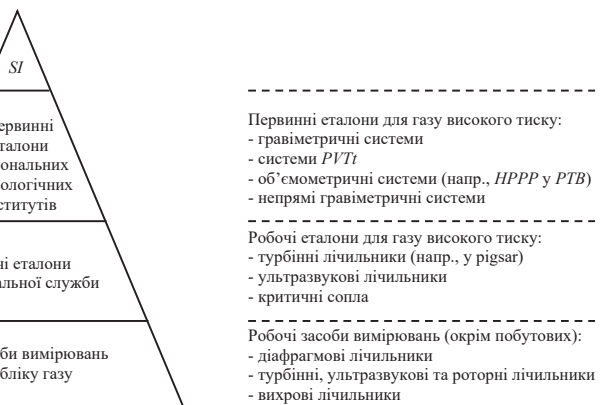


Рис. 1. Міжнародна ієрархічна схема для засобів вимірювань витрати газу за тиску до 50 бар

Fig. 1. An international hierarchical scheme for the instruments measuring gas flow rates at pressures up to 50 bar

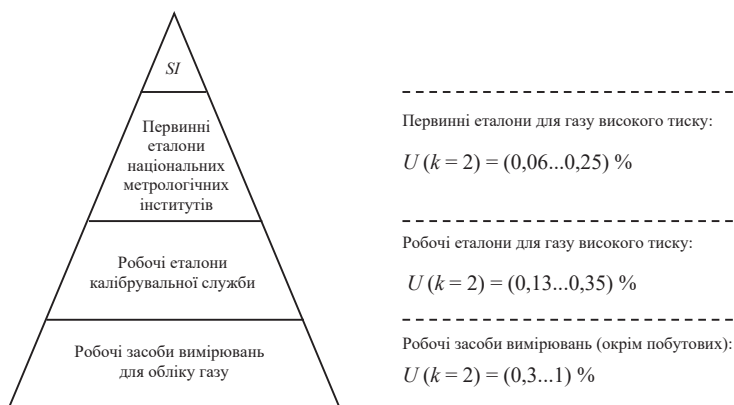


Рис. 2. Міжнародний ланцюг метрологічної простежуваності результатів вимірювань об'ємної витрати газу за тиску до 50 бар

Fig. 2. International metrological traceability chain for the gas volume flow rate measurements at pressures up to 50 bar

трати газів у діапазоні тиску від 1 МПа до 5 МПа на основі застосування методу *PVTt*, що забезпечує незалежність витрати від коливань тиску та можливість чітко визначити границі об'єму, який потрібно враховувати. Газ, що проходить крізь сопло під час калібрування, заповнює звакуумований п'єзометр, розміщений на виході сопла, протягом вимірюваного інтервалу часу. Масову витрату розраховують множенням об'єму п'єзометра на зміну густини газу і діленням на час пропускання газу. Зміну густини визначають через рівняння стану та вимірені початкові й кінцеві значення тиску та температури. Структурно-функційну схему еталона показано на рис. 3, специфікацію обладнання та засобів вимірювальної техніки згідно зі структурно-функційною схемою подано в табл. 3.

Еталон складається з двох блоків. Перший блок призначений для відтворення, зберігання та передавання одиниць об'єму та об'ємної витрати газів. Загальний вид блоку показано на рис. 4.

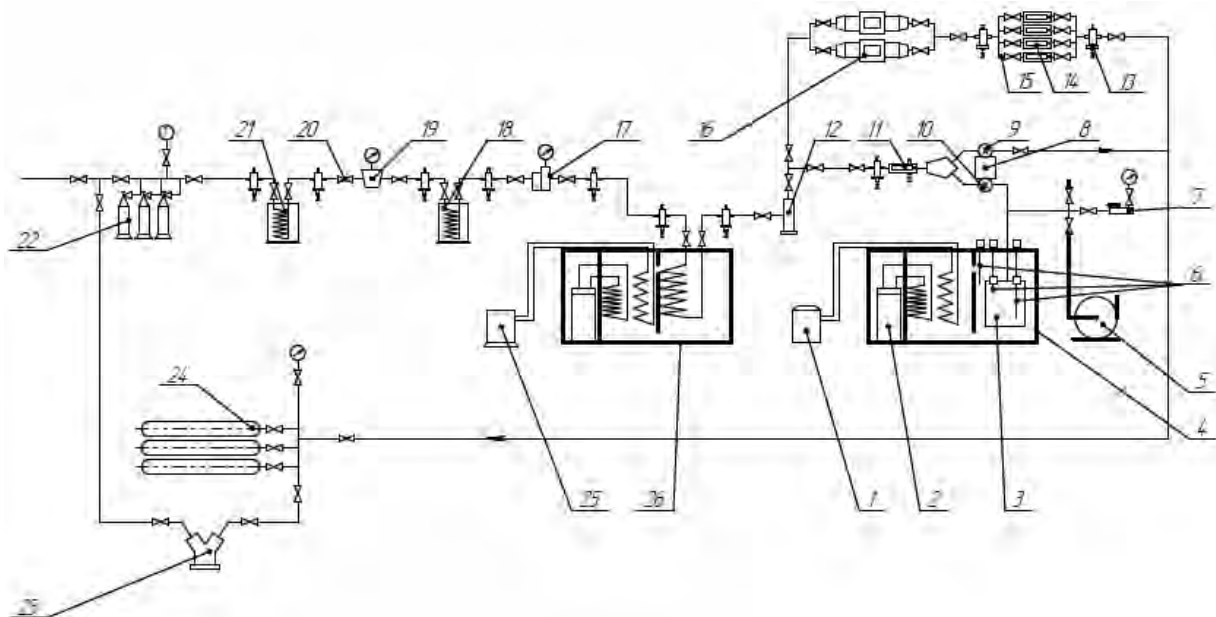


Рис. 3. Структурно-функційна схема первинного еталона одиниць об'єму та об'ємної витрати газів у діапазоні тиску від 1 МПа до 5 МПа

Fig. 3. Structural and functional diagram of the primary standard of gas volume and volume flow rate units at the pressure range from 1 MPa to 5 MPa

Блок містить: п'єзометр високого тиску (рис. 5), термостат водяний прецизійний, вакуумнасос, вантажопоршневий газовий манометр (рис. 6), перемикач потоків, пристрій для калібрування первин-

них еталонних сопел (рис. 7), фільтр тонкого очищення, набір сопел Вентурі (рис. 8) у складі 7 шт. з діаметрами від 0,1 мм до 3,0 мм.

Другий блок призначений для формування стаціонарного потоку газу та забезпечення критичної швидкості потоку газу в горловині сопла (швидкості звуку). За умов елементарного оборотного адіабатичного (ізоентропійного) процесу за критичної швидкості масова витрата газу, що проходить через сопло, є максимально можливою. Блок складається з обладнання для зниження тиску від 150 бар до 70 бар і від 70 бар до 10 бар, теплообмінника



Рис. 4. Блок відтворення, зберігання та передавання розміру одиниць об'єму та об'ємної витрати газів

Fig. 4. Unit intended to realise, keep and transfer the units of gas volume and volume flow rate



Рис. 5. П'єзометр високого тиску

Fig. 5. High pressure collection tank



Рис. 6. Вантажопоршневий газовий манометр
Fig. 6. Piston gas pressure gauge



Рис. 8. Сопло Вентурі
Fig. 8. Venturi nozzle



Рис. 7. Пристрій для калібрування
первинних еталонних сопел
Fig. 7. Device for calibrating primary standard nozzles

та засобів вимірювання тиску та температури потоку газу.

Як теплообмінник застосовано доопрацьований термостат ТВП-6 зі змієвиком із мідної труби $\varnothing 8 \times 6$ мм у комплекті з коригувальним циркуляційним термостатом *Lauda 312* та пристроями для вимірювання температури й тиску на вході та виході потоку.

Щоб забезпечити роботу еталона, було розроблено:

- пристрій для вимірювання з високою точністю температури та тиску газів у трубах $\varnothing 8 \times 6$ мм;
- пристрій для розміщення та, за потреби, швидкої заміни сопел з різними діаметрами горловини під час роботи еталона;
- засіб для калібрування робочих еталонних сопел методом звірення з первинними еталонними соплами за допомогою компаратора (рис. 9);
- методика розрахунку критичних сопел Вентурі;

Таблиця 3. Специфікація обладнання та засобів вимірювальної техніки у структурно-функційній схемі первинного еталона одиниць об'єму та об'ємної витрати газів у діапазоні тиску від 1 МПа до 5 МПа

Table 3. Specification of equipment and measuring instruments in the structural and functional diagram of the primary standard of gas volume and volume flow rate units at the pressure range from 1 MPa to 5 MPa

| № | Назва | Технічні та метрологічні характеристики |
|---|--|--|
| 1 | Термостат циркуляційний <i>Lauda RK8CP</i> | Робоча температура від мінус 50 до 200 °С. Похибка підтримання температури $\pm 0,02$ °С. Споживана потужність 2,7 кВт. Вага 62 кг |
| 2 | Агрегат герметичний холодильний термостата ТВП-6 ВС 1250 | Холодопродуктивність 1,25 кВт Споживана потужність 0,7кВт |
| 3 | П'єзометр | Місткість 15 л, максимальний тиск 100 бар, зовнішній діаметр 273 мм, товщина стінки 11 мм, довжина 400 мм |
| 4 | Термостат водяний прецизійний ТВП-6 | Споживана потужність 6,5 кВт. СКВ $5 \cdot 10^{-3}$ °С за температури (20...50) °С. Градiєнт $\leq 4 \cdot 10^{-2}$ °С/м |
| 5 | Високовакуумна насосна установка <i>VS35A</i> | Споживана потужність 0,95 кВт, вакуум $2 \cdot 10^5$ мм рт. ст., форвакуум $1 \cdot 10^3$ мм рт. ст. |

Закінчення таблиці 3

End of Table 3

| № | Назва | Технічні та метрологічні характеристики |
|----|--|--|
| 6 | Платинові термометри опору (ПТО) | Діаметр зовнішній 10,2 мм |
| | 6.1 ПТО для вимірювання температури газу в п'езометрі та води у термостаті | $T = (15...35) \text{ }^\circ\text{C}$, $P = 60$ бар Похибка (0,001...0,005) $^\circ\text{C}$; $L = 500$ мм — 2 шт., $L = 80$ мм — 3 шт. |
| | 6.2 ПТО для вимірювання температури газу в трубопроводах | $T = (15...35) \text{ }^\circ\text{C}$, $P = 150$ бар Похибка 0,01 $^\circ\text{C}$; $L = 120$ мм — 10 шт. |
| | 6.3 ПТО для вимірювання температури води в термостаті 4 і теплообмінниках 18, 21, 26 | $T = (15...35) \text{ }^\circ\text{C}$, тиск атмосферний Похибка 0,01 $^\circ\text{C}$; $L = 120$ мм — 4 шт. |
| 7 | Вантажопоршневий манометр газовий фірми WIKA, тип CPB-5000 | $P = (0,4...100)$ бар Похибка (0,008...0,01) % |
| 8 | Перемикач потоків на базі кранів Festo типу VZBA DN 8 | Швидкість перемикання потоку 0,035 с |
| 9 | Кран фірми Festo типу VZBA | $P = 60$ бар, $T = (15...35) \text{ }^\circ\text{C}$ DN8, з поворотним приводом |
| 10 | Кран фірми Festo типу VZBA | $P = 60$ бар, $T = (15...35) \text{ }^\circ\text{C}$ DN8, з поворотним приводом |
| 11 | Пристрій для калібрування еталонних сопел | $P = (10...50)$ МПа, $T = (15...35) \text{ }^\circ\text{C}$, діаметр горловин сопел, які підлягають калібруванню, мм 0,1; 0,3; 0,4; 1,0; 1,5; 2,0; 3,0 |
| 12 | Фільтр тонкого очищення | $P = 100$ бар, ефективність фільтрації 5 мкм |
| 13 | Пристрій для вимірювання температури й тиску газу в трубопроводах | Температура газу (15...95) $^\circ\text{C}$, тиск (10...150) бар. Кількість 10 шт. Внутрішній діаметр трубопроводу 6 мм. Похибка вимірювання тиску 0,05 %, температури — 0,1 $^\circ\text{C}$ |
| 14 | Пристрій для калібрування сопел у зборі з соплом, яке підлягає калібруванню як робоче еталонне сопло | Діаметр горловин сопел, що підлягають калібруванню, від 0,1 до 3,0 мм |
| 15 | Набір пристроїв для калібрування сопел у зборі з первинними еталонними соплами | Номинальні діаметри горловини сопел, мм 0,1; 0,3; 0,4; 1,0; 1,5; 2,0; 3,0 |
| 16 | Комплект компараторів витрати — лічильників газу | Роторні та турбінні лічильники газу з діапазоном витрати (5...100) м ³ /год за тиску (10...50) бар |
| 17 | Редуктор балонний низького тиску | Робочий тиск на виході від 70 бар до 10 бар, пропускна здатність 80 м ³ /год |
| 18 | Теплообмінник водяний для підігрівання потоку газу перед редуктором низького тиску | Потужність 1,5 кВт. Тиск газу в трубопроводі (10...50) бар |
| 19 | Первинний редуктор балонний високого тиску | Робочий тиск на виході від 150 бар до 70 бар, пропускна здатність 80 м ³ /год |
| 20 | Вентиль КВО регульовальний | Максимальний діаметр прохідного перетину 6 мм, тиск до 150 бар, 40 шт. |
| 21 | Теплообмінник водяний для підігрівання потоку газу перед редуктором високого тиску | Потужність 1,5 кВт, тиск газу в трубопроводі 150 бар |
| 22 | Джерело газів для формування та підтримання потоку газів | Блок з 10 балонів загальною місткістю 0,4 м ³ з газом під тиском 150 бар |
| 23 | Компресор мембранний дотискний з системою осушування газу | Максимальний тиск 150 бар, потужність 7,5 кВт, продуктивність 18 м ³ /год за умов усмоктування |
| 24 | Газгольдер | Блок з 16 балонів загальною місткістю 1,28 м ³ , максимальний тиск 50 бар |
| 25 | Термостат циркуляційний Lauda 312 | Робоча температура від мінус 30 $^\circ\text{C}$ до 200 $^\circ\text{C}$. Споживана потужність 2,7 кВт. Вага 30 кг. Похибка підтримання температури $\pm 0,02 \text{ }^\circ\text{C}$. |
| 26 | Теплообмінник водяний на базі термостата ТВІІ-6 | Споживана потужність 6,5 кВт. |

- методика дослідження метрологічних характеристик первинного еталона одиниць об'єму та об'ємної витрати газів у діапазоні тиску від 1 МПа до 5 МПа;

- методика калібрування первинних еталонних сопел;

- методика калібрування робочих еталонних сопел.

Для роботи застосовують чисті гази в балонах під тиском 150 бар. Вихідний потік газу випускають в атмосферу або відводять до газгольдера для повторного використання.

Для підготування газів та визначання їхньої якості застосовують комплекс технічних засобів та засобів вимірювальної техніки, які входять до складу первинного еталона одиниці молярної частки газів (мембранні й поршневі компресори, вакуумні насоси, універсальні блоки очищення й осушування газів, ємності для зберігання підготовлених газів, хроматографи з полум'яно-іонізаційними, кондуктометричними та хемілюмінесцентними детекторами.

Обладнання еталона розміщено у трьох приміщеннях газоаналітичного корпусу загальною площею 45 кв. м. У першому приміщенні розміщено обладнання для формування стаціонарного потоку газів, у другому — обладнання для відтворення одиниці об'єму та об'ємної витрати, у третьому — програмний логічний контролер та засоби автоматизації.

За результатами дослідження впливу температури приміщень і термодинамічних властивостей потоку газів та їх взаємодії на точність калібрування сопел було встановлено їх оптимальні значення.

Температура в приміщеннях повинна бути в межах (15...25) °С, зміна температури протягом 24 год — ± 2 °С. Різниця між температурою повітря у приміщенні та температурою води в термостаті з п'єзометром повинна бути не більшою за 1,5 К.

Під час роботи різниця температури між нижньою та верхньою частинами п'єзометра має бути не більшою за 0,2 °С.

Температурна рівновага між газом, п'єзометром і температурою води в термостаті повинна встановитися після вакуумування п'єзометра протягом 60 хв і витримання протягом 20 хв після цього. Тиск у п'єзометрі повинен бути не більшим за 60 Па ($6 \cdot 10^{-4}$ бар).

Для формування необхідного потоку використовують газ із температурою точки роси, не меншою від мінус 30 °С (відносно вологістю, не більшою за 2 %). Допустимий розмір часток — не більший за 5 мкм.

Час витримки сопел і усієї газової схеми еталона для забезпечення однакової температури перед вимірюванням становить 5 год.

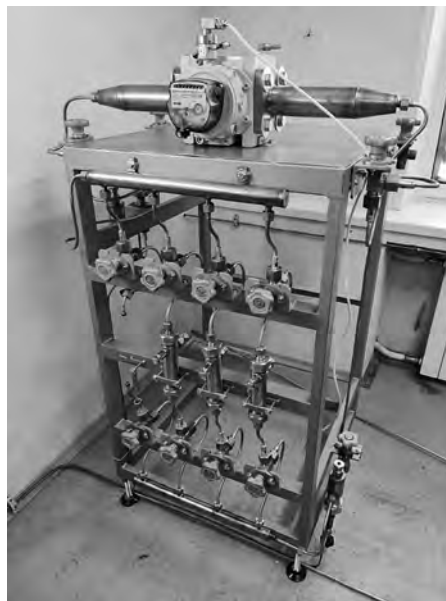


Рис. 9. Засіб для калібрування робочих еталонних сопел

Fig. 9. Device for calibrating working-standard nozzles

Перед вимірюванням вихідна кількість газу пропускається протягом 10 хв. Щоби не враховувати під час вимірювання динамічних функцій, швидкість витрати перед соплом підтримують не вищою за 15 м/с.

Середня температура на вході в сопло під час наповнення п'єзометра повинна бути в діапазоні (18...22) °С. Температура може змінюватися не більше ніж на $\pm 0,5$ °С.

Діапазон об'ємної витрати газів (зведеної до стандартних умов: 20 °С; 101 325 Па), у якому відтворюють, зберігають та передають одиницю вимірювання, становить від 5 м³/год до 65 м³/год.

Еталон забезпечує відтворення, зберігання та передавання одиниці вимірювання із середнім квадратичним відхилом результату вимірювання, який не перевищує 0,01 % за 10 незалежних спостережень.

Невилучена систематична похибка не перевищує 0,1 %.

Стандартна невизначеність вимірювання за типом *A* — $u_A = 0,01$ %, за типом *B* — $u_B = 0,05$ %, сумарна стандартна невизначеність $u_C = 0,05$ %, розширена невизначеність $U = 0,1$ % з коефіцієнтом охоплення $k = 2$ та довірчою ймовірністю $p = 0,95$).

Нестабільність еталона за рік становить 0,002 %. Ємність джерела газів (сухого повітря, азоту, природного газу) — 0,4 м³, максимальний тиск 150 бар; об'єм п'єзометра — 15 л; тиск калібрування від 10 до 50 бар.

Разом зі створенням первинного еталона, основними функціями якого є відтворення розмірів одиниць об'єму та об'ємної витрати різних газів під

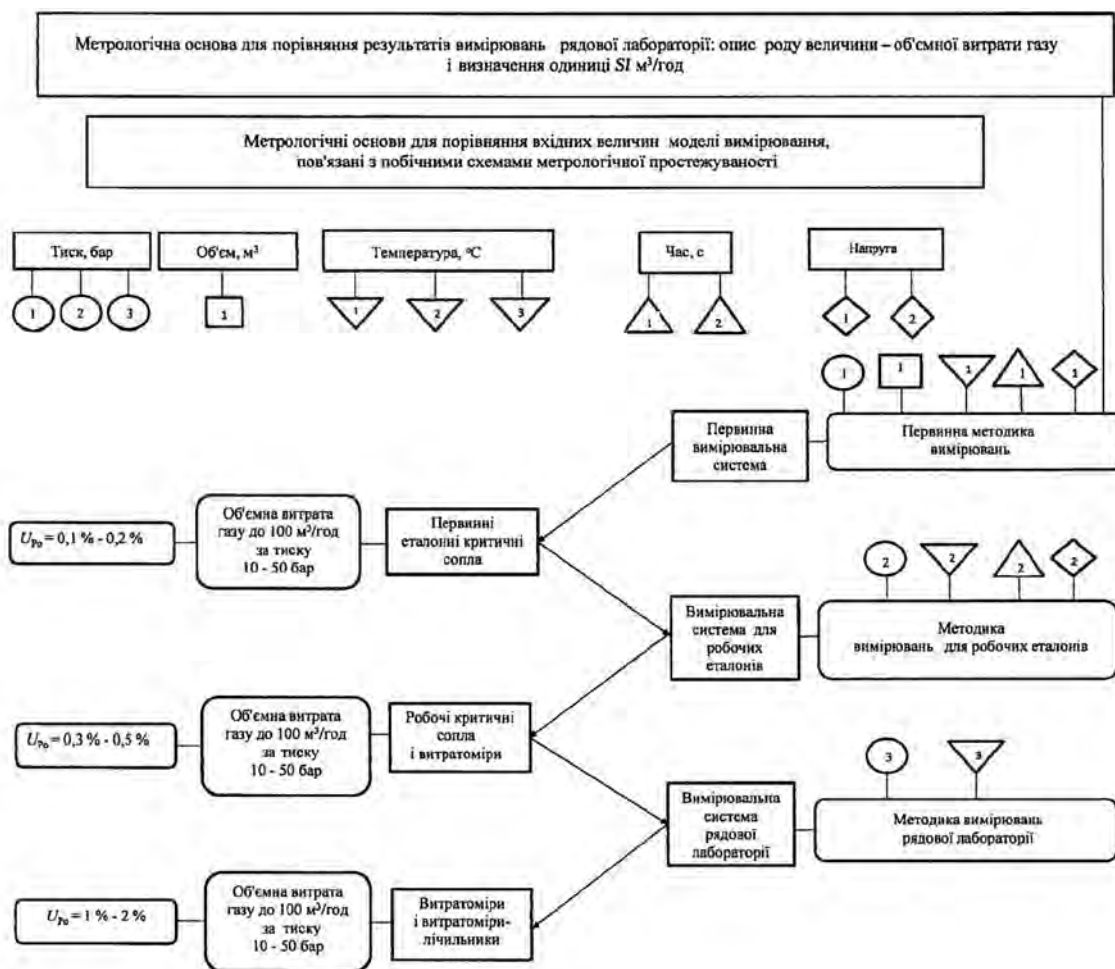


Рис. 10. Проект ланцюга метрологічної простежуваності результатів вимірювань об'ємної витрати газу за тиску від 1 МПа до 5 МПа

Fig. 10. Draft metrological traceability chain for the measurements of the gas volume flow rate at pressures from 1 MPa to 5 MPa

високим тиском, забезпечення простежуваності результатів вимірювання об'єму і об'ємної витрати газу до основних одиниць системи SI та калібрування критичних сопел Вентурі, потрібно створити робочі еталони одиниць об'єму та об'ємної витрати газу за високих тисків для діапазонів від 100 м³/год і до 6000 м³/год. Це завдання має, зокрема, і комерційний характер, оскільки на сьогодні в Україні немає робочих еталонів такого типу.

Побудова сучасної системи метрологічної простежуваності результатів вимірювань витрати газів за тиску від 1 МПа до 5 МПа дасть можливість застосувати витратоміри та лічильники для комерційного обліку газів та природного газу згідно з вимогами [2] та метрологічними характеристиками, заявленими виробниками. Проект ланцюга метрологічної простежуваності у виді послідовності еталонів і калібрувань, через які пов'язують результат вимірювання з первинним еталоном одиниці об'ємної витрати, забезпечить функціонування системи передавання розміру одиниці на основі метрологічної про-

стежуваності результатів вимірювань (рис. 10) [19]. Первинні критичні сопла Вентурі, відкалібровані на первинних еталонах PVTt, застосовують, для калібрування робочих еталонних сопел та робочих еталонних витратомірів, які, у свою чергу, застосовують у робочих еталонах для калібрування робочих витратомірів. У ланцюгу метрологічної простежуваності еталонами є критичні сопла, метрологічні характеристики яких встановлюють калібруванням за допомогою первинного еталона PVTt.

На рис. 11 показано також проект ієрархічної схеми для засобів вимірювань об'ємної витрати газів за тиску від 1 МПа до 5 МПа [20].

Метрологічні інститути PTB (ФРН), NIST (США) і LNE-LADG (Франція) провели звірення первинних еталонів витрати газу на повітрі та природному газі в діапазоні тиску від 0,9 бар до 42 бар за допомогою чотирьох критичних сопел Вентурі.

Результати вимірювань витрати повітря і природного газу за допомогою сопел узгоджувалися у межах 0,05 % і засвідчили, що критичні сопла, відкалібровані

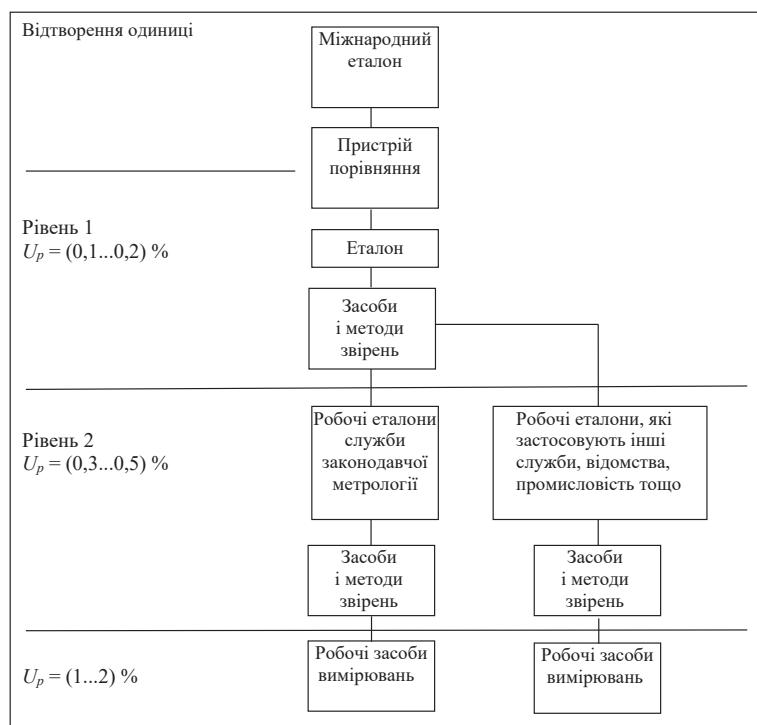


Рис. 11 Проект ієрархічної схеми для засобів вимірювань об'ємної витрати газів за тиску від 1 МПа до 5 МПа

Fig. 11 Draft hierarchical scheme for the instruments measuring gas flow rate at pressures from 1 MPa to 5 MPa

за повітрям як первинні еталонні сопла, можна застосовувати як робочі еталонні сопла на природному газі з невизначеністю, меншою від 0,2 %, за умови, що властивості газу відомі з достатньою точністю. Це відкриває широкі можливості для розвитку системи забезпечення єдності вимірювань витрати природного газу в Україні за тиску до 50 бар.

100 м³/год до 6000 м³/год, що дасть можливість вийти на загальний європейський рівень забезпечення єдності вимірювань витрати газів за тиску до 50 бар.

Порядок роботи на еталоні та послідовність розрахунку всіх складників невизначеності еталона буде описано в наступній статті.


ВИСНОВКИ

Первинний еталон одиниць об'єму та об'ємної витрати газів, заснований на відтворенні одиниць за методом PVTt та передаванні розміру одиниць за допомогою критичних сопел Вентури у діапазоні тиску від 1 МПа до 5 МПа, в Україні створено вперше.

Науково-технічний рівень розробленого еталона відповідає сучасним досягненням національної та світової науки й техніки. Застосування створеного еталона забезпечить простежуваність результатів вимірювань об'єму та об'ємної витрати газів за високого тиску до основних одиниць у діапазоні витрати до 100 м³/год та калібрування первинних еталонних сопел з діаметром горловини від 0,1 мм до 3 мм. Розроблені пристрої та засоби можна використати для створення установок для калібрування робочих еталонних сопел з діаметром горловини до 13 мм та робочих витратомірів з діапазоном витрати від

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. ДСТУ 3383:2015 Державна повірочна схема для засобів вимірювань об'єму та об'ємної витрати газу (DSTU 3383:2015 State verification chart for the instruments measuring gas volume and volume flow rate).
2. International Recommendation OIML 140 Measuring systems for gaseous fuel. Edition 2007 (E).
3. Власюк Я.М., Коробко І.В., Розвиток і становлення ефективних систем обліку і контролю якості природного газу. Нафтогазова галузь України, (Vlasiuk Ya.M., Korobko I.V., Development and establishment of the effective systems for the natural gas accounting and quality control. Naftogazova galuz' Ukrainy). №2/2019, c/p. 36—41.
4. ISO 9300:2005 Measurement of gas flow by means of critical flow Venturi nozzles.
5. Aaron N. Johnson and John D. Wright, NIST, Gas Flowmeter Calibrations with the 26 m³ PVTt Standard, NIST Special Publication 250-1046, November 25, 2009
6. John D. Wright, Aaron N. Johnson and Michael R. Moldover, Design and Uncertainty Analysis for a PVTt Gas Flow Standard, Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, Volume 108, 21—47, Number 1, January-February, 2003.
7. LNE-LADG Alfortville, Gaz de France, Research and development division, Metrology and network Equipment Centre, 2005.
8. J.P.Vallet, C.Windenberger, P.Kewesan, G. Miault, P. Manrot, The conception and the construction of a new High Pressure Primary Facility for Gas, Cesame Exadebit SA LNE Ladg, 2008, France.
9. R. Mascomani, C.B. Suresh and V.Jayaraman, Calibration of Critical Flow Venturi Nozzles Using PVTt Method, Fluid Control Research Institute, Kharagpur, India, December, 15—17, 1999.
10. Ching-Yi Kuo, Wi-Lin Ho, Wen-Ti Lin and Chun-Min Su, A New PVTt Primary Gas Flow Standard at CMS. 9th ISFFM, Arlington, Virginia, April 14 to 17, 2015. Center for Measurement, Industrial Technology Research Institute, Taiwan.

11. Shin-ichi Nakao, Masaki Takamoto, A Study on the Conversion Factor of Sonic Venturi Nozzles. Proc. 2001 NCSL International Workshop & Symposium, 2001.
12. Yi Zhou, The introduction of the Multipurpose PVTt Gas Flow Facility, China, Jiangsu province quality and technical supervision gas flow measurement test center
13. І.С. Петришин, П.Я. Джочко, Т.І. Присяжнюк, В.А. Бас. Технічні аспекти створення еталонної бази для метрологічного забезпечення лічильників газу в експлуатації. Український метрологічний журнал, (I.S. Petryshyn, P.Ya. Dzhochko, T.I. Prysiazhniuk, V.A. Bass. Technical aspects of creating a measurement standards base for metrological support of the gas meters in operation. Ukrainskyi metrologhichnyi zhurnal) 2013, №1, с/р. 50—55.
14. M.Uhrig, P.Schley, M.Jaeseheke, D.Vieth, K. Altfeld, I. Kraycin. High-precision measurement and calibration technology as a basis for correct gas billing. E.ON. Ruhzgas AG, 45326 Essen, Germany, 23rd World Gas Conference, Amsterdam, 2006.
15. Sesames Piston Prover test bench for flow calibration. Associated Laboratory for Gas Flow Measurement, 2005.
16. В.М. Красавин, С.В. Раинчик, В.П. Ившин, А.В. Красавин, И.А. Быков, С.С. Лобарев. Исходная эталонная установка государственного первичного эталона единиц объемного и массового расходов газа ГЭТ 118-2006. Процедура калибровки критических сопел. Вестник Казанского технологического университета (V.M. Krasavin, S.V. Rainchik, V.P. Ivshin, A.V. Krasavin, I.A. Bykov, S.S. Lobarev. The reference standard installation of the State Primary Standard of Units of Volume and Mass Gas Flow Rates GET 118-2006. Critical nozzles calibration procedure. Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta) 2013, т.16, № 10, с/р. 285—288.
17. І. Петришин, І. Присяжнюк, О.Бас. Впливні фактори конструктивних особливостей поршневих еталонних витратомірних установок, що працюють за високого тиску. Метрологія та прилади (I. Petryshyn, I. Prysiazhniuk, O. Bass. Influence factors of the design features of the piston standard flow-rate measuring installations operating at high pressure. Metrologia ta prylady) № 5, 2013, с/р. 6—16.
18. PTB and officially-recognized testing Facilities as a key factor in ensuring of correct natural gas flow measurement. Dr. Bodo Mickan, PTB Department 1.4, Working Group 1.43, High Pressure Gas, 2017.
19. Paul De Bievre, Rene Dybkaer, Ales Faigelj and D.Brynn Hibbert, Metrological traceability of measurement results in chemistry: concepts and implementation (IUPAC Technical Report), Pure Appl. Chem. Vol 83, No 10 pp. 1873—1935, 2011.
20. ДСТУ OIML D5:2007 Правила розроблення ієрархічних схем для засобів вимірювань (DSTU OIML D5:2007 Principles for the establishment of hierarchy schemes for measuring instruments). 

Отримано / received: 18.03.2020.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. С.П. Войтенком (Україна).
Prof. S.P. Voitenko, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.

DOI: 10.33955/2307-2180(2)2020.13-21

УДК 621.318.25(088.8)

АВТОМАТИЗОВАНА УСТАНОВКА ДЛЯ НАМАГНІЧУВАННЯ ВИСОКО- КОЕРЦИТИВНИХ МАГНІТІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРИВОДІВ

Automated Unit for Magnetization of Strong Magnets of Electromagnetic Drives

CC BY-SA

М. М. Сіренко, кандидат технічних наук,
професор кафедри комп'ютерних та
радіоелектронних систем контролю та діагностики,
e-mail: sirnn2@gmail.com

Б. М. Горкунов, доктор технічних наук,
професор кафедри інформаційно-вимірвальних
технологій і систем,
e-mail: b.gorkunov51@gmail.com

С. Г. Львов, кандидат технічних наук,
професор кафедри,
e-mail: sgl8ntu@gmail.com

В. В. Лисенко, доцент кафедри,
e-mail: v.v.lysenko.111@gmail.com
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут», Україна

M. M. Sirenko, candidate of technical sciences,
professor of the computer and radio-electronic systems
for testing and diagnostics department,
e-mail: sirnn2@gmail.com

B. M. Gorkunov, doctor of technical sciences,
professor of the information and measuring technologies
and systems department,
e-mail: b.gorkunov51@gmail.com

S. G. Lvov, candidate of technical sciences,
professor of the department,
e-mail: sgl8ntu@gmail.com

V. V. Lysenko, docent of the department,
e-mail: v.v.lysenko.111@gmail.com
National Technical University
«Kharkiv Polytechnic Institute», Ukraine

Статтю присвячено актуальній темі розроблення ав-
томатизованої установки з оптимальними енергетичними
і масо-габаритними параметрами для якісного намагнічуван-
ня магнітів електромагнітних приводів зі збереженням ціліс-
ності їх обмоток.

Розроблено методику розрахунку амплітуди і тривалості
імпульсу намагнічування. Визначено час наростання його
переднього фронту, який задовольняє умовам повного промаг-
нічування магнітопроводу привода та збереження при цьому
цілісності його обмотки збудження.

Для формування імпульсу із заданими параметрами за-
пропоновано електронний пристрій на основі зворотного
зв'язку між обмоткою привода й імпульсним джерелом стру-
му обмотки індуктора.

Запропоновано методику синтезу магнітної системи ін-
дуктора за критеріями: досягнення заданої напруженості маг-
нітного поля в робочому об'ємі індуктора; мінімальні габари-
ти джерела живлення і його споживана енергія за намагнічуван-
ня. Її результатом є отримання профілю перерізу каркаса ін-
дуктора з конкретними розмірами і числом витків обмотки.

На основі комплексу отриманих результатів у роботі
розроблено схему автоматизованої установки і запропоно-
вано компоновку пульту управління і контролю необхідними
пристроями та елементами.

The paper is about the development of an automated unit with
optimum energy and mass-dimensional parameters for high-quality
magnetization of magnets of electromagnetic drives, while preserv-
ing the integrity of their windings.

The authors develop an approach for calculating amplitude and
width of magnetization pulse. The authors then estimate the rise
time of leading edge of the pulse, with respect to conditions of com-
plete magnetization of the electromagnetic drive's magnetic con-
ductor and preservation of its excitation winding integrity.

For the formation of the magnetization pulse with given param-
eters, the authors propose an electronic device, which feedbacks
between the drive winding and the pulse current source, which pro-
vides power to the inductor winding.

The authors propose a method of the inductor magnetic sys-
tem synthesis by criteria of: given magnetic field strength in induc-
tor's operating volume; power supply unit minimal dimensions and it
power consumption while magnetizing. The final result is obtaining
cross-section profile of the inductor electrical coil with certain dimen-
sions and number of winding's turns of a wire of certain diameter.

In order to optimize the mass, size, magnetic and energy param-
eters of the inductor, the authors solve a problem of synthesizing
its magnetic system in way of calculating the parameters of the
magnetic field for operating volume of the inductor. It is determined
by the characteristic overall dimensions of the NZTB type electro-
magnetic drives (brakes, 0.2 m in diameter), which were subject to
magnetization in a field with strength of at least 400 A/m. The re-
sult is the determination of geometrical parameters and the cross-
section profile of the inductor electrical coil. This profile ensures the
uniformity of the magnetic field when magnetizing the electromag-
netic drive of given overall dimensions.

On the basis of all these results, the authors develop the func-
tional scheme of the automated unit and propose a structure of a pa-
nel for monitoring and management of devices and units involved.

Ключові слова: електромагнітні приводи, намагнічування, індуктор, магнітопровід, магнітна система, імпульс намагнічування, автоматизована установка.

Keywords: electromagnetic drives, magnetization, inductor, magnetic conductor, magnetic system, magnetization impulse, automated unit.

ВСТУП

Електромагнітні приводи (гальма, муфти) постійного струму отримали широке застосування в електродвигунах та механізмах промислового призначення, що працюють в режимі частих зупинок або вимагають точного позиціонування, а також для забезпечення вимог безпеки та запобігання аваріям. Вони зазвичай мають дискову конструкцію. До неї входить корпус, магнітопровід (обойма постійного магніту) з обмоткою (котушкою) збудження, призначенням якої за живлення її постійним струмом є створення у магнітопроводі електромагнітного поля протидії постійному полю магніту.

Основною проблемою в технології виготовлення приводів є намагнічування їх висококоерцитивних магнітів у зборі з магнітопроводом і котушкою збудження без порушення цілісності її обмотки. Традиційні методи й установки намагнічування таких виробів (магнетизери) змушують намагнічувати окремо магніт (або його частини), а потім скласти магніт з магнітопроводом у єдиний цілий виріб, що потребує створення особливих «чистих» умов складання, застосування немагнітного інструменту і значно ускладнює та затягує у часі технологічний процес їх виготовлення. Спроби намагнічувати привід з магнітом у зборі в сильному магнітному полі з напруженістю до 400 кА/м можуть внаслідок самоіндукції призвести до пробію ізоляції дроту його обмотки.

Тому актуальним практичним завданням стає розроблення автоматизованої установки для намагнічування висококоерцитивних магнітів приводів у зборі без порушення цілісності їх обмоток збудження. Для його виконання спочатку розглянемо більш детально методи й установки для намагнічування висококоерцитивних магнітів у складі електромагнітних приводів (гальм).

АНАЛІЗ НАЯВНИХ МЕТОДІВ, ТЕХНОЛОГІЙ І УСТАНОВОК НАМАГНІЧУВАННЯ

Відомі методи намагнічування магнітотвердих матеріалів у постійних, змінних та імпульсних магнітних полях [1—5].

За намагнічування постійним полем у виробі створюють поле з напруженістю, достатньою для насичення матеріалу. Перевагами такого способу є повне промагнічування виробу і відсутність впливу вихрових струмів. Однак цей спосіб дозволяє намагнічувати лише малогабаритні деталі або їх окремі ділянки і є найбільш енергоємним.

За намагнічування у змінних полях необхідно забезпечити вимикання струму індуктора в момент

досягнення ним амплітудного значення, що є складним технічним завданням. Тому вирішують цю проблему двома шляхами: проводять багаторазове намагнічування, з вимиканням поля у випадковий момент часу і подальшою оцінкою ступеня намагніченості, або застосовують електронний ключ, що вимикає живлення індуктора в потрібну мить.

Імпульсний метод намагнічування поєднує переваги намагнічування постійним і змінним полями, хоча технічно він складний. Найчастіше намагнічування здійснюється імпульсом струму в результаті розряду конденсатора великої ємності. Потрібно мати на увазі, що, внаслідок впливу вихрових струмів під час дії імпульсу, намагнічування різних областей перерізу деталі відбувається неоднаково. Тому тривалість і амплітуда імпульсу напруженості магнітного поля повинні бути обрані такими, щоби за мінімальних енергетичних витрат і високої продуктивності забезпечити технічне насичення матеріалу. Завдяки відсутності магнітопроводу імпульсні установки мають відносно невелику масу і є більш економічними ніж магнетизери з тривалим намагнічуванням.

Магнетизери залежно від призначення відрізняються між собою конструкцією, розмірами, конфігурацією зони намагнічування, амплітудним значенням індукції магнітного поля в ній і поділяються на дві групи: з накопичувачами енергії і без них. Їх конструкція визначається маркою магнітів і формою виробів, у яких ці магніти застосовуються. Для намагнічування виробів з магнітами із фериту барію, стронцію або легованими рідкоземельними металами застосовуються магнетизери, які дозволяють отримувати поле з амплітудою магнітної індукції до 1 Тл у зоні намагнічування.

За серійного виробництва приводів здійснюється, як правило, намагнічування магнітів окремо від магнітних систем, складовими яких вони є. Також відома технологія намагнічування лише окремих частин (секторів) магніту, із яких потім складається магніт за допомогою обойми (магнітопроводу). Для цих операцій застосовуються установки з магнітопроводами (пермеетри), в яких створюється постійне магнітне поле з напруженістю від 240 кА/м до 400 кА/м залежно від матеріалу об'єкта намагнічування [1—5], яке забезпечує повне промагнічування перерізу магніту. Але така технологія має суттєві недоліки. Насамперед, це труднощі складання постійного магніту із окремих секторів у обоймі, оскільки вони притягують найдрібніші феромагнітні частинки і у такий спосіб можуть утворюватися повітряні зазори між секторами, що значно

послаблює силові характеристики поля, яке створює магніт. Також ця технологія характеризується низькою продуктивністю.

З іншого боку, для намагнічування магнітів найпоширеніших діаметрів (0,1—0,2) м потрібні спеціальні високоенергоємні установки, які мають достатньо великі масо-габаритні параметри, що різко збільшуються за збільшення розмірів об'єкта намагнічування. Окрім цього, ця технологія не дозволяє намагнічувати привід у зборі, оскільки в полях з таким значенням напруженості на затискачах обмотки приводу виникає напруга, яка перевищує допустиме значення напруги пробою ізоляції дроту обмотки і призводить до порушення її цілісності.

Ще одна технологія намагнічування заснована на використанні установок, які створюють імпульсне магнітне поле [1—5] достатньо малої тривалості імпульсу, яка обмежена енергетичними характеристиками обладнання (зазвичай ємнісних накопичувачів). Але, як відомо [2], імпульсне магнітне поле «згасає» у магнітопроводі й внаслідок поверхневого ефекту не забезпечує повного промагнічування матеріалу магніту. Окрім цього, короткотривалий імпульс намагнічування призводить до різкого зростання напруженості поля в індукторі, що не дозволяє намагнічувати привід у зборі разом з обмоткою без порушення її цілісності.

Технологія намагнічування достатньо габаритних магнітів на основі застосування відносно довготривалого імпульсу установками на базі розряду конденсаторної батареї застосовується, наприклад, в імпульсних установках світового лідера виробництва магнетизерів фірми *MAGNET-PHYSIK Dr. Steingroever GmbH* (Німеччина) [6]. Але подібні магнетизери не дозволяють намагнічувати приводи у зборі й характеризуються значними енергетичними витратами, достатньо великими габаритами, пов'язаними з використанням достатньо великої кількості конденсаторів. Дійсно, якщо навіть прийняти тривалість переднього фронту імпульсу розряду конденсаторної батареї близько 0,8 с за вказаних значень напруженості поля в індукторі, то розрахунки, з використанням результатів роботи [7], свідчать, що час затухання магнітного поля складе 3,7 с, а тривалість всього імпульсу — 4,5 с. Звідси випливає, що за заданої напруженості поля потрібен достатньо великий заряд для створення необхідного струму намагнічування в обмотці індуктора. А це, в свою чергу, потребує відповідної достатньо великої ємності конденсаторної батареї й значної напруги на ній. Для характерних параметрів індуктора (діаметр робочого об'єму 0,2 м; число витків обмотки 2000 мідним д्रो-

том з перерізом 10 мм²) значення опору дроту цієї котушки складе 2,2 Ом, а її індуктивності — 3,5 Гн. За застосування оптимального режиму розряду [7] величина ємності конденсаторної батареї складе 2,9 Ф. За значення струму розряду 125 А, який забезпечить мінімально задане значення напруженості поля в індукторі, буде потрібна мінімальна напруга на конденсаторній батареї близько 375 В. Якщо використати як накопичувач електричної енергії конденсатори типу К50-3И 400 В 500 мкФ, то для створення батареї конденсаторів їх буде потрібно 5800 штук.

Ще одна проблема подібних магнетизерів пов'язана з тим, що значна частина енергії довготривалих магнітних імпульсів перетворюється в теплову енергію нагрівання індуктора з виробом. Тому, для підвищення продуктивності намагнічування, необхідно обмежити втрати енергії внаслідок зменшення тривалості циклу намагнічування і примусового охолодження індуктора. Отже, до тривалості імпульсу пред'являються достатньо жорсткі вимоги.

Як засвідчив аналіз відомих методів і промислових установок для намагнічування постійних магнітів, для кожного конкретного виробу і кожної марки магнітного матеріалу потрібно розробляти окремий магнетизер. Для цього потрібні універсальні методики синтезу магнітних систем таких установок. За їх проектування доцільно використовувати переваги технологій намагнічування постійним й імпульсним полями. Щоби рівномірно намагнітити переріз магніту приводу в зборі з обмоткою без порушення її цілісності, потрібно використати метод імпульсного магнітного поля з керованими параметрами (тривалістю і амплітудою) і нахилом переднього фронту. Таке поле можна створити шляхом керованої за заданим законом зміни напруги живлення в обмотці індуктора з виробом.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ РОЗРОБЛЕННЯ

Для створення установки з оптимальними енергетичними і масо-габаритними параметрами для якісного намагнічування магнітів приводів із збереженням цілісності їх обмоток потрібно вирішити ряд задач. По-перше, необхідно розробити методику розрахунку параметрів імпульсу намагнічування із заданими параметрами. По-друге, для формування такого імпульсу потрібно запропонувати схему відповідного автоматичного пристрою. Також для забезпечення рівномірності магнітного поля у робочому об'ємі індуктора необхідно розробити методику синтезу магнітної системи індуктора, яка базується на розрахунку геометричних параметрів його

профілю. Для контролю якості намагнічування магніту і цілісності обмотки приводу потрібно запропонувати відповідний пристрій. Завершальним етапом є розроблення загальної функціональної схеми автоматизованої установки.

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ ІМПУЛЬСУ НАМАГНІЧУВАННЯ

Тривалість і амплітуда імпульсу намагнічувального струму в обмотці індуктора повинні задовольняти двом умовам.

По-перше, це забезпечення повного промагнічування магнітних елементів приводу в зборі. Це означає, що еквівалентна глибина δ проникнення магнітного поля у феромагнітний об'єкт (магніт з магнітопроводом приводу) повинна бути не менше характерного поперечного розміру a цього об'єкта (наприклад, радіальної ширини дискового магнітопроводу):

$$\delta \geq a \quad (1)$$

По-друге, в процесі намагнічування напруга E на затискачах обмотки збудження приводу повинна бути менше значення $E_{\text{пр}}$ напруги пробою її ізоляції:

$$E < E_{\text{пр}}. \quad (2)$$

Тривалість t переднього фронту імпульсу намагнічування потрібно попередньо розраховувати для конкретних типів електромагнітних приводів з урахуванням їх електромагнітних (магнітної проникності μ_r та питомої електропровідності σ) та геометричних (радіальної ширини, товщини тощо) параметрів. При цьому вона повинна бути не меншою від часу, необхідного для повного промагнічування магнітних елементів приводу.

Відомо [2], що за аперіодичного намагнічування еквівалентна глибина δ розраховується за формулою:

$$\delta = 2 \sqrt{\frac{t}{\pi \mu_0 \mu_r \sigma}}, \quad (3)$$

де μ_0 — магнітна константа, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Звідси можна отримати формулу для визначення часу t :

$$t = \frac{\delta^2 \pi \mu_0 \mu_r \sigma}{4}. \quad (4)$$

З урахуванням умови (1) це співвідношення можна представити у вигляді:

$$t = a^2 \pi^2 \mu_r \sigma \cdot 10^{-7}. \quad (5)$$

З іншого боку, напруга E , яка наводиться в обмотці збудження приводу з числом витків W під час його імпульсного намагнічування, за законом електромагнітної індукції [1—3] буде визначатися за формулою:

$$E = -W (\Delta\Phi/\Delta t), \quad (6)$$

де $\Delta\Phi/\Delta t$ — приріст магнітного потоку в об'єкті за час Δt наростання переднього фронту імпульсу намагнічування.

Ураховуючи, що $t = \Delta t$, тривалість імпульсу можна розрахувати, як

$$t = (W\Delta\Phi)/E. \quad (7)$$

Потрібно відзначити, що для виконання умови (2) зручно визначити допустиме значення $E_{\text{доп}}$ напруги на затискачах обмотки збудження приводу, яке не повинно перевищуватися поточними значеннями напруги E під час намагнічування. Тоді умову (2) можна переписати у вигляді:

$$E \leq E_{\text{доп}} < E_{\text{пр}}. \quad (8)$$

Величину зміни магнітного потоку $\Delta\Phi$ можна представити у вигляді [1—3]:

$$\Delta\Phi = \mu_0 \mu_r \Delta H S, \quad (9)$$

де ΔH — приріст напруженості магнітного поля в індукторі за час Δt ;

S — площа перерізу магнітопроводу електромагнітного приводу.

Тоді на основі формул (7)—(9) час t можна розрахувати за формулою:

$$t = \frac{W \mu_0 \mu_r \Delta H S}{E_{\text{доп}}}. \quad (10)$$

Отже, за формулами (5) та (10) можна визначити час наростання переднього фронту імпульсу намагнічування, який повинен задовольняти двом умовам: повному промагнічуванню магнітопроводу електромагнітного приводу (5) та збереженню при цьому цілісності його обмотки збудження (10). За порівняння двох отриманих значень обирається найбільше.

Потрібно зазначити, що попередньо можна розрахувати очікуване значення напруги $E_{\text{доп}}$, яке потім порівнюється із довідковим значенням $E_{\text{пр}}$ на виконання умови (8). Для цього потрібно скористатися відомими (або заданими) магнітними та геометричними параметрами приводу та формулою, отриманою із виразів (5) і (10):

$$E_{\text{доп}} = \frac{4W\Delta H S}{a^2 \pi \sigma}. \quad (11)$$

Під час проектування установки для намагнічування електромагнітних гальм типу НЗТБ13-13 були проведені такі розрахунки. Дисковий магнітопровід цього виробу виконаний зі сталі 10 ($\mu_r = 100$, $\sigma = 6$ МСм/м) з радіальною шириною $a = 37,5 \cdot 10^{-3}$ м, площею перерізу $S = 5,5 \cdot 10^{-4}$ м² і числом витків $W = 900$ обмотки збудження. Було прийнято значення зміни напруженості поля $\Delta H = 400$ кА/м, що відповідає технології виготовлення постійних магнітів із магнітотвердих матеріалів типу 28СА250, і значення напруги $E_{\text{доп}} = 500$ В, яке дорівнювало напрузі зі пробою ізоляції дроту обмотки гальм НЗТБ13-13.

Спочатку за формулою (5) було розраховано значення $t = 830$ мс, а потім за виразом (10) отримано значення $t = 50$ мс. Очевидно, щоби виконати умову повного промагнічування магнітної системи привода, необхідно обрати найбільше значення тривалості імпульсу, тобто 830 мс.

Користуючись формулою (11), було розраховано очікуване значення напруги на затискачах обмотки збудження привода за його намагнічування у полі з напруженістю 400 кА/м, яке склало лише 30 В, що значно менше допустимого значення напруги 500 В пробною ізоляції дроту обмотки і гарантує цілісність обмотки.

БЛОК ФОРМУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ІМПУЛЬСУ НАМАГНІЧУВАННЯ

Для формування імпульсу намагнічування із заданими параметрами пропонується електронний пристрій [8], який здійснює зворотний зв'язок між обмоткою 7 привода й імпульсним джерелом струму 1, що забезпечує живлення обмотки індуктора 2 (рис. 1).

При цьому залежно від рівня сигналу E на затискачах обмотки 7 привода за допомогою цього пристрою формуються параметри імпульсного сигналу намагнічування в обмотці індуктора 2, який виробляє кероване джерело 1. До складу електронного пристрою входять амплітудний детектор 4 сигналу на затискачах обмотки 7 привода, формувач допустимої напруги 5, компаратор напруги 6 та програмований регулятор напруги 3 (рис. 1).

Уведення до схеми установки програмованого регулятора напруги зумовлено необхідністю формування сигналу управління імпульсним джерелом струму 1, яке, в свою чергу, повинно сформувати імпульс струму намагнічування із заданою амплітудою і тривалістю t переднього фронту. Цей імпульс струму з джерела 1 подається на обмотку індуктора 2 для створення в ньому магнітного поля із заданими па-

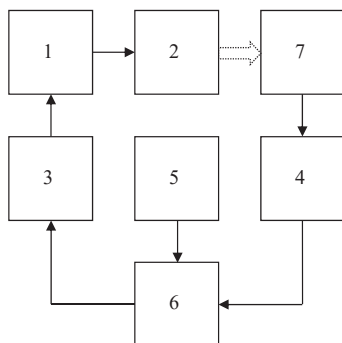


Рис. 1. Функціональна схема блоку формування параметрів імпульсу намагнічування
Fig. 1. Functional diagram of the block of formation of magnetization pulse parameters

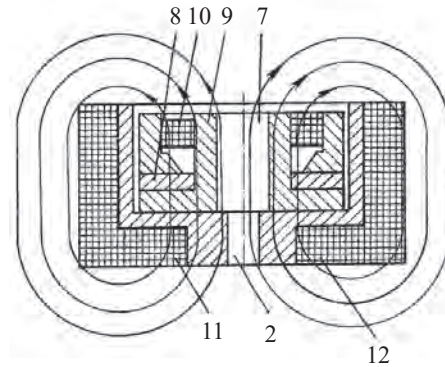


Рис. 2. Розміщення привода в зборі у внутрішній порожнині індуктора
Fig. 2. Arrangement of the drive assembly in the internal cavity of the inductor

раметрами. Тому вихід регулятора 3 напруги підключений до імпульсного джерела струму 1, а його вхід з'єднаний з виходом компаратора 6.

На рис. 2 (у перерізі) показано приклад розміщення привода 7 в зборі з висококоерцитивним магнітом 8, магнітопроводом 9 і обмоткою збудження 10 у внутрішній порожнині каркаса 11 обмотки 12 індуктора 2.

У процесі намагнічування матеріалу магніту 8 здійснюється індуктивний зв'язок між обмотками 12 індуктора і 10 привода, внаслідок якого на затискачах обмотки 10 наводиться електрорушійна сила E , перевищення допустимого значення якої призводить до порушення цілісності цієї обмотки [8].

Протягом наростання переднього фронту імпульсу намагнічування сигнали, пропорційні миттєвим значенням напруги E_i , постійно подаються на вхід амплітудного детектора 4 (рис. 1). Далі їх потрібно порівнювати зі сигналом $E_{\text{доп}}$, який утворює формувач допустимої напруги 5 з урахуванням умови (8). Ця операція здійснюється компаратором напруги 6, на входи якого подаються відповідні сигнали з детектора 4 і формувача 5. У разі появи аварійної умови $E > E_{\text{доп}}$ з компаратора 6 подається відповідний сигнал на регулятор напруги 3, який, в свою чергу, формує сигнал управління імпульсним джерелом струму 1. Це кероване джерело зменшує нахил переднього фронту імпульсу намагнічування до моменту, коли значення напруги E_i на затискачах обмотки привода не перевищує значення сигналу $E_{\text{доп}}$ з формувача 5. У такий спосіб здійснюється процес автоматичного формування допустимих значень амплітуди і тривалості імпульсу намагнічування.

МЕТОДИКА СИНТЕЗУ МАГНІТНОЇ СИСТЕМИ ІНДУКТОРА

Кінцевим результатом цієї методики є отримання профілю перерізу каркаса індуктора з конкретними

геометричними розмірами і числом витків обмотки, нанесеної дротом визначеної площі перетину. Розрахунки проводяться для конкретних типів електромагнітних приводів, що випускаються серійно, з відомими електромагнітними і геометричними параметрами. Така методика повинна синтезувати магнітну систему індуктора за такими параметрами: досягнення заданої напруженості магнітного поля в робочому об'ємі індуктора (наприклад, 400 А/м); мінімальні габарити джерела живлення обмотки індуктора; мінімальна споживана енергія за намагнічування.

Спочатку потрібно розглянути теоретичну картину розподілу магнітного поля в робочому об'ємі індуктора з урахуванням принципу суперпозиції магнітних полів, які утворюються струмом кругових витків обмотки з радіусом a . Для цього скористуємось результатами роботи [9] і виберемо початок циліндричної системи координат r, φ, z у центрі кола. При цьому кут φ відраховується від площини, яка проходить через вісь z і точку спостереження характеристик магнітного поля (координату r). Векторний потенціал має тільки компоненту $A_\varphi = A(r, z)$. Тому цю компоненту обчислимо із формули [9]:

$$A_\varphi = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \oint \frac{\cos \varphi dl}{R} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \int_0^\pi \frac{a \cos \varphi d\varphi}{(a^2 + r^2 + z^2 - 2ar \cos \varphi)^{3/2}}, \quad (12)$$

де I — струм у круговому витку;

dl — елементарна довжина витка обмотки індуктора;

R — радіус витка обмотки.

Якщо ввести змінну Θ , яка пов'язана з кутом φ рівнянням

$$\varphi = \pi + 2\Theta, \quad (13)$$

то формулу (12) можна привести до виразу

$$A_\varphi = \frac{\mu_0 I}{\pi k} \sqrt{\frac{a}{r}} \left[\left(1 - \frac{k^2}{2}\right) K - E \right], \quad (14)$$

де

$$k^2 = \frac{4ar}{(a+r)^2 + z^2}, \quad (15)$$

а K та E — повні еліптичні інтеграли 1-го і 2-го роду, причому

$$K = \int_0^{\pi/2} \frac{d\Theta}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \Theta}}, \quad (16)$$

$$E = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \Theta} d\Theta. \quad (17)$$

Потрібно відзначити, що значення повних еліптичних інтегралів K та E протабульовані у довіднику [10].

Також визначимо компоненти індукції B у циліндричній системі координат [9]:

$$B_\varphi = 0, \quad (18)$$

$$B_r = -\frac{dA_\varphi}{dz} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \cdot \frac{2z}{r\sqrt{(a+r)^2 + z^2}} \left[-K + \frac{a^2 + r^2 + z^2}{(a-r)^2 + z^2} E \right], \quad (19)$$

$$B_z = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} (rA_\varphi) = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{(a+r)^2 + z^2}} \left[K + \frac{a^2 - r^2 - z^2}{(a-r)^2 + z^2} E \right]. \quad (20)$$

Потрібно також відзначити, що розподіл магнітного поля вздовж осі кругового витка розраховується за відносно простою формулою, яку можна отримати з виразів (19) та (20) за умови, що радіус витка r і компонента B_r у цьому випадку дорівнюють 0. Тоді компонента B_z буде дорівнювати

$$B_z = \frac{\mu_0 I a^2}{2(a^2 + z^2)^{3/2}}. \quad (21)$$

Скориставшись отриманими результатами, з метою оптимізації маси, габаритних, магнітних і енергетичних параметрів індуктора, була вирішена задача синтезу його магнітної системи шляхом розрахунків параметрів магнітного поля для робочого об'єму індуктора. Він визначався характерними габаритними розмірами електромагнітних приводів (гальм) типу НЗТБ (діаметр 0,2 м), які підлягали намагнічуванню у полі з напруженістю, не меншою від 400 А/м. Результатом стало визначення геометричних параметрів і профілю перерізу електричної котушки індуктора (рис. 3). Такий профіль забезпечує рівномірність магнітного поля за намагнічування електромагнітного привода заданих габаритних розмірів.

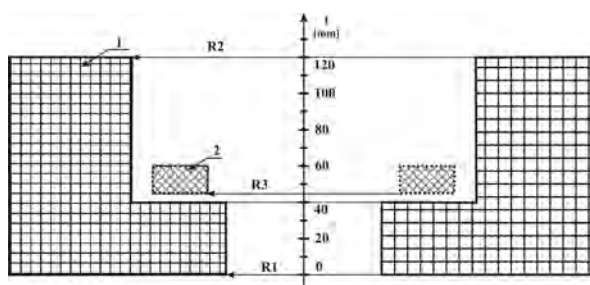


Рис. 3. Профіль перерізу електричної котушки індуктора ($R1$ — внутрішній радіус першої секції, $R2$ — внутрішній радіус другої секції, 1 — намагнічувальна обмотка, 2 — зона 15x30 мм розміщення магніту, $R3$ — внутрішній радіус магніту)

Fig. 3. Cross-section profile of the inductor electrical coil ($R1$ — inner radius of the first section, $R2$ — inner radius of the second section, 1 — magnetizing coil, 2 — 15x30 mm area of magnet arrangement, $R3$ — inner radius of the magnet)

Також були визначені число витків обмотки індуктора (2600), максимальне значення струму намагнічування від трифазної мережі (40 А) та максимальна електрична потужність в імпульсі (18 кВт). Виходячи з цих параметрів було розраховано діаметр d мідного дроту з ізоляцією для обмотки (2 мм) та його очікувана довжина l (1833 м) за рядової укладки. Отримана довжина мідного дроту дозволяє оцінити масу m проводу електричної котушки індуктора (без каркаса) за формулою

$$m = (l\pi d^2 \rho) / 4, \quad (22)$$

де ρ — щільність міді, кг/м^3 .

Так, наприклад, очікувана вага обмотки індуктора (без каркаса), синтез якого проводився, склала близько 41 кг.

Розрахунковий розподіл параметрів магнітного поля у робочому об'ємі індуктора наведено на рис. 4.

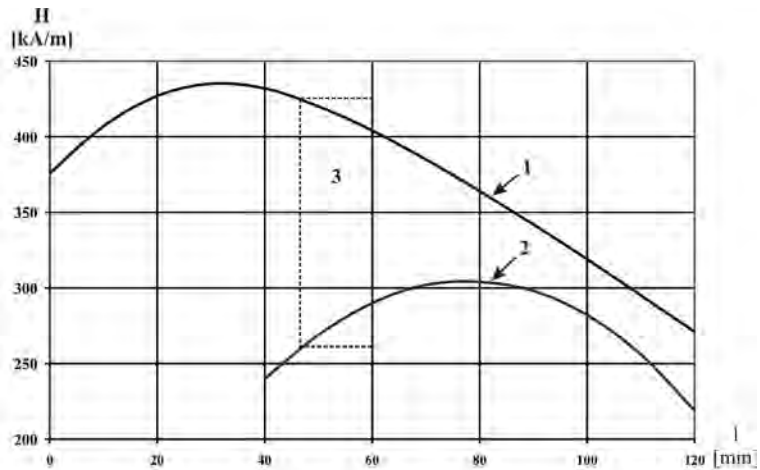


Рис. 4. Профіль розподілу параметрів магнітного поля у робочому об'ємі індуктора (1 — крива розподілу значень напруженості магнітного поля на осі котушки, 2 — крива розподілу значень напруженості магнітного поля на відстані 85 мм від осі котушки, 3 — зона розміщення магніту)

Fig. 4. Profile of magnetic field parameters distribution in inductor operating volume (1 — the curve of the distribution of magnetic field strength on the coil axis, 2 — curve of distribution of magnetic field strength at a distance of 85 mm from the axis of the coil, 3 — the magnet location area)

СХЕМА АВТОМАТИЗОВАНОЇ УСТАНОВКИ

Функціональну схему установки, яка реалізує запропонований метод, наведено на рис. 5.

До її складу входять трифазний випрямляч ТВ, дросельно-конденсаторний (LC) фільтр КФ, індуктор І, блок датчиків контролю стану котушки БД, блок формування параметрів імпульсу намагнічування БФ, трифазний регулятор напруги РН, пульт управління і контролю ПУ, пристрій контролю якості намагнічування ПКН, блок охолодження індуктора БО.

Основою установки є індуктор І з обмоткою збудження. Він має змінний профіль перерізу та внутрішню порожнину, в якій фіксується привід.

Трифазна напруга 380 В промислової частоти 50 Гц подається на трифазний випрямляч ТВ, виконаний за схемою Ларіонова [11] з парною групою тиристорів. Випрямлена напруга подається на двоступеневий LC-фільтр, який нормує амплітуди пульсацій напруги для живлення котушки індуктора. Сенсори блоку датчиків БД контролю стану котушки виконують вимірювальні перетворення значень струму намагнічування у котушці та напруги на ній, а також температури обмотки котушки індуктора. Відповідні сигнали вимірювальної інформації з блоку датчиків БД подаються до блоку формування БФ параметрів імпульсу намагнічування, де формуються сигнали управління трифазним регулятором напруги РН, побудованим за схемою широко-

імпульсного модулятора. Для цього цей блок має пристрій початкової установки програмно заданого сигналу (напруги) управління. Також до складу цього блоку входить пристрій контролю ПКН цілісності обмотки привода, який формує сигнал блокування запуску циклу намагнічування у разі обриву обмотки привода, а також за перевищення температури обмотки котушки індуктора встановленого граничного значення.

Регулятор напруги РН призначений для перетворення програмно заданого рівня напруги імпульсу намагнічування у кут відкриття тиристорів випрямляча ТВ. У такий спосіб формується імпульс струму намагнічування із заданою тривалістю і кутом зростання його амплітуди до заданого рівня, який проходить

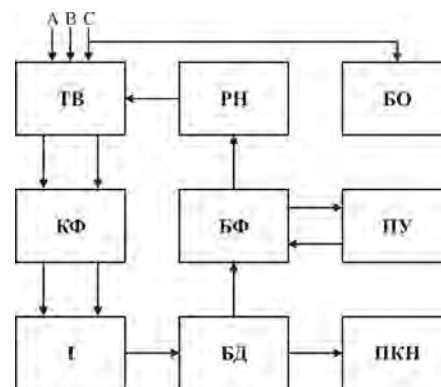


Рис. 5. Функціональна схема автоматизованої установки

Fig. 5. Functional diagram of automated unit

по обмотці котушки індуктора і створює в його об'ємі повільно зростаюче за заданим законом магнітне поле.

Пульт управління і контролю ПУ разом з пристроєм контролю якості намагнічування призначений для комутації різних режимів роботи установки, а також контролю якості намагнічування магніту і цілісності його обмотки з одночасною індикацією режимів роботи, рівня напруженості магнітного поля в індукторі й температурного режиму його обмотки, типу привода, відносної якості намагнічування магніту, несправності (обриву або короткого замикання) дроту його обмотки.

Для підтримання допустимого теплового режиму індуктора і блоків силової електроніки, а також для підвищення продуктивності намагнічування приводів за умов їх серійного виробництва в установці встановлено два вентилятори блоку охолодження БО, які автоматично вимикаються лише під час роботи індуктора для захисту їх від дії магнітного поля індуктора.

ОБЛАДНАННЯ УСТАНОВКИ

На основі попередніх досліджень і розроблень за участю авторів було створено автоматизовану установку для намагнічування висококоерцитивних магнітів заданої форми і розмірів у складі приводів разом з магнітопроводом та обмоткою збудження без порушення її цілісності. До її складу входять усі зазначені вище складові блоки і пристрої.

На робочій панелі установки передбачені два гнізда фіксації привода. Одне призначено для фіксації привода у робочому об'ємі (порожнині) індуктора перед процесом намагнічування, а інше — для фіксації привода після нього. Загальний вид привода з пристроєм фіксації у внутрішній порожнині індуктора установки показано на рис. 6, де 1 — електромагнітний привід у зборі, 2 — фіксатор з притисною обоймою 3, пружиною 4 та фіксувальною пластиною 5.

Поряд з гніздами розміщені відповідні пари клем для підключення затискачів обмотки привода з метою контролю її цілісності (в процесі намагнічування) і вимірювання відносної якості магніту після намагнічування.

Також на панелі розміщено пульт управління і контролю. До його складу входять дві групи органів управління, контролю та індикації стану/режиму роботи блоків установки і вимірювальної інформатії.

Першу групу органів призначено для управління режимами роботи установки. До її складу входять гніздо для встановлення ключа вмикання жив-



Рис. 6. Електромагнітний привід з пристроєм фіксації
Fig. 6. Electromagnetic drive with locking device

лення установки; кнопки режимів роботи (включення/виключення роботи, початку циклу намагнічування), світлодіодні індикатори живлення установки та наявності напруги за фазами «А», «В», «С»; світлові міні-табло індикації готовності до роботи блоку формування параметрів імпульсу намагнічування і його пристрою початкової установки програмно заданого сигналу управління, індикації цілісності обмотки привода, індикації тривалості робочого режиму намагнічування, індикації перевищення допустимого температурного режиму індуктора; індикаторна світлодіодна лінійка зміни значень напруженості магнітного поля в індукторі у процесі намагнічування зі шкалою від 0 до 500 кА/м через 100 кА/м.

Призначенням пристрою контролю якості намагнічування і другої групи органів управління та індикації є вихідний контроль цілісності обмотки привода й якості намагнічування його магніту. Світлодіоди між клемми призначені для індикації полярності вимірювальної напруги, прикладеної до обмотки привода. Загорання світлового міні-табло сигналізує стосовно цілісності обмотки привода і готовності його до контролю або несправності (порушення її цілісності). Натисканням відповідної клавіші здійснюється автоматичне визначення типу контролюваного привода (НЗТВ13-11 або НЗТВ13-13), відносно чого сигналізують відповідне світлове міні-табло і запуск циклу вимірювання.

Принцип вимірювання ступеня відносної якості намагнічування базується на порівнянні індукцій постійного поля намагніченого магніту і протилежно спрямованого поля, яке створюється за подавання відповідного струму в обмотку привода, до моменту їх рівності за допомогою геркона. Цей пристрій замикає свої контакти за фіксації привода у відповідному гнізді й розмикає їх у момент указаної рівності. Далі вимірене в цей момент значення сили струму порівнюється з нормативним значенням для стандартного зразка привода, і результат цього порівняння відображається на цифровому відліковому пристрої, який має діапазон показів у межах від 0 до 150 (у відсотках). Ще одна клавіша необхідна


для обнулення показів цифрового відлікового пристрою і підготовки вимірювального пристрою до наступного вимірювання.

ВИСНОВКИ

Розроблено методику розрахунку параметрів імпульсу намагнічування із заданими параметрами і схему відповідного автоматичного пристрою формування такого імпульсу. Запропоновано методику синтезу магнітної системи індуктора з рівномірним маг-

нітним полем у його робочому об'ємі, яка базується на розрахунку геометричних параметрів його профілю. Розроблено пристрій контролю відносної якості намагнічування магніту і цілісності обмотки привода. На основі комплексу отриманих результатів розроблено функціональну схему автоматизованої установки. Викладені результати досліджень і розроблень мають бути корисними для розробників автоматизованих систем намагнічування електромагнітних приводів різних типів у зборі та виробників такої продукції.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Кифер И.И. (1969) Испытания ферромагнитных материалов / И.И. Кифер // М.: Энергия (Kifer I.I. (1969) Ispytaniya ferromagnitnyh materialov / I.I. Kifer // М.: Jenergija). — 360 с/р.
2. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. / под общ. ред. В.В. Клюева. Т.2 / М.: Машиностроение (Nerazrushajushhij kontrol: Spravochnik: 7 vol. / ed. V.V. Kljuev. V.2 / М.: Mashinostroenie), 2003. — 688 с/р.
3. Шихин А.Я. Автоматические магнитоизмерительные системы / А.Я. Шихин // Москва, «Энергия» Библиотека по автоматике. Выпуск 575. (Shihin A.Ja. Avtomaticheskie magnitoizmeritelnye sistemy / A.Ja. Shihin // Moskva, «Jenergija». Biblioteka po avtomatike. Vypusk 575), 1977.
4. Преображенский А.А. Магнитные материалы и элементы. Учебник. 3-е изд., перераб. и доп. / А.А. Преображенский, Е.Г. Бишард // М.: Высшая школа (Preobrazhenskij A.A. Magnitnye materialy i jelementy. Uchebnik. 3-e izd., pererab. i dop. / A.A. Preobrazhenskij, E.G. Bishard // М.: Vysshaja shkola), 1986. — 352 с/р.
5. Арнольд Р.Р. (1969) Расчет и проектирование магнитных систем с постоянными магнитами / М.: Энергия (Arnold R.R. (1969) Raschet i proektirovanie magnitnyh sistem s postojannymi magnitami / М.: Jenergija). — 184 с/р.
6. Magnetisierer bei MAGNET-PHYSIK in Köln — Magnetisierung — 2020. (<https://www.magnet-physik.de/magnetisieretechnik/magnetisierer.php>)
7. Себко В.П. (1978) Расчет установки для импульсного намагничивания магнитных ловителей / В.П. Себко, Г.И. Ващенко, В.И. Бондаренко и др. // Нефть и газ (Sebko V.P. (1978) Raschet ustanovki dlja impulsnogo namagnichivaniya magnitnyh lovitelej / V.P. Sebko, G.I. Vashhenko, V.I. Bondarenko i dr. // Neft i gaz), — № 4. — С/Р. 25—9.
8. Скляр В.С. Устройство для намагничивания высококоэрцитивных магнитов в составе электромагнитного привода / В.С. Скляр, В.П. Себко, Б.М. Горкунов, А.А. Авраменко, Н.Н. Сиренко, В.В. Лысенко // А.с. SU 1735923 А1. Бюл. №19 (Sklyar V.S. Ustrojstvo dlja namagnichivaniya vysokokoercitivnyh magnitov v sostave jelektromagnitnogo privoda / V.S. Sklyar, V.P. Sebko, B.M. Gorkunov, A.A. Avramenko, N.N. Sirenko, V.V. Lysenko // A.s. SU 1735923 A1. Bjul. №19), 1992.
9. Ландау Л.Д. Электродинамика сплошных сред / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц // Гос. Изд-во физ.-мат лит. — М. (Landau L.D. Jelektrodinamika sploshnyh sred / L.D. Landau, E.M. Lifshic // Gos. Izd-vo fiz.-mat lit. М.): 1959. — С/Р. 164-5.
10. Абрамовиц М. Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и таблицами / М. Абрамовиц, И. Стиган (ред.) // М.: Наука (Abramovic M. Spravochnik po special'num funkcijam s formulami, grafikami i tablicami / M. Abramovic, I. Stigan (red.) // М.: Nauka), 1979. — 832 с/р.
11. Борисов П.А. Расчет и моделирование выпрямителей. Учебное пособие по курсу «Элементы систем автоматики» (Часть I) / П.А. Борисов, В.С. Томасов // СПб: СПб ГУ ИТМО (Borisov P.A. Raschet i modelirovanie vuprjamitelej. Uchebnoe posobie po kursu «Jelementy sistem avtomatiki» (Chast I) / P.A. Borisov, V.S. Tomasov // SPb: SPb GU ITMO), 2009. — 169 с/р. 

Отримано / received: 10.04.2020.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. С.Г. Буряковським (Україна).
Prof. S.G. Buryakovskiy, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.

DOI: 10.33955/2307-2180(2)2020.22-24

УДК 621.179.1

ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА ДЛЯ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ МЕТАЛЕВИХ ПРУТКІВ

Measuring System for Non-Destructive Testing of Metal Rods



Д. П. Орнатський, доктор технічних наук, професор,
О. О. Кривокульська, асистент,
e-mail: kryvokul@ukr.net
О. О. Бурбела, асистент,
e-mail: burbela-olga@ukr.net
О. Д. Близнюк, старший викладач,
e-mail: nau_409@ukr.net
Національний авіаційний університет, м. Київ

D. P. Ornatsky, doctor of technical sciences, professor,
O. O. Krivokulska, assistant,
e-mail: kryvokul@ukr.net
O. O. Burbela, assistant,
e-mail: burbela-olga@ukr.net
O. D. Bliznyuk, senior lecturer,
e-mail: nau_409@ukr.net
National Aviation University, metro Kyiv

Контроль параметрів металевих виробів методом вихрового струму неруйнівного керування законною електромагнітною індукцією набув сьогодні широкого поширення завдяки високій чутливості, широкому діапазону частот, здатності керувати механічними властивостями, однорідності матеріалу, як магнітна, так і немагнітна, контрольна і т.д.

The control parameters of metal products using the eddy current method of nondestructive testing based on electromagnetic induction law is now widespread. Due to the high sensitivity over a wide frequency range of the ability to control the mechanical properties, uniformity of material, both magnetic and non-magnetic materials, beskonechnosti, high reliability, automation, process control, etc.

The object of study is the process of interaction of external electromagnetic fields with defects in heterogeneity of structure in metal rod, causing a deformation of microtubuli currents and, accordingly, their influence on the inductance coil of the sensor. So, according to the law of electromagnetic induction eddy currents induced by an external electromagnetic field will be asking a private field that will oppose the external field that will lead to a change in inductance of the sensor coil. Therefore, the most informative param-

eter in this case is the relative change in inductance of the sensor.

In the known designs use differential transformer sensors, transmission type, which differ in complexity of implementation, but have high sensitivity. In existing works not enough attention on improving of the metrological characteristics. Modern means of microstraava flaw detectors in the overwhelming number are for scientific research, but little attention is paid to tools that can be used in industrial processes, through a complex measurement process in the existing funds and the large volume of the software during automatic processing of information.

In the presented work there is a system for nondestructive testing of metal bars with deprivation of the above-mentioned disadvantages, which would provide high metrological characteristics in a wide frequency range, separate measurement of impedance components of the sensor, which allows the reduction of methodological errors of determination of the main characteristics of the output signal of microstraava sensors.

The scientific result is created sambalanco pavement system based on electronic dharamtala model of a vortex sensor with high metrological characteristics, which allows you to create real-time signal proportional to the amount of damage that will give you the opportunity to increase productivity in the quality control bar of metal products in a production environment.

Ключові слова: неруйнівний контроль, вихроструміві датчики, схема дефектоскопа, похибки.

Keywords: nondestructive testing, eddy current sensors, flaw detector scheme, errors.

Існує три основні методи побудови приладів, які працюють з вихрострумівими датчиками. До першого відносять амплітудний метод, принцип дії якого полягає у вимірюванні модуля імпедансу вихрострумівого датчика та його зміни, але це відбувається, як правило, на високих частотах, у межах резонансу, що обмежує його практичне використання поверхневими дефектами деталі. До другої групи методів відносять прилади, принцип дії яких полягає у визначенні змін фази та амплітуди напруги на виході двох деференціально включених кату-

шок приймача, в яких змінюється коефіцієнт трансформаторного зв'язку з досліджуваною деталлю (трансформаторні датчики). Основною їх перевагою є простота вимірювального обладнання. До недоліків відносять складність реалізації датчика.

Цей метод використовується зазвичай для поверхневих дефектоскопів деталей, у тому числі складної форми.

До третьої групи методів відносять прилади, які дозволяють вимірювати квадратурні складові імпедансу вихрострумівих датчиків у широкому діапазоні

частот з високою точністю. Це мостовий метод вимірювання, який дозволяє збільшити чутливість. Варіанти реалізації цього методу відрізняються методами зрівноваження (повного чи неповного) з використанням компенсуючої котушки, ідентичної котушці збудження з еталонним зразком досліджуваного матеріалу або без нього. Перевагою таких приладів, порівняно з попередніми, є також більш широкий діапазон робочих частот, висока точність вимірювання. Цей метод є найбільш точним, універсальним, широкополосним, дає можливість виміряти складові імпедансу датчика в широкому діапазоні частот та широкому динамічному діапазоні з високою чутливістю. Недоліком такого методу є більш складна реалізація, зумовлена необхідністю ідентичності котушок.

Мета цієї роботи — створити систему для неруйнівного контролю металевих прутків з позбавленням зазначених вище недоліків, яка б забезпечила високі метрологічні характеристики в широкому діапазоні частот за роздільного вимірювання складових імпедансу датчика та дозволила зменшити методичні похибки визначення основних характеристик вихідних сигналів вихрострумів датчиків.

Функціональну схему дефектоскопа з електронною моделлю датчика та порівнянням струмів представлено на рис. 1.

Дефектоскоп, представлений на рис. 1, може бути збалансований регулюванням C_0 , R_0 , наприклад, за допомогою аналогових перемножувачів, умови рівноваги $U_{\Sigma} = 0$, є частотно незалежним та взаємно незалежним за $R_1 \cdot R_2 = \text{const}$, що забезпечує швидке зрівноваження.

Для забезпечення високої точності зрівноваження необхідно зменшити вплив таких факторів:

- * паразитної ємності датчика C_x ;
- * синфазної напруги $U_{\text{сф}}$, яка виникає через наявність корельованих шумів у напрузі зміщення операційних підсилювачів ОП₁, ОП₂ та через «спільні контури заземлення»;
- * зсуву фаз, що виникає під дією операційного підсилювача ОП₁ у робочому діапазоні частот.

Для зменшення впливу паразитної ємності датчика в структуру вимірювальної ланки було введено аналоговий інвертор $[-1]$, який послідовно з корельовальною ємністю C_{k1} включено паралельно датчику. При цьому компенсація паразитної ємності датчика C_x відбувається у такий спосіб: спочатку на бездефектній зоні об'єкта вимірювання відбувається зрівноваження схеми шляхом регулювання конденсатора C_0 та резистора R_0 ; потім частота тестового сигналу збільшується, і ми знову досягаємо рівноваги регулюванням конденсатора C_{k1} ; якщо при цьому частота тестового сигналу буде не менше ніж в 10 разів перевищувати максимальну частоту робочого діапазону системи, то похибка від паразитної ємності датчика буде меншою від однієї соті відсотка (0,01%).

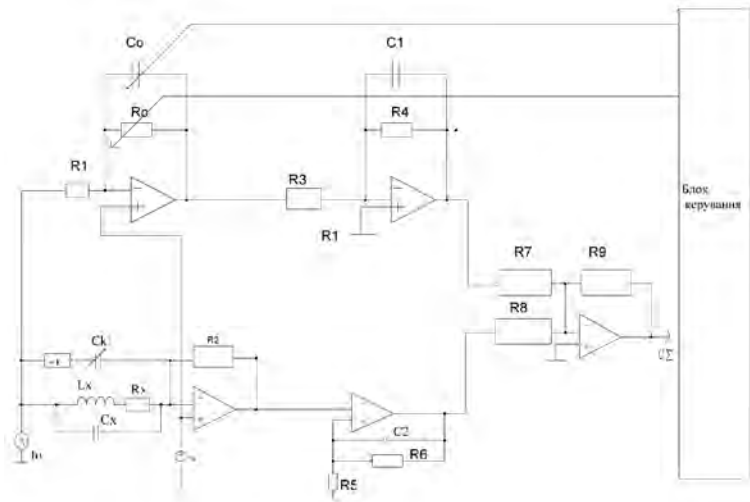


Рис. 1. Схема дефектоскопа з порівнянням напруг
Fig. 1. Schematic of the flaw detector with voltage comparison

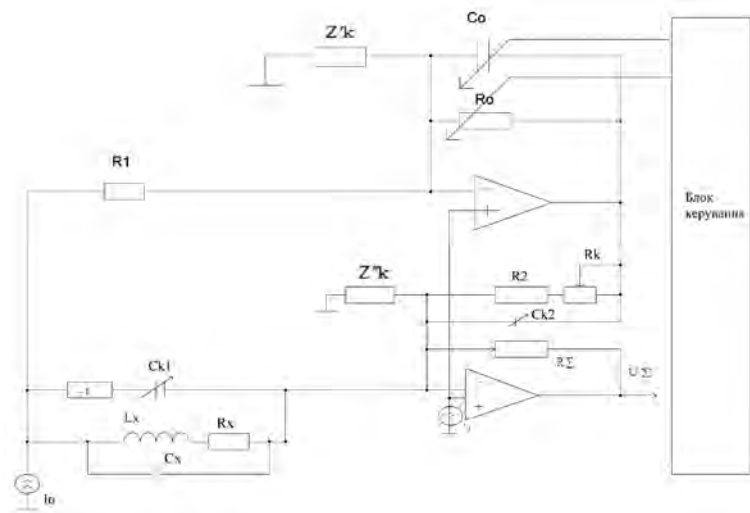


Рис. 2. Компенсаційна схема з імітацією еталонної індуктивності на основі реального інтегратора з електронним регулюванням параметрів
Fig. 2. Compensation scheme with simulation of inductive model based on real integrator with electronic parameter control

Для того, щоби зменшити похибку, зумовлену синфазною напругою $e_{\text{сф}}$ (рис. 2), необхідно досягти рівності коефіцієнтів шуму каскадів на ОП₁, ОП₂. Але така рівність може бути лише на постійному струмі, тобто, коли всі опори є резисторами. Уведення додаткових опорів z'_k, z''_k дозволяє зменшити цей вплив, але аналіз співвідношень $K_{\text{ш1}}, K_{\text{ш2}}$ свідчить, що це можливо лише на фіксованих частотах, що не має практичного сенсу. Для того, щоби розширити діапазон частот, треба використати схему з порівнянням напруг [1] (рис. 1).

Компенсація паразитної ємності відбувається у такий самий спосіб, як і в попередньому випадку. А щодо синфазної напруги, то степінь її пригнічення буде спричинятися неідентичністю зсуву фаз каскадами на ОП₁, ОП₃ та ОП₂, ОП₄.

Для забезпечення ідентичності фазочастотних характеристик підсилювачів на ОП₃ та ОП₄ мають бути виконані такі співвідношення:

$$R_3 = R_4 = R_5 = R_6, \quad (1)$$

$$C_2 = 2C_1. \quad (2)$$

А для зменшення неідентичності фазочастотних характеристик на каскадних ОП₁ та ОП₂:

$$R_1 = R_2, \quad (3)$$

$$|z_g| = |z_0|. \quad (4)$$

Коефіцієнти шуму:

$$K_{\text{ш1}} = R_1 / (z_0 + R_1), \quad (5)$$

$$K_{\text{ш2}} = z_g / (z_g + R_2), \quad (6)$$

$$R_2 / z_g = z_0 / R_1, \quad (7)$$

$$R_2 = (z_0 \cdot z_g) / R_1, \quad (8)$$

$$K_{\text{ш2}} = \frac{z_g}{z_g + \frac{z_0 \cdot z_g}{R_1}} = \frac{z_y R_1}{z_y R_1 + z_0 \cdot z_g} = \frac{R_1}{R_1 + z_0} = K_{\text{ш1}}. \quad (9)$$

Тобто у стані рівноваги $K_{\text{ш2}} = K_{\text{ш1}}$ в широкому діапазоні частот.

ВИСНОВКИ

Отже, запропонована схема дозволяє в широкому діапазоні частот скомпенсувати основні методичні похибки вихрострумове дефектоскопа мостового типу з електронним імітатором еталонної індуктивності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Накладні вихрострумові перетворювачі подвійного диференціювання / В.М. Учанін. — Львів: СПЛОМ (Overhead eddy current converters of double differentiation / V.M. Uchanin. — Lviv: SPLOM), 2013. — 268.
2. Экспериментальная механика: В 2-х книгах: Книга 1. 341 Пер. с англ. / Под ред. А. Кабаяси. — М.: Мир (Experimental Mechanics: In 2 Books: Book 1. 341 Per. with English / Ed. A. Kobayashi. — M.: Mir), 1990. — 616 с/р.
3. Экспериментальная механика: В 2-х книгах: Книга 2. 341 Пер. с англ. / Под ред. А. Кабаяси. — М.: Мир (Experimental Mechanics: In 2 Books: Book 2. 341 Per. with eng. / Ed. A. Kobayashi. — M.: Mir), 1990. — 616 с/р.
4. Вимірювальні засоби сигналів акустичної емісії при дослідженні процесу чистого точіння алюмінієвих сплавів / Вологдіна О., Девін Л., Німченко Т., Орнатський Д. Восточно-Європейський журнал передових технологій (Measuring means of acoustic emission signals in the study of the process of pure grinding of aluminum alloys / Vologdin O., Devin L., Nimchenko T., Ornatskiy D. Eastern European Journal of Advanced Technologies). — 2005. — № 6(18). — С/Р. 127—130.
5. Тартаковский Д.Ф., Ястребов А.С. Метрология, стандартизация и технические средства измерений / УМО по образованию в области автоматизации, электроники, микроэлектроники и радиотехники. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Высшая школа (Tartakovsky D.F., Yastrebov A.S. Metrology, standardization and measurement tools / WMO for education in automation, electronics, microelectronics and radio engineering. — 2nd ed., Remaking. and ext. — M.: High school), 2008. — 210 с.
6. Маевський С.М., Бабак В. П., Щербак Л. М. Основа побудови систем аналізу сигналів у неруйнівному контролі: Навч. посібник для студ. вузів, які навчаються за спец «Фізичні методи та прилади інтроскопії». — К.: Либідь (Mayevsky S.M., Babak V.P., Shcherbak L.M. Basis of building signal analysis systems in nondestructive control: Educ. study guide. Universities studying for the specialty «Physical methods and devices of introscopy». — K.: Libid), 1993. — 200 с.
7. Сурду М.Н., Мельник В.Г., Орнатский О.А. / В кн.: «Техника электрических измерений». — К.: Паук, думка (Surdu M.N., Melnik V.G., Ornatsky O.A. / In the book: The technique of electrical measurements. — K.: — Pauk, dumka). — 1979. — С. 41—48.
8. Патент на корисну модель 42920, G 01N27/90 Учалін В.М., Чернелевський В.В. (Utility model patent 42920, G 01N27 / 90 Uchalin V.M., Chernelevsky V.V.).
9. Патент на корисну модель 69095, G 01N27/90 Учалін В.М. (Utility model patent 69095, G 01N27 / 90 Uchalin V.M.).
10. Патент на корисну деталь 63503, G 01N27/90 Трушаков Д.В., Мартинов В.В. (Utility Part Patent 63503, G 01N27 / 90 D.V. Trushakov, V.V. Martinov).
11. Патент на винахід 62570, G 01N27/00 Гамалій В.Ф., Пашченко В.Ф., Трушаков Д.В. (Patent for Invention 62570, G 01N27/00 Gamaliy V.F., Pashchenko V.F., Trushakov DV).

Отримано / received: 23.02.2020.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. В.С. Єременком (Україна).
Prof. V.S. Yeremenko, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.

DOI: 10.33955/2307-2180(2)2020.25-33

УДК 681.121.84

ДОСЛІДЖЕННЯ ДОДАТКОВИХ СКЛАДОВИХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ РЕЗУЛЬТАТУ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ НЕСТАЦІОНАРНОГО ПОТОКУ

Investigating the Additional Components of Uncertainty of Measurement Result of Unsteady Flow



І. В. Костик, асистент кафедри «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»,
e-mail: Ihor.V.Kostyk@lpnu.ua

Ф. Д. Матіко, доктор технічних наук,
професор кафедри,
e-mail: fedir.d.matiko@lpnu.ua

В. І. Роман, кандидат технічних наук,
доцент кафедри,
e-mail: roman_vitaliy@ukr.net

Національний університет «Львівська політехніка»,
Інститут енергетики та систем керування,
Україна

I. V. Kostyk, assistant of the department of automation and computer-integrated technologies,
e-mail: Ihor.V.Kostyk@lpnu.ua

F. D. Matiko, doctor of technical sciences,
professor of department,
e-mail: fedir.d.matiko@lpnu.ua

V. I. Roman, candidate of technical sciences,
associate professor of the department,
e-mail: roman_vitaliy@ukr.net

Lviv polytechnic national university,
Institute of power engineering and control systems,
Ukraine

Досліджено додаткові складові невизначеності результату вимірювання витрати нестационарного потоку за допомогою витратоміра змінного перепаду тиску. Зокрема детально розглянуто методику оцінювання додаткової складової невизначеності, яка зумовлена нелінійністю залежності витрати середовища від перепаду тиску на звужувальному пристрої, а також додаткової складової, яка пов'язана з відсутністю інерційного члена у підкореному виразі квазістационарного рівняння витрати. На прикладі чотирьох сигналів перепаду тиску, які відтворюють пульсуючий та нестационарний режими протікання середовища, виконано оцінювання названих складових невизначеності. Розглянуто можливість визначення поправкового коефіцієнта на основі додаткової невизначеності та коректування вимірюваного значення витрати за допомогою введення у рівняння витрати поправкового коефіцієнта. Однак такий спосіб авторами пропонується застосовувати тільки у випадку, коли виявити джерела формування нестационарності потоку та усунути їх вплив на потік неможливо.

The additional components of uncertainty of measurement result of unsteady flow by means of pressure differential flowmeter are investigated in the article. In particular, the authors considered in detail the technique for estimating the additional component of uncertainty, caused by the nonlinearity

of the flowrate dependence on the pressure drop on the standard primary device, as well as the additional component, which is related to the absence of the inertial term in the root expression of the quasi-steady flow equation. On the example of four differential pressure signals that reproduce the pulsating and unsteady flow modes of the fluid, the estimating the named components is carried out and the dependence of these components of uncertainty on the basic characteristics of the differential pressure signal (root mean square amplitude of pulsations and the maximum relative deviation) is demonstrated. It is shown that the increase of these signal characteristics leads to an increase in the corresponding components of the uncertainty and, consequently, in the resulting additional uncertainty of the measured value of flowrate. Particularly, for the investigated pressure drop signals for which the root mean square amplitude does not exceed 20% of the mean pressure drop, the resulting additional uncertainty of the measured flowrate reaches 0.5%. Since the additional uncertainty caused by unsteady flow is systematic and has a positive sign, it is possible to determine the correction coefficient based on this additional uncertainty and to correct the measured value of the flowrate by considering the correction factor in the flow equation. However, the authors propose to correct the measured value of the flowrate only if it is impossible to identify the causes of unsteady flow and to eliminate their impact on the flowrate.



І. В. Костик



Ф. Д. Матіко



В. І. Роман

Ключові слова: вимірювання витрати, звужувальний пристрій, нестационарний потік, додаткова невизначеність, поправковий коефіцієнт.

Keywords: flowrate measurement, standard primary device, unsteady flow, additional uncertainty, correction coefficient.

У зв'язку із зростанням цін на енергоносії в нашій державі стали першочерговими завдання впровадження енергозаощаджувальних технологій та економного використання енергоносіїв. Економне споживання енергоносіїв можливе тільки за умови налагодження їх точного обліку. Налагодження обліку енергоносіїв дає можливість виявляти втрати енергоносіїв у системах їх транспортування та розподілення, сприяє налагодженню чітких економічних стосунків між постачальником та споживачем і усуває можливість зловживань; тому необхідно підвищувати точність вимірювання витрати енергоносіїв у всіх ланках їх транспортування та постачання до споживачів [1].

Одним із стратегічно важливих для України енергоносіїв є природний газ, облік якого у багатьох підприємствах здійснюють за допомогою витратомірів змінного перепаду тиску. Під час транспортування та розподілення природного газу його параметри багаторазово змінюються, як внаслідок виконання над газом роботи, так і внаслідок зміни конструктивних параметрів чи умов прокладання газопроводів. У результаті цього в газопроводах виникають ділянки нестабільності параметрів потоку, зокрема, виникають ділянки із нестаціонарним газовим потоком по довжині трубопроводу, що, в свою чергу, призводить до виникнення додаткових невизначеностей, які впливають на точність вимірювання кількості природного газу методом змінного перепаду тиску.

Вплив нестаціонарності газового потоку на результат вимірювання витрати плинних енергоносіїв методом змінного перепаду тиску розглянуто в [2—5]. В них представлено методики оцінювання додаткових складових невизначеності вимірюваного значення витрати плинного середовища, зумовлених нестаціонарністю потоку.

У стандарті [2] представлено перелік цих складових невизначеності, узагальнені правила їх розрахунку, а також формулу для обчислення поправкового коефіцієнта, який уводиться для коректування результату вимірювання витрати з метою усунення впливу додаткових складових невизначеності. Однак, для практичного застосування запропонованих у [2] правил необхідно розробити детальну методику оцінювання кожної зі складових невизначеності на основі результатів дослідження сигналу перепаду тиску на звукувальному пристрої.

У стандарті [3] представлено аналітичні залежності для визначення похибки вимірювання витрати за умов нестаціонарного потоку, які отримано у [4]. Аналіз цих залежностей також виконано у роботі [5]. Однак у цих джерелах розглянуто тільки од-

ну зі складових похибки вимірювання витрати, а саме, похибку, зумовлену відсутністю інерційного члена у підкореному виразі квазістаціонарного рівняння витрати.

Метою досліджень є деталізація окремих розділів методики оцінювання додаткових складових невизначеності, які виникають під час вимірювання витрати нестаціонарного потоку методом змінного перепаду тиску, та застосування цієї методики для аналізу додаткових складових невизначеності результату вимірювання витрати.

ДОСЛІДЖЕННЯ ДОДАТКОВИХ СКЛАДОВИХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРЮВАНОВОГО ЗНАЧЕННЯ ВИТРАТИ НЕСТАЦІОНАРНОГО ПОТОКУ

Більшість теоретичних методів дослідження впливу нестаціонарного потоку на поведінку витратоміра змінного перепаду тиску розвинуті, розглядаючи витрату через діафрагму як одномірну і приймаючи, що форма струменів не змінюється протягом періоду пульсацій. На основі цієї гіпотези, а також для нестисливого середовища, взаємоз'язок між витратою і перепадом тиску визначається рівнянням моменту:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \cdot \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

та рівнянням нерозривності:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho U}{\partial x} = 0, \quad (2)$$

де U — швидкість потоку вздовж координати x ; ρ — густина середовища; P — абсолютний тиск середовища; t — час.

Інтегруючи рівняння моменту відносно координати x отримують диференціальне рівняння, що пов'язує миттєву витрату та перепад тиску на звукувальному пристрої [5]:

$$\Delta p = K_1 \cdot \frac{dq_m}{dt} + K_2 \cdot q_m^2, \quad (3)$$

де Δp — перепад тиску на звукувальному пристрої, q_m — масова витрата,

K_1 і K_2 — коефіцієнти, які визначають із рівнянь (4) і (5) відповідно:

$$K_1 = \frac{4 \cdot l_e}{\pi \cdot d^2 \cdot C_k}, \quad (4)$$

де l_e — інерційна довжина ($l_e \approx d$),

C_k — коефіцієнт звуження потоку,

d — діаметр отвору звукувального пристрою;

$$K_2 = \frac{1 - \beta^4}{C^2 \cdot ((\pi \cdot d^2)/4)^2} \cdot \frac{1}{2 \cdot \rho}, \quad (5)$$

де C — коефіцієнт витікання звукувального пристрою,

β — відносний діаметр отвору звукувального пристрою ($\beta = d/D$, D — внутрішній діаметр трубопроводу),

ρ — густина середовища.

Рівняння (3) отримане із урахуванням того, що осьова довжина звукувального пристрою є невеликою, тобто співмірною з довжиною хвилі пульсації потоку.

Під час дослідження пульсуючого потоку його розглядають як квазістаціонарний, тобто приймають, що інерційний член $K_1 \cdot (dq_m/dt)$ у рівнянні (3) дорівнює нулю, а витрата пов'язана з перепадом тиску рівнянням:

$$q_m = \sqrt{\Delta p / K_2}. \quad (6)$$

Відповідно коефіцієнт K_2 визначають на основі значень коефіцієнта витікання C , які для стандартних звукувальних пристроїв можуть бути обчислені за емпіричними залежностями, запропонованими у відповідних стандартах. Зокрема, залежності для обчислення коефіцієнта витікання C діафрагми представлено в стандарті [6].

Як видно із (6), залежність витрати від перепаду тиску є нелінійною. За умов нестационарного потоку дійсне значення перепаду тиску певною мірою усереднюється вимірювальним перетворювачем перепаду тиску, а також пневматичними каналами, сформованими з'єднувальними трубками та камерами вимірювального перетворювача [7]. Оскільки корінь квадратний із усередненого значення перепаду тиску не є рівним середньому значенню коренів квадратних від миттєвих значень перепаду тиску [2, 3, 8]:

$$\sqrt{\overline{\Delta p}} \neq \overline{\sqrt{\Delta p}}, \quad (7)$$

то виникає додаткова складова невизначеності вимірюваного значення витрати $U'_{\text{Ду}}$.

Отже, зважаючи на викладене вище, під час вимірювання витрати нестационарного потоку виникають такі додаткові складові невизначеності:

- $U'_{\text{Ду}}$ — невизначеність, зумовлена нелінійністю залежності $q(\tau)$ від $\Delta p(\tau)$;
- $U'_{\text{Дін}}$ — невизначеність, пов'язана з відсутністю інерційного члена у підкореневому виразі квазістаціонарного рівняння витрати.

У сучасних системах вимірювання витрати, на основі мікропроцесорного обчислювача, сигнали вимірюваних параметрів (тиску, перепаду тиску, температури) дискретизують. Залежно від частоти дискретизації цих сигналів може виникати додаткова складова невизначеності $U'_{\text{Двнм}}$.

Окрім того, в системах з роздільним вимірюванням параметрів потоку, може виникати додаткова складова невизначеності $U'_{\text{Да}}$, пов'язана з динаміч-

ними властивостями вимірювального каналу кожного із параметрів.

Отже, під час вимірювання витрати нестационарного потоку, можуть виникати чотири зазначені вище додаткові складові невизначеності. Ці складові формують результативну додаткову невизначеність, яку, в загальному випадку, потрібно визначити за формулою [8]:

$$U'_{\text{Д}} = \sqrt{U'^2_{\text{Ду}} + U'^2_{\text{Дін}} + U'^2_{\text{Двнм}} + U'^2_{\text{Да}}}. \quad (8)$$

За значенням додаткової невизначеності $U'_{\text{Д}}$ пропонується (див. [2]) коректувати вимірюване значення витрати нестационарного потоку введенням поправкового коефіцієнта

$$K_{\text{Д}} = \frac{1}{1 + 0,01 \cdot U'_{\text{Д}}}. \quad (9)$$

Оцінювання складових невизначеності $U'_{\text{Д}}$ виконують, застосовуючи умову квазістаціонарності рівняння миттєвого значення витрати, а саме, вважають, що коефіцієнти витікання і звуження потоку дорівнюють за значенням коефіцієнтам, визначеним для стаціонарного потоку [2, 3, 4].

Невизначеність $U'_{\text{Ду}}$ зумовлена нелінійністю залежності $q(\tau)$ від $\Delta p(\tau)$, може бути оцінена шляхом порівняння значень кореня квадратного зі сигналів перепаду тиску на виході двох вимірювальних перетворювачів перепаду тиску (ППТ): ППТ, застосованого у складі автоматизованої системи вимірювання витрати та спеціалізованого малоінерційного ППТ, додатково застосованого для виконання експерименту з оцінювання невизначеності $U'_{\text{Ду}}$. За результатами такого експерименту, в стандарті [2] пропонується обчислювати невизначеність $U'_{\text{Ду}}$ за формулою:

$$U'_{\text{Ду}} = \frac{\sqrt{\overline{\Delta p}} - \sqrt{\overline{\Delta p_{\text{в}}}}}{\sqrt{\overline{\Delta p}}} \cdot 100, \quad (10)$$

де $\sqrt{\overline{\Delta p_{\text{в}}}}$ — усереднене значення кореня квадратного із перепаду тиску, визначеного за допомогою автоматизованої системи вимірювання;

$\sqrt{\overline{\Delta p}}$ — усереднене значення кореня квадратного із перепаду тиску, визначеного за допомогою малоінерційного вимірювального перетворювача.

Під час вимірювань витрати системами з роздільним вимірюванням параметрів потоку невизначеність $U'_{\text{Ду}}$ може бути оцінена на основі значень відносної похибки, обчислених за залежностями, запропонованими в роботі [9]. Згідно з [9], відносна похибка вимірювання витрати, із урахуванням нестационарності трьох вимірюваних параметрів (перепаду тиску, тиску та температури), може бути обчислена за формулою:

$$\delta_{\bar{Q}_c} = \frac{1}{8 \cdot [(\tilde{\sigma}(\Delta P))^2 + (\tilde{\sigma}(P))^2 - 3 \cdot (\tilde{\sigma}(T))^2]^{-1} - 1} \cdot 100, \quad (11)$$

де $\tilde{\sigma}(\Delta P)$, $\tilde{\sigma}(P)$, $\tilde{\sigma}(T)$ — відносні середньоквадратичні відхилення перепаду тиску, тиску та температури відповідно:

$$\tilde{\sigma}(\Delta P) = \sigma(\Delta P) / \overline{\Delta P}, \quad (12)$$

$$\tilde{\sigma}(P) = \sigma(P) / \overline{P}, \quad (13)$$

$$\tilde{\sigma}(T) = \sigma(T) / \overline{T}; \quad (14)$$

$\overline{\Delta P}$, \overline{P} , \overline{T} — усереднені значення перепаду тиску, тиску та температури відповідно;

$\sigma(\Delta P)$, $\sigma(P)$, $\sigma(T)$ — середньоквадратичні відхилення перепаду тиску, тиску та температури відповідно.

У роботі [10] авторами виконано порівняння результатів обчислення додаткової похибки за залежністю (11) з результатами математичного експерименту, який полягав у визначенні відносного відхилення значення витрати $Q(E(P), E(\Delta P))$, обчисленого за усередненими значеннями параметрів потоку, від математичного сподівання миттєвих значень витрати $E(Q)$ за формулою:

$$\delta = \frac{Q(E(P), E(\Delta P)) - E(Q)}{E(Q)} \cdot 100, \quad (15)$$

де $E(P)$ і $E(\Delta P)$ — математичні сподівання значень тиску та перепаду тиску відповідно.

Отримані результати математичного експерименту підтвердили коректність аналітичної залежності (12), та вказують на те [10], що обчислення витрати природного газу за усередненими значеннями тиску газу та перепаду тиску на діафрагмі призводить до завищення значення витрати. Завищення витрати, отриманої за усередненими значеннями параметрів, є тим більшим, чим більшою є дисперсія, зокрема, перепаду тиску.

У випадку, коли розглядають тільки пульсації перепаду тиску, а $\tilde{\sigma}(P)$, $\tilde{\sigma}(T)$ дорівнюють нулю, із формули (12) отримують спрощене рівняння для обчислення відносної похибки вимірюваного значення витрати:

$$\delta_{\bar{Q}_c} = 12,5 \cdot (\tilde{\sigma}(\Delta P))^2. \quad (16)$$

За 95 % довірчого рівня розширена відносна невизначеність $U'_{\text{Дв}}$ може бути прийнята рівною відносній похибці:

$$U'_{\text{Дв}} = \delta_{\bar{Q}_c} = 12,5 \cdot (\tilde{\sigma}(\Delta P))^2. \quad (17)$$

Формула (17) пропонується в стандарті [2], як спрощена залежність для обчислення невизначеності $U'_{\text{Дв}}$ для систем з роздільним вимірюванням параметрів потоку.

Невизначеність $U'_{\text{Дв}}$, пов'язана з відсутністю інерційного члена у підкореновому виразі квазістаціонарного рівняння витрати природного газу, мо-

же бути оцінена за рівнянням похибки вимірювання витрати нестационарного потоку E_T , представленим у [3, 4]:

$$E_T = \left\{ \sqrt{1 + \frac{(\tilde{\sigma}(\Delta P))^2}{4 \cdot (1 + H^2 \cdot J^2)}} - 1 \right\} \cdot 100, \quad (18)$$

де J — коефіцієнт інерції:

$$J = \frac{2 \cdot \pi \cdot C \cdot l_e \cdot St}{d \cdot (1 - C^2 \cdot \beta^4)}, \quad (19)$$

D — діаметр вимірювального трубопроводу,

St — число Струхалія:

$$St = \frac{f_0 \cdot d}{U}, \quad (20)$$

f_0 — частота основної гармоніки пульсацій,

\overline{U} — середня швидкість потоку в отворі звужувального пристрою:

$$\overline{U} = \frac{4 \cdot q}{\pi \cdot d^2}, \quad (21)$$

q — об'ємна витрата природного газу,

H — коефіцієнт гармонічних спотворень вимірюваного сигналу перепаду тиску:

$$H = \sqrt{\frac{\sum_{r=1}^n r^2 \cdot a_r^2}{\sum_{r=1}^n a_r^2}}, \quad (22)$$

r — номер гармоніки в інтегралі Фур'є,

a_r — амплітуда n -ої гармоніки.

Якщо добуток $H^2 \cdot J^2 \ll 1$, похибка E_T є незначною, і нею можна знехтувати.

За 95 % довірчого рівня розширена відносна невизначеність $U'_{\text{Дв}}$ може бути прийнята рівною відносній похибці E_T .

Потрібно підкреслити, що саме формула (18) дає можливість оцінити невизначеність $U'_{\text{Дв}}$ із урахуванням такої важливої характеристики сигналу перепаду тиску, як відносне середньоквадратичне відхилення $\tilde{\sigma}(\Delta P)$. Тому саме формулу (18) треба застосовувати, для оцінювання цієї невизначеності, взамін формули (Ж.4.4) стандарту [2].

Складова невизначеності $U'_{\text{Дв}}$ може бути обчислена за формулою [2]:

$$U'_{\text{Дв}} = \frac{100}{\Delta p} \sqrt{\frac{\Delta \tau}{\tau_k - \tau_n}} \times \sqrt{\left(\frac{\Delta \tau}{\tau_k - \tau_n} \right) \cdot \sum_{i=1}^n (\Delta p_i - \overline{\Delta p})^2 - \left(\frac{\Delta \tau}{\tau_k - \tau_n - \Delta \tau} \right) \times \sum_{i=1}^{n-1} (\Delta p_i - \overline{\Delta p}) \cdot (\Delta p_{i+1} - \overline{\Delta p})}, \quad (23)$$

де Δp_i — вимірене значення перепаду тиску в i -ій точці на інтервалі $(\tau_k - \tau_n)$ з кроком дискретизації $\Delta \tau$,

$\overline{\Delta p}$ — усереднене значення перепаду тиску на інтервалі $(\tau_k - \tau_n)$,

τ_n — початковий відлік часу вимірювань,

τ_k — кінцевий відлік часу вимірювань,

$\Delta\tau$ — крок дискретизації точок вимірювань.

Якщо $\Delta\tau \leq 1c$, то значення невизначеності є дуже малим, і ним можна знехтувати.

Невизначеність $U'_{\text{Да}}$, пов'язана з динамічними властивостями вимірювального каналу, обчислюють за формулою [2]:

$$U'_{\text{Да}} = (1 - \sqrt{K_a(\tau)}) \cdot 100, \quad (24)$$

де $K_a(\tau)$ — функція нелінійного перетворення каналу вимірювання.

Під час вимірювання витрати природного газу, методом змінного перепаду тиску з використанням автоматизованої системи вимірювання та за умови оцінювання невизначеності $U'_{\text{Ду}}$ за формулою (10), невизначеність $U'_{\text{Да}}$ вже врахована у значенні не-

визначеності $U'_{\text{Ду}}$, тому цю невизначеність потрібно враховувати тільки у випадку вимірювання витрати за використання системи з розділним вимірюванням параметрів потоку.

Для оцінювання складових невизначеності $U'_{\text{Д}}$, які виникають під час вимірювання витрати середовища методом змінного перепаду тиску за умов нестационарного потоку, авторами сформовано масиви значень сигналів перепаду тиску на діафрагмі $\Delta p(\tau)$, графіки яких зображено на рис. 1. Такі сигнали перепаду тиску сформовано для автоматизованої системи вимірювання витрати, в якій застосовано звужувальний пристрій (діафрагму) з відносним діаметром отвору $\beta = 0,47$. Інтервал вимірювання перепаду тиску $(\tau_k - \tau_n) = 4c$, крок дискретизації сигналу $\Delta\tau = 0,04c$.

Для сформованих сигналів перепаду тиску на діафрагмі, обчислено значення відносної середньоквадратичної амплітуди пульсацій $\tilde{\sigma}(\Delta p)$, а також

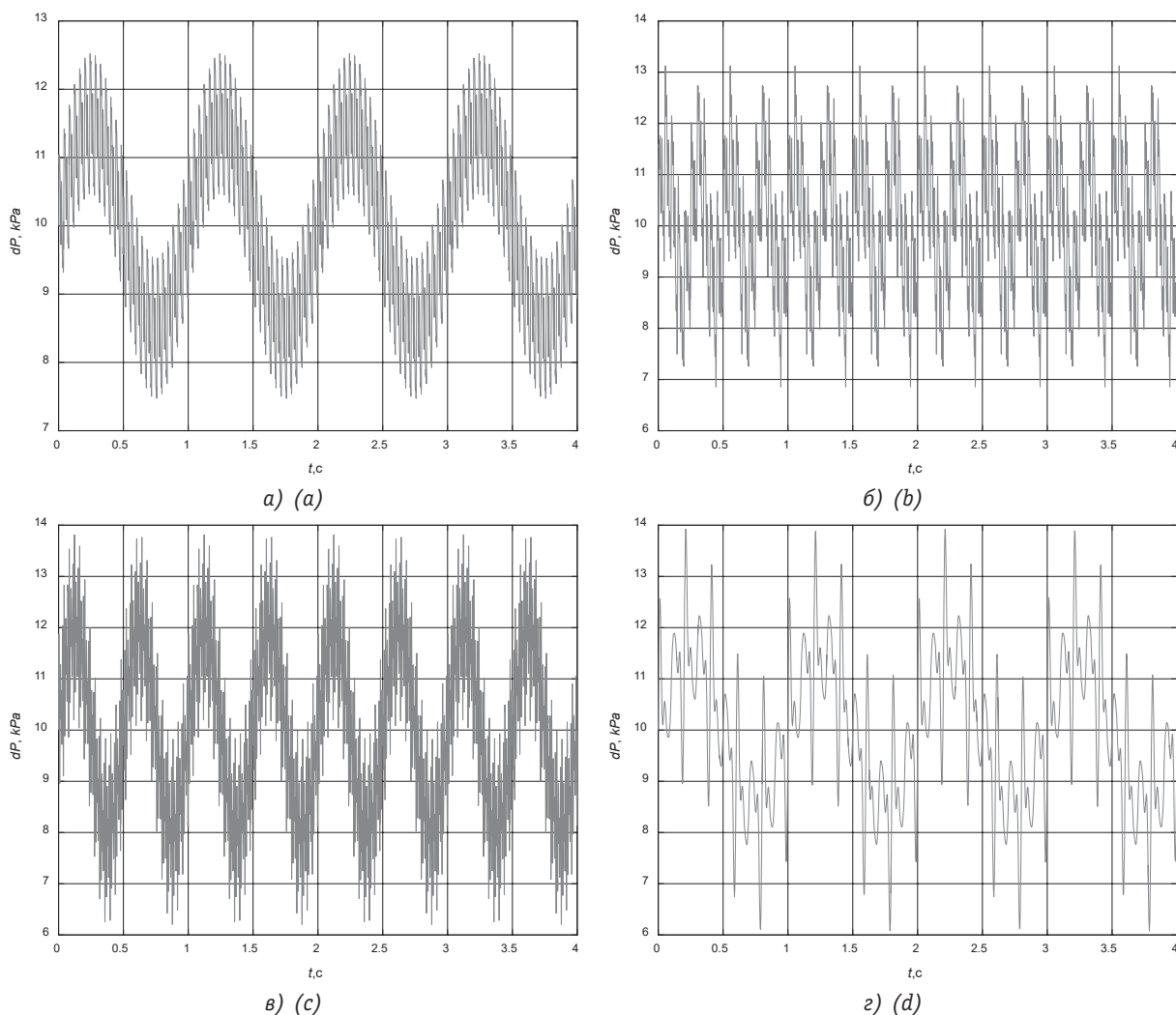


Рис.1. Графіки сигналів перепаду тиску на діафрагмі для різних режимів потоку:

- а) пульсуючого; б) нестационарного з переважанням середньочастотних складових; в) нестационарного з переважанням високочастотних складових; г) нестационарного з переважанням низькочастотних складових
- Fig.1. Diagrams of orifice plate pressure differential signals for different flow modes:
 a) pulsating; b) unsteady with prevalence of mid-frequency components; c) unsteady with prevalence of high-frequency components; d) unsteady with prevalence of low-frequency components

Таблиця 1. Значення відносної середньоквадратичної амплітуди пульсацій та максимального відносного відхилення для сформованих сигналів перепаду тиску

Table 1. The value of the relative root mean square amplitude and the maximum relative deviation for the generated differential pressure signals

| Сигнал перепаду тиску на діафрагмі (рис. 1) | Максимальне відносне відхилення перепаду тиску на діафрагмі $\tilde{\Delta}(\Delta p)$ | Відносна середньоквадратична амплітуда пульсацій $\tilde{\sigma}(\Delta p)$ | Режим протікання середовища відповідно до [2] |
|---|--|---|---|
| Сигнал «1а» | 0,126 | 0,125 | Пульсуючий |
| Сигнал «1б» | 0,157 | 0,135 | Нестаціонарний |
| Сигнал «1в» | 0,190 | 0,168 | Нестаціонарний |
| Сигнал «1г» | 0,196 | 0,146 | Нестаціонарний |

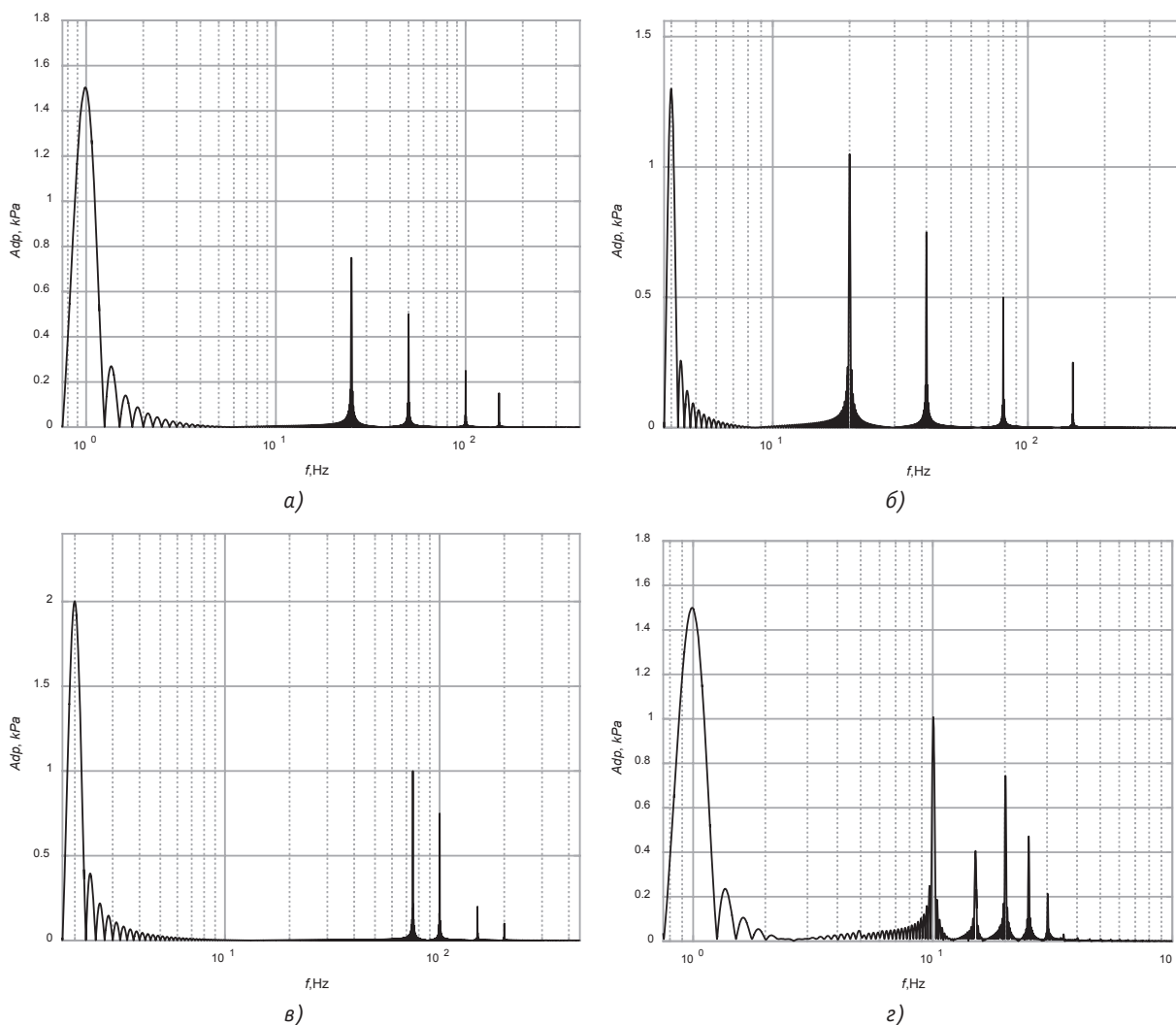


Рис.2. Частотний спектр сигналів перепаду тиску на діафрагмі для різних режимів потоку:

а) пульсуючого; б) нестаціонарного з переважанням середньочастотних складових; в) нестаціонарного з переважанням високочастотних складових; г) нестаціонарного з переважанням низькочастотних складових

Fig.2. Frequency spectrum of the differential pressure signals for different flow modes:
 a) pulsating; b) unsteady with prevalence of mid-frequency components; c) unsteady with prevalence of high-frequency components; d) unsteady with prevalence of low-frequency components

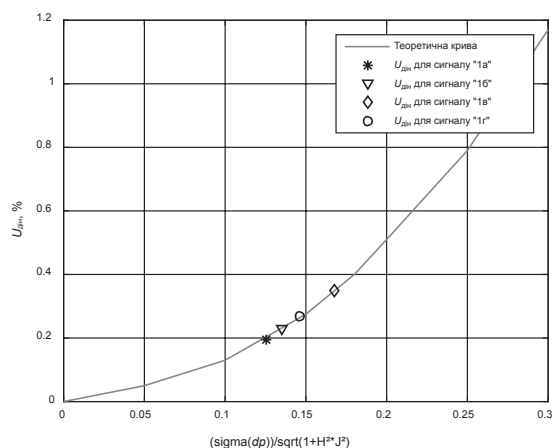


Рис.3. Залежність невизначеності $U'_{\text{Дін}}$ від модифікованої амплітуди пульсації перепаду тиску
Fig.3. The uncertainty $U'_{\text{Дін}}$ via the modified amplitude of the differential pressure pulsations

максимального відносного відхилення перепаду тиску $\tilde{\Delta}(\Delta p)$ (табл. 1).

Як видно із таблиці 1, усі сформовані сигнали перепаду тиску відтворюють нестационарний потік (пульсуючий та нестационарний режими протікання середовища). Відповідно до наведеної вище класифікації складових невизначеності вимірюваного значення витрати, для цих режимів протікання потрібно оцінити такі складові невизначеності:

- невизначеність $U'_{\text{Ду}}$, пов'язану з нелінійною залежністю $q(\tau)$ від $\Delta p(\tau)$; ця невизначеність також містить невизначеність $U'_{\text{Да}}$, оскільки прийнято, що для вимірювання витрати застосовано автоматизовану систему;

- невизначеність $U'_{\text{Дін}}$, пов'язану з відсутністю інерційного члена у підкореновому виразі квазістационарного рівняння витрати.

Невизначеність $U'_{\text{Ду}}$ обчислена за формулою (10) на основі значень перепаду тиску кожного із чотирьох сформованих сигналів перепаду тиску. Отримані значення $U'_{\text{Ду}}$ представлено у таблиці 2.

Для оцінювання невизначеності $U'_{\text{Дін}}$, зокрема, для визначення коефіцієнта гармонічних спотворень сигналу, потрібно отримати частотний спектр сигналу перепаду тиску на діафрагмі. Частотні спектри чотирьох досліджуваних сигналів перепаду тиску, отримані за допомогою функції швидкого перетворення Фур'є пакету *Matlab*, представлено на рис. 2.

Із частотного спектра кожного сигналу визначено кількість гармонік у сигналі, номер кожної гармоніки та її амплітуду. На основі цих характеристик сигналів обчислено коефіцієнт гармонічних спотворень H за формулою (22).

На основі отриманих значень H та значень коефіцієнта інерції J , обчислених за формулами (19)–(21), за формулою (18) обчислено значення похибки E_T , яка дорівнює відносній розширеній невизначеності $U'_{\text{Дін}}$. Отримані значення $U'_{\text{Дін}}$ представлено у табл. 2.

Для перевірки коректності розрахунку невизначеності $U'_{\text{Дін}}$ значення $U'_{\text{Дін}}$, отримані для чотирьох досліджуваних сигналів перепаду тиску, накладено на теоретичну криву залежності невизначеності $U'_{\text{Дін}}$ від модифікованої амплітуди пульсації перепаду тиску $(\tilde{\sigma}(\Delta p))/\sqrt{(1+H^2 \cdot J^2)}$ (рис. 3).

Як видно із рис. 3, отримані для досліджуваних сигналів значення $U'_{\text{Дін}}$ добре узгоджуються з теоретичною кривою, що є свідченням коректності застосування рівняння (18).

Як зазначено вище, додаткова складова невизначеності $U'_{\text{Двмм}}$ є функцією частоти дискретизації сигналу перепаду тиску. В аналізованих прикладах для всіх чотирьох сигналів перепаду тиску застосовано достатньо малий крок дискретизації ($\Delta\tau = 0,04$ с), тому невизначеність $U'_{\text{Двмм}}$ є незначною порівняно з іншими складовими і, відповідно, нею можна знехтувати.

На основі отриманих значень невизначеностей $U'_{\text{Ду}}$, $U'_{\text{Дін}}$ за формулою (8) обчислено значення сумарної невизначеності $U'_{\text{Д}}$ вимірюваного значення витрати середовища за умов нестационарного потоку (табл. 2).

Таблиця 2. Результати оцінювання невизначеності $U'_{\text{Д}}$

Table 2. The results of uncertainty $U'_{\text{Д}}$ evaluation

| Сигнал перепаду тиску (рис. 1) | Невизначеність $U'_{\text{Ду}}$, % | Невизначеність $U'_{\text{Дін}}$, % | Результуюча невизначеність $U'_{\text{Д}}$, % | Поправковий коефіцієнт КД |
|--------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|--|---------------------------|
| Сигнал «1а» | 0,1399 | 0,1964 | 0,2412 | 0,9976 |
| Сигнал «1б» | 0,0777 | 0,2288 | 0,2416 | 0,9976 |
| Сигнал «1в» | 0,0751 | 0,3500 | 0,3580 | 0,9964 |
| Сигнал «1г» | 0,4196 | 0,2667 | 0,4971 | 0,9951 |

Значення коректувального множника K_d , обчислені за формулою (9), також представлено у таблиці 2.

ВИСНОВКИ

За результатами виконаних досліджень встановлено, що нестационарний потік може зумовити появу значної додаткової невизначеності вимірюваного значення витрати. Зокрема, за застосування сучасних автоматизованих систем вимірювання витрати на основі мікропроцесорного обчислювача та витратоміра змінного перепаду тиску за умов нестационарного потоку, потрібно оцінити дві додаткові складові невизначеності: невизначеність U'_{dy} , пов'язану з нелінійною залежністю $q(\tau)$ від $\Delta p(\tau)$, а також невизначеність U'_{din} , пов'язану з відсутністю інерційного члена у підкореному виразі квазістационарного рівняння витрати. Для оцінювання цих невизначеностей необхідне виконання експериментальних досліджень параметрів потоку із застосуванням додаткової приладової системи з малоінерційним перетворювачем перепаду тиску.

Як видно із формул (10), (18), додаткові похибки вимірювання витрати, на основі яких оцінено невизначеності U'_{dy} та U'_{din} , мають додатній знак, тобто під час вимірювання витрати нестационарного потоку виникає завищення вимірюваного значення витрати. Тому зростання додаткової невизначеності U'_d призводить до зменшення поправкового коефіцієнта K_d .

Значення невизначеностей U'_{dy} та U'_{din} , а, відповідно, і додаткової невизначеності U'_d , суттєво залежать від середньоквадратичної амплітуди пульсацій $\tilde{\sigma}(\Delta p)$, а також максимального відносного відхилення перепаду тиску $\tilde{\Delta}(\Delta p)$. Зростання цих характеристик сигналу призводить до зростання складових U'_{dy} та U'_{din} , а, відповідно, і результативної додаткової невизначеності U'_d . Зокрема, у цій роботі виконано аналіз сигналів перепаду тиску, для яких значення $\tilde{\Delta}(\Delta p)$ та $\tilde{\sigma}(\Delta p)$ не перевищують 20 % від

середнього значення перепаду тиску. Такі зміни перепаду тиску призводять до виникнення додаткової складової невизначеності вимірюваного значення витрати, що не перевищує 0,5 %. Однак із рис. 3 видно, що підвищення середньоквадратичної амплітуди пульсацій $\tilde{\sigma}(\Delta p)$ до 28 % призводить до збільшення невизначеності U'_{din} до 1,0 %. У роботі [4] показано, що значенню $\tilde{\sigma}(\Delta p) = 63\%$ відповідає значення $U'_{din} = 5,0\%$, що спричиняє відповідне збільшення результативної додаткової невизначеності U'_d .

Указаним значенням додаткової невизначеності U'_d відповідає значення поправкового коефіцієнта K_d , що суттєво відрізняється від одиниці. Застосування поправкового коефіцієнта K_d є прямим коректуванням вимірюваного значення витрати середовища, а отже, потребує особливо ретельних експериментальних досліджень сигналу перепаду тиску в діючій системі вимірювання витрати газу, а також підтвердження того, що отримане під час досліджень значення невизначеності є умовно постійним протягом тривалого часу експлуатації системи.

Тому авторами пропонується:

- за умови виявлення нестационарності сигналів перепаду тиску, виконати експериментальні дослідження цих сигналів та отримати їх основні характеристики (середньоквадратичну амплітуду пульсацій, максимальне відносне відхилення);
- за отриманими характеристиками сигналів визначити режим протікання середовища; якщо режим не є стаціонарним виявити джерела формування пульсацій чи нестационарності та, за можливості, усунути їх вплив на потік;
- якщо усунути нестационарність потоку не вдається, застосувати методику, розглянуту в цій роботі та стандарті [2] для оцінювання додаткової невизначеності U'_d , зумовленої нестационарністю потоку і, відповідно, коректувати вимірюване значення витрати за допомогою введення поправкового множника K_d , обчисленого за формулою (9) цієї роботи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Пістун Є.П. (2000) Облік та економія природного газу // Нафтова і газова промисловість (Pistun E.P. (2000) Accounting and saving of natural gas // Oil and gas industry). — № 2. — С/Р. 43—47.
2. ДСТУ ГОСТ 8.586.5:2009 Вимірювання витрати та кількості рідини й газу із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. Частина 5. Методика виконання вимірювань. — Київ, Держспоживстандарт України (GOST 8.586.5: 2009 Measurement of flow and amount of liquid and gas using standard tapering devices. Part 5. Measurement methodology. — Kyiv, State Consumer Standard of Ukraine).
3. ISO/TR 3313:1998 Measurement of fluid flow in closed conduits — Guidelines on the effects of flow pulsations on flow-measurement instruments.
4. Gajan P., Mottram R.C., Hebrard P., Andriamihafy H. and Platet B. The influence of pulsating flow on orifice plate flowmeters. Flow Measurement and Instrumentation, 3 (3), 1992, pp. 1118-1129

5. Mateusz Turkowski. Metrologia przeplywow. — Warszawa: Oficyna wydawnicza politechniki warszawskiej, 2018. — 281p. — ISBN 978-83-7814-697-1.
6. ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2009. Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідини і газу із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. Частина 2. Діафрагми. Технічні вимоги (ГОСТ 8.586.2-2005 (ISO 5167-2:2003), IDT; ISO 5167-2:2003, MOD). — Київ, Держспоживстандарт України (GOST 8.586.2:2009. Metrology. Measurement of flow and amount of liquid and gas using standard tapering devices. Part 2. Diaphragms. Technical requirements (GOST 8.586.2-2005 (ISO 5167-2:2003), IDT; ISO 5167-2:2003, MOD). — Kyiv, State Consumer Standard of Ukraine).
7. Костик І. В., Матіко Ф. Д. (2014) Дослідження динамічних характеристик пневматичних ліній вимірювальних перетворювачів тиску // Методи та прилади контролю якості (Kostik I.V., Matiko F.D. (2014) Investigation of dynamic characteristics of pneumatic lines of pressure transducers // Methods and devices of quality control). — № 1. — С/Р. 83—92.
8. Костик І.В., Лесовой Л.В. (2012) Визначення додаткових невизначеностей результату вимірювання витрати середовища в умовах пульсуючого потоку // Збірник тез доповідей одинадцятої міжнародної науково-технічної конференції «Приладобудування: стан і перспективи». 24—25 квітня 2012 р., м. Київ, ПБФ, НТУУ «КПІ» (Kostik I.V., Lesovoy L.V. (2012) Determination of additional uncertainties of the result of measuring the flow rate of the environment in the conditions of a pulsating flow // Collection of abstracts of the eleventh international scientific and technical conference «Instrument making: state and prospects». April 24—25, 2012, Kyiv, PBF, NTUU «KPI»). — С/Р. 245—246.
9. Пистун Е.П. (1985) О погрешностях определения среднесуточного значения расхода газа, измеряемого методом переменного перепада давления // Контрольно-измерительная техника. — Львов (Pistun E.P. (1985) On the errors in determining the average daily gas flow rate measured by the method of variable differential pressure // Control and measuring equipment. — Lviv). — Вып. 37. — С/Р. 11—14.
10. Ф. Матіко, Р. Федоришин, І. Костик, Я. Грень. (2011) Аналіз причин виникнення додаткових похибок витратомірів змінного перепаду тиску в умовах нестационарного потоку // Вісник: Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація (F. Matiko, R. Fedorishin, I. Kostyk, J. Grenier. (2011) Analysis of the causes of additional errors of flowmeters of variable pressure drop in conditions of unsteady flow // Bulletin: Heat and Power Engineering. Environmental Engineering. Automation). — № 677. — С/Р. 79—86. 📄

Отримано / received: 23.03.2020.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. О.Є. Середюком (Україна).
 Prof. O.Ye. Seredyk, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.

DOI: 10.33955/2307-2180(2)2020.34-39

УДК 519.281:621.317.088

РОЗРАХУНОК І ОЦІНКА НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИКИДІВ ЗАБРУДНЮВАЛЬНИХ РЕЧОВИН У НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ

**Calculation and Estimation
of the Uncertainty
of Pollution Emissions
in the Environment**

BY-SA

СТАТТЮ ВИЛУЧЕНО

За результатами аналізу статті В. У. Ігнаткін, Ю. Л. Забулонов, Ю. М. Туз, О. В. Фаррахов

**«РОЗРАХУНОК І ОЦІНКА НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИКИДІВ ЗАБРУДНЮВАЛЬНИХ РЕЧОВИН
У НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ»**

на наявність плагіату статтю вилучено з онлайн видання журналу у відповідності до положень політики протидії плагіату, як таку що містить фактично переклад статті аналогічної назви та змісту, що була надрукована у журналі «Измерительная техника», № 2, 2009, Росія.

THE ARTICLE IS ELLIMINATED

As the result of the article V. U. Ihnatkin, Yu. L. Zabulonov, Yu. M. Tuz, O. V. Farrakhov

**«CALCULATION AND ESTIMATION OF THE UNCERTAINTY OF POLLUTION EMISSIONS IN THE
ENVIRONMENT»**

revision for borrowings from third parties work this article had been elliminated according to the policy of anti-plgiarism as such, that contains, in fact, the complete plagiarism with the similar article published by «Measurement Technics» journal, Russia, N 2, 2009

СТАТТЮ ВИЛУЧЕНО

За результатами аналізу статті В. У. Ігнаткін, Ю. Л. Забулонов, Ю. М. Туз, О. В. Фаррахов
**«РОЗРАХУНОК І ОЦІНКА НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИКИДІВ ЗАБРУДНЮВАЛЬНИХ РЕЧОВИН
У НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ»**

на наявність плагіату статтю вилучено з онлайн видання журналу у відповідності до положень політики протидії плагіату, як таку що містить фактично переклад статті аналогічної назви та змісту, що була надрукована у журналі «Измерительная техника», № 2, 2009, Росія.

THE ARTICLE IS ELLIMINATED

As the result of the article V. U. Ihnatkin, Yu. L. Zabulonov, Yu. M. Tuz, O. V. Farrakhov
**«CALCULATION AND ESTIMATION OF THE UNCERTAINTY OF POLLUTION EMISSIONS IN THE
ENVIRONMENT»**

revision for borrowings from third parties work this article had been elliminated according to the policy of anti-plgiarism as such, that contains, in fact, the complete plagiarism with the similar article published by «Measurement Technics» journal, Russia, N 2, 2009

СТАТТЮ ВИЛУЧЕНО

За результатами аналізу статті В. У. Ігнаткін, Ю. Л. Забулонов, Ю. М. Туз, О. В. Фаррахов

«РОЗРАХУНОК І ОЦІНКА НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИКИДІВ ЗАБРУДНЮВАЛЬНИХ РЕЧОВИН У НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ»

на наявність плагіату статтю вилучено з онлайн видання журналу у відповідності до положень політики протидії плагіату, як таку що містить фактично переклад статті аналогічної назви та змісту, що була надрукована у журналі «Измерительная техника», № 2, 2009, Росія.

THE ARTICLE IS ELLIMINATED

As the result of the article V. U. Ihnatkin, Yu. L. Zabulonov, Yu. M. Tuz, O. V. Farrakhov

«CALCULATION AND ESTIMATION OF THE UNCERTAINTY OF POLLUTION EMISSIONS IN THE ENVIRONMENT»

revision for borrowings from third parties work this article had been elliminated according to the policy of anti-plgiarism as such, that contains, in fact, the complete plagiarism with the similar article published by «Measurement Technics» journal, Russia, N 2, 2009

СТАТТЮ ВИЛУЧЕНО

За результатами аналізу статті В. У. Ігнаткін, Ю. Л. Забулонов, Ю. М. Туз, О. В. Фаррахов
**«РОЗРАХУНОК І ОЦІНКА НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИКИДІВ ЗАБРУДНЮВАЛЬНИХ РЕЧОВИН
У НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ»**

на наявність плагіату статтю вилучено з онлайн видання журналу у відповідності до положень політики протидії плагіату, як таку що містить фактично переклад статті аналогічної назви та змісту, що була надрукована у журналі «Измерительная техника», № 2, 2009, Росія.

THE ARTICLE IS ELLIMINATED

As the result of the article V. U. Ihnatkin, Yu. L. Zabulonov, Yu. M. Tuz, O. V. Farrakhov
**«CALCULATION AND ESTIMATION OF THE UNCERTAINTY OF POLLUTION EMISSIONS IN THE
ENVIRONMENT»**

revision for borrowings from third parties work this article had been elliminated according to the policy of anti-plgiarism as such, that contains, in fact, the complete plagiarism with the similar article published by «Measurement Technics» journal, Russia, N 2, 2009

СТАТТЮ ВИЛУЧЕНО

За результатами аналізу статті В. У. Ігнаткін, Ю. Л. Забулонов, Ю. М. Туз, О. В. Фаррахов

«РОЗРАХУНОК І ОЦІНКА НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИКИДІВ ЗАБРУДНЮВАЛЬНИХ РЕЧОВИН У НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ»

на наявність плагіату статтю вилучено з онлайн видання журналу у відповідності до положень політики протидії плагіату, як таку що містить фактично переклад статті аналогічної назви та змісту, що була надрукована у журналі «Измерительная техника», № 2, 2009, Росія.

THE ARTICLE IS ELLIMINATED

As the result of the article V. U. Ihnatkin, Yu. L. Zabulonov, Yu. M. Tuz, O. V. Farrakhov

«CALCULATION AND ESTIMATION OF THE UNCERTAINTY OF POLLUTION EMISSIONS IN THE ENVIRONMENT»

revision for borrowings from third parties work this article had been elliminated according to the policy of anti-plgiarism as such, that contains, in fact, the complete plagiarism with the similar article published by «Measurement Technics» journal, Russia, N 2, 2009

СТАТТЮ ВИЛУЧЕНО

За результатами аналізу статті В. У. Ігнаткін, Ю. Л. Забулонов, Ю. М. Туз, О. В. Фаррахов
**«РОЗРАХУНОК І ОЦІНКА НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИКИДІВ ЗАБРУДНЮВАЛЬНИХ РЕЧОВИН
У НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ»**

на наявність плагіату статтю вилучено з онлайн видання журналу у відповідності до положень політики протидії плагіату, як таку що містить фактично переклад статті аналогічної назви та змісту, що була надрукована у журналі «Измерительная техника», № 2, 2009, Росія.

THE ARTICLE IS ELLIMINATED

As the result of the article V. U. Ihnatkin, Yu. L. Zabulonov, Yu. M. Tuz, O. V. Farrakhov
**«CALCULATION AND ESTIMATION OF THE UNCERTAINTY OF POLLUTION EMISSIONS IN THE
ENVIRONMENT»**

revision for borrowings from third parties work this article had been elliminated according to the policy of anti-plgiarism as such, that contains, in fact, the complete plagiarism with the similar article published by «Measurement Technics» journal, Russia, N 2, 2009

DOI: 10.33955/2307-2180(2)2020.40-43

УДК 389.1.14

МЕТРОЛОГІЧНА ДІЯЛЬНІСТЬ НА ПІДПРИЄМСТВІ

Metrological Activity At the Enterprise

CC BY-SA

О. М. Дзябенко, головний метролог,
Приватне акціонерне товариство «ФЕД», м. Харків, Україна,
e-mail: dzyabenko@ukr.net

O. M. Dziabenko, chief metrology department,
Joint Stock Company «FED», Kharkiv, Ukraine,
e-mail: dzyabenko@ukr.net

У процесі організації метрологічної діяльності на підприємстві виникає питання: необхідність обов'язкової повірки (метрологічного підтвердження) засобів вимірювальної техніки, які не застосовуються у сфері законодавчо регульованій метрології.

У міжнародних стандартах «Системи управління якістю» (ISO 9001, EN 9100, AQAP-2110) для забезпечення виконання вимог розділу 7.1.5 «Ресурси для моніторингу та вимірювання» встановлюється вимога, що все вимірювальне обладнання, як частина системи управління вимірюванням, повинна мати метрологічне підтвердження відповідно до вимог ISO 10012.

Метрологічне підтвердження передбачає калібрування і верифікацію вимірювального обладнання.

Фахівці лабораторії, які проводять метрологічне підтвердження вимірювального обладнання, встановлюють співвідношення між значеннями величин, що забезпечують еталони, і результатами вимірювань цих величин з використанням вимірювальних приладів (проводять калібрування), на підставі цього співвідношення встановлюють відповідність / невідповідність певного вимірювального обладнання встановленим вимогам (проводять верифікацію) і оформлюють відповідний підтверджувальний документ.

Порівнюючи поняття «метрологічне підтвердження» та «повірка засобів вимірювальної техніки», можна зробити висновок, що метрологічне підтвердження (калібрування та верифікація) вимірювального обладнання — це по суті не що інше, як повірка засобів вимірювальної техніки.

Метрологічна діяльність із забезпечення єдності вимірювань на підприємствах повинна відповідати вимогам ISO 10012: 2003. Цей стандарт установлює загальні вимоги і містить настанови щодо керування процесами вимірювання та метрологічного підтвердження придатності вимірювального обладнання, яке використовують для підтримання і демонстрування відповідності метрологічним вимогам.

Дотримання вимог, викладених у цьому стандарті, дає можливість забезпечення відповідності вимогам до вимірювань і керування процесами вимірювань, встановленими міжнародними стандартами «Системи менеджменту якістю».

When organizing metrological activity at an enterprise, the question arises of the need to organize verification (metrological confirmation) of measuring equipment that is not used in the field of legislatively regulated.

In the international standards «Quality Management Systems» (ISO 9001, EN 9100, AQAP-2110), to ensure that the requirements of Section 7.1.5 «Resources for Monitoring and Measurement» are met, the requirement is established that all measuring equipment, as part of a measurement management system, must have metrological confirmation in accordance with the requirements of ISO 10012.

Metrological confirmation provides for the calibration and verification of measuring equipment.

Laboratory specialists who carry out metrological confirmation of measuring instruments, establish a relationship between the values of the values that provide the standards, and the result of measuring this quantity using measuring instruments (carry out calibration), based on this ratio establish the conformity / non-compliance of the measuring instruments with the established requirements (carry out verification) and draw up the corresponding supporting document.

After comparing the concepts of metrological confirmation and verification of measuring instruments, we can conclude that metrological confirmation (calibration and verification) of measuring equipment is essentially nothing more than verification of measuring instruments.

Metrological activities to ensure the uniformity of measurements in enterprises should comply with the requirements of ISO 10012: 2003. This standard establishes general requirements and contains recommendations for the management of measurement processes and metrological confirmation of the suitability of measuring equipment, which is used to maintain and demonstrate compliance with metrological requirements.

Compliance with the requirements set forth in the ISO 10012 standard makes it possible to ensure compliance with the measurement requirements and the management of measurement processes established by the international standards «Quality Management Systems».

Ключові слова: єдність вимірювань, вимірювальне обладнання, метрологічне підтвердження, калібрування, верифікація, повірка.

Keywords: unity of measurements, measuring equipment, metrological confirmation, calibration, verification.

ВСТУП

Метрологічна діяльність із забезпечення єдності вимірювань спрямована на підвищення безпеки й якості продукції, що випускається, шляхом підвищення точності й достовірності результатів вимірювань на всіх етапах технологічного процесу



© Дзябенко О.М., 2020

виробництва продукції (надання послуг) з впровадженням засобів вимірювальної техніки.

Завдання метрологічної діяльності можна поділити на дві групи:

- завдання забезпечення єдності вимірювань засобів вимірювань, засобів випробувань і засобів контролю (метрологічне підтвердження);
- завдання забезпечення єдності вимірювань виробничих процесів (методи і методики вимірювань).

У процесі організації метрологічної діяльності на підприємстві виникає питання необхідності обов'язкової повірки (метрологічного підтвердження) засобів вимірювальної техніки (ЗВТ), які не застосовуються у сфері законодавчо регульованій метрології.

ТЕРМІНИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ

- Система менеджменту вимірювань (*measurement management system*) — сукупність взаємопов'язаних і взаємодіючих елементів, необхідних для отримання метрологічного підтвердження і контролю процесів вимірювання, пункт 3.5.7 [1];

- метрологічне підтвердження (*metrological confirmation*) — сукупність операцій, необхідних для гарантування того, що вимірювальне обладнання відповідає метрологічним вимогам щодо його використання за призначенням. Метрологічне підтвердження, в цілому, охоплює калібрування і верифікацію, пункт 3.5[2];

- вимірювальне обладнання (*measuring equipment*) — вимірювальний прилад, програмний засіб, еталон одиниці фізичної величини, стандартний зразок або допоміжні прилади чи їх комбінація, необхідні для виконання процесу вимірювання, пункт 3.3 [2];

- калібрування (*calibration*) — сукупність операцій, за допомогою яких за заданих умов на першому етапі встановлюється співвідношення між значеннями величини, що забезпечуються еталонами з притаманними їм невизначеностями вимірювань, та відповідними показами з пов'язаними з ними невизначеностями вимірювань, а на другому етапі ця інформація використовується для встановлення співвідношення для отримання результату вимірювання з показу, пункт 2.39 [3], [4];

- верифікація (*verification*) — приведення об'єктивних свідчень, що певний об'єкт повністю відповідає встановленим вимогам, пункт 2.44 [3];

- повірка засобів вимірювальної техніки — сукупність операцій, що включає перевірку та маркування та/або видачу документа про повірку засобу вимірювальної техніки, які встановлюють і підтверд-

жують, що зазначений засіб відповідає встановленим вимогам [4].

ОСНОВНА ЧАСТИНА

Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність» та інші нормативно-правові акти, що регулюють відносини в цій сфері, не регламентують ніяких вимог до повірки засобів вимірювальної техніки, які не застосовуються у сфері законодавчо регульованій метрології та перебувають в експлуатації.

Разом із тим національні та міжнародні стандарти «Системи менеджменту якості» враховують цей аспект і містять вимоги, наприклад:

- ♦ «... вимірювальне обладнання повинно бути: а) відкаліброваним або перевіреном, або і те й інше, з встановленою періодичністю ...», пункт 7.1.5 [5, 6];

- ♦ «...обладнання для моніторингу та вимірювань включає, в тому числі: випробувальне обладнання, програмне забезпечення, автоматичне випробувальне обладнання (AIO) ..., що використовується з метою підтвердження відповідності продукції», пункт 7.1.5 [6]

- ♦ «... необхідно, щоби все вимірювальне обладнання в рамках системи керування вимірюванням було метрологічно підтверджено», розділ 4 [2];

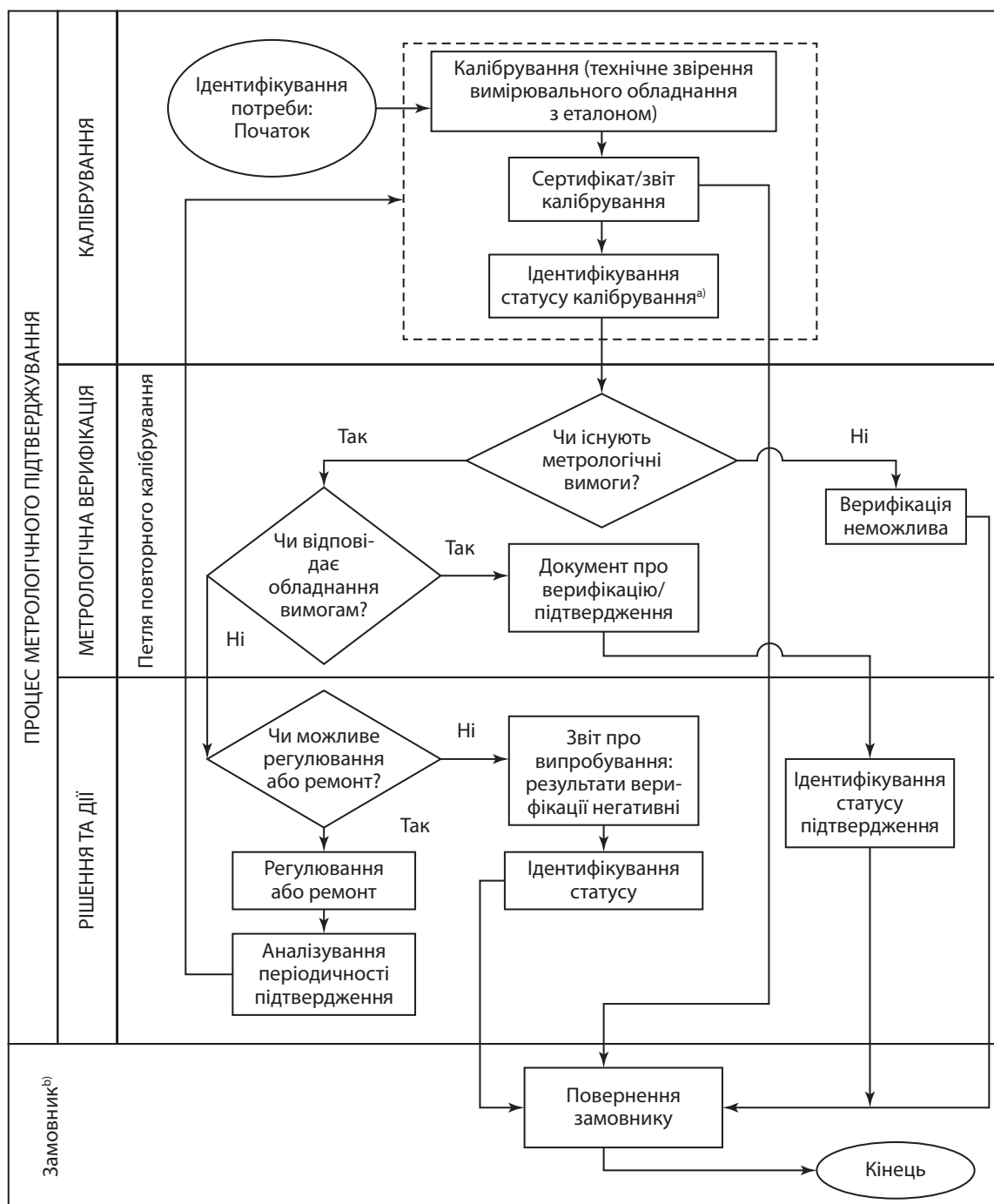
- ♦ «Система вимірювань і калібрування, яка застосовується в рамках контракту, повинна відповідати вимогам ISO 10012: 2003», пункт 5.3.2 [7].

Отже, все вимірювальне обладнання, в рамках системи керування вимірюванням, яке використовується з метою підтвердження відповідності продукції, повинно мати метрологічне підтвердження у відповідності з вимогами ISO 10012, підтвердження того, що вимірювальне обладнання відповідає метрологічним вимогам щодо його використання за призначенням.

Метрологічне підтвердження передбачає калібрування і верифікацію вимірювального обладнання (ЗВТ). Алгоритм дій у ході процесу метрологічного підтвердження наведено на рисунку (Рис. 2 ДСТУ ISO 10012: 2003).

Відповідно до алгоритму (рисунок), фахівці лабораторії, які проводять метрологічне підтвердження ЗВТ, встановлюють співвідношення між значеннями величин, які забезпечують еталони, і результатами вимірювань цих величин з використанням ЗВТ (проводять калібрування); на основі цього співвідношення встановлюють відповідність / невідповідність певного ЗВТ встановленим вимогам (проводять верифікацію) і оформлюють відповідний підтверджувальний документ.

Проведемо порівняння понять метрологічне підтвердження та повірка ЗВТ (таблиця).



Алгоритм процесу метрологічного підтвердження
 Algorithm of the metrological confirmation process

Отже, метрологічне підтвердження (калібрування і верифікація) вимірювального обладнання (ЗВТ) по своїй суті є не що інше як повірка засобу вимірювальної техніки.

Вилучення в 2019 році із Закону України «Про метрологію та метрологічну діяльність» п. 7 статті 17: «... повірка засобів вимірювальної техніки, які не застосовуються у сфері законодавчо регульованої метрології та перебувають в експлуатації, проводиться на добровільних засадах», — призвело до того, що метрологічні центри відмовляються про-

водити перевірку цих засобів вимірювальної техніки, а пропонують різні послуги (перевірку метрологічної справності ЗВТ / протокол вимірювань за результатами перевірки метрологічних характеристик ЗВТ), що тільки вносить плутанину і може призвести до порушення єдності вимірювань.

На відміну від чинного до 2016 року значення терміна «повірка», яка застосовувалася виключно до ЗВТ, які використовувалися в законодавчо регульованій сфері, сучасне визначення «повірка засобів вимірювальної техніки» можна застосувати до всіх

Таблиця

Table

| Метрологічне підтвердження (Рисунок 2 ISO 10012) | Повірка засобів виміральної техніки |
|---|--|
| Калібрування — встановлення співвідношення між значеннями величин, які забезпечують еталони, і відповідними результатами вимірювань цих величин з використанням ЗВТ | сукупність операцій, включаючи перевірку (згідно з методикою повірки) |
| Верифікація — приведення об'єктивних свідчень, що певний об'єкт повністю відповідає встановленим вимогам | установлення і підтвердження що зазначений засіб відповідає встановленим вимогам |
| Документ за результатами верифікації / метрологічного підтвердження | видача документа про повірку засобу вимірювання |

ЗВТ, це визначення не пов'язано зі сферою застосування ЗВТ.


ВИСНОВОК

Метрологічна діяльність із забезпечення єдності вимірювань на підприємствах повинна відповідати вимогам *ISO 10012: 2003*. Цей стандарт установлює загальні вимоги і містить настанови щодо керування процесами вимірювання та метрологічного підтвердження придатності вимірально-го обладнання, яке використовують для підтримання і демонстрування відповідності метрологічним

вимогам. Він установлює вимоги щодо управління якістю системи керування вимірюванням, яку може використовувати організація, що виконує вимірювання, як частину загальної системи керування і для забезпечення виконання метрологічних вимог.

Дотримання вимог, викладених у цьому стандарті, дає можливість забезпечення відповідності вимогам до вимірювань і керування процесами вимірювань, встановленими міжнародними стандартами, наприклад в *ISO 9001* [пункт 7.1.5], *EN 9100* [пункт 7.1.5], *AQAP-2110* [пункт 5.3.2].

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. ДСТУ *ISO 9000: 2015* Системи управління якістю. Основні положення та словник термінів (*ISO 9000: 2015, IDT*) (DSTU ISO 9000: 2015 Quality management systems — Fundamentals and vocabulary).
2. ДСТУ *ISO 10012: 2005* Системи керування вимірюваннями. Вимоги до процесів вимірювання та вимірального обладнання (*ISO 10012: 2003, IDT*) (DSTU ISO 10012:2005, Measurement management systems — Requirements for measurement processes and measuring equipment).
3. *ISO / IEC GUIDE 99: 2007* Международный словарь по метрологии. Основные и общие понятия и соответствующие термины (*VIM*) (*ISO/IEC GUIDE 99:2007 International vocabulary of metrology — Basic and general concepts and associated terms (VIM)*).
4. Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність» № 1314-VII від 5 червня 2014 (Law of Ukraine «On Metrology and Metrological Activity» No. 1314-VII of June 5, 2014).
5. ДСТУ *EN ISO 9001:2018* Системи управління якістю. Вимоги (*EN ISO 9001:2015, IDT; ISO 9001:2015, IDT*) (*ISO 9001:2018 Quality management systems — Requirements*).
6. *EN 9100: 2018* Системи менеджмента качества. Требования для авиационных, космических и оборонных организаций (*EN 9100: 2018 Quality Management Systems. Requirements for Aviation, Space and Defence Organizations*).
7. *AQAP-2110* Требования НАТО к обеспечению качества при проектировании, разработке и производстве (*AQAP 2110 NATO Quality Assurance Requirements for Design, Development and Production*). 

Отримано / received: 20.03.2020.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. І.П. Захаровим (Україна).
Prof. I.P. Zakharov, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.

DOI: 10.33955/2307-2180(2)2020.44-50

УДК 620.179

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕМПЕРАТУРНОГО ФАКТОРУ ЗА ЕКСПРЕС-КОНТРОЛЮ ТЕПЛОТИ ЗГОРАННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

**Research of the Influence
of Temperature Factor on Express Control
of Natural Gas Combustion Heat**



О. Є. Середюк, доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри метрології
та інформаційно-виміральної техніки,
e-mail: zarichna@nung.edu.ua

Н. М. Малісевич, аспірантка кафедри,
e-mail: nat-mal-vit-2007@ukr.net
Івано-Франківський національний технічний
університет нафти і газу, Україна

O. E. Seredyuk, doctor of technical sciences, professor,
head of the department of metrology
and information and measurement engineering,
e-mail: zarichna@nung.edu.ua

N. M. Malisevich, graduate student of the department,
e-mail: nat-mal-vit-2007@ukr.net
Ivano-Frankivsk National Technical University
of Oil and Gas, Ukraine

Досліджено вплив якісного і кількісного складу газових середовищ на температуру полум'я спалюваного газу за різних значень витрати газу і зміни умов його згорання. Розглянуто функціональну схему розробленого лабораторного стенда, який забезпечує дослідження впливу калорійності газу на температуру його згорання. Здійснено комп'ютерне моделювання й отримано апроксимаційні рівняння зміни температури полум'я від умов згорання. Обґрунтовано можливість реалізації пристрою експрес-контролю теплоти згорання природного газу шляхом вимірювання температури полум'я згорання досліджуваних газів.

The article is devoted to the study of the influence of the qualitative and quantitative composition of gas environments on the flame temperature of the combusted gas at different values of gas flow rate and changes volume ratio gas-air in its combustion. The functional scheme of the developed laboratory stand (Fig. 1), which provides temperature measurement during combustion of natural gas or propane-butane mixture, is considered. The design of the developed burner is described and the experimental researches are carried out when measuring the flame temperature of the combusted gas during the operation of the laboratory stand. The operating conditions of different thermocouples in measuring the temperature of the flared gas are investigated (Fig. 2). The temperature instability in the lower and

upper flames was experimentally determined (Fig. 3) and its difference from the reference data [12, 13]. The measurement of the flame temperature with a uncased thermocouple and two thermocouples of different types with protective housings is realized. Methodical error of temperature measurement by different thermocouples was estimated (Fig. 5). An algorithm for the implementation of measurement control in determining the heat of combustion of natural gas according to the patented method is outlined [11]. Experimental studies of temperature changes of combusted gas mixtures at different gas flow rates and different ratios with air, which is additionally supplied for gas combustion, were carried out (Figs. 4, 7). The computer simulation (Figs. 6, 8) of the change in the flame temperature was performed on the basis of the experimental data, which allowed to obtain approximate equations of the functional dependence of the flame temperature on the gas flow rate and the ratio of the additional air and gas consumption. The possibility of realization of the device of express control of the heating value of natural gas by measuring the combustion temperature of the investigated gases, which is based on the experimentally confirmed increase in the flame temperature of the investigated gases with increasing their calorific value, is substantiated (Fig. 9). The necessity of further investigation of the optimization design characteristics of the burner and the operating conditions of combustion of the gases under rapid control of their combustion heat was established (Fig. 9).

Ключові слова: теплота згорання, природний газ, пропан-бутанова суміш, спалювання, температура полум'я, термоперетворювач, експрес-контроль, лабораторний стенд, комп'ютерне моделювання.

Keywords: combustion heat, natural gas, propane-butane mixture, combustion, flame temperature, thermoconverter, express control, laboratory bench, computer simulation.

На сьогодні економіка України вимагає раціонального використання паливно-енергетичних ресурсів, оскільки це є не тільки підходом до їх економії на загальнодержавному рівні, але й джерелом економії грошових затрат у промисловості



О. Є. Середюк



Н. М. Малісевич

та побутової сфері. Вирішення такого завдання вимагає досягнення необхідної точності вимірювань за обліку енергоносіїв, у тому числі природного газу, із застосуванням при цьому сучасних методологічних концепцій, які відповідають міжнародним підходам і нормативним документам. Так, закордонні нормативні документи [1, 2] і національний стандарт України [3] рекомендують здійснювати облік природного газу інформаційно-вимірювальними системами в одиницях енергії. Для цього необхідно вимірювати не тільки об'єм спожитого природного газу, але й враховувати його теплоту згорання, що також повинно безпосередньо впливати на його вартість. Такий підхід потребує запровадження ефективних систем обліку та контролю якості природного газу [4], які на сьогодні потребують необхідного розвитку і становлення. Однак на сьогодні відсутні методики або нормативні документи, які би дозволяли коригувати вартість оплати з урахуванням якості, насамперед калорійності, спожитого природного газу. Визначення калорійності природного газу, яке проводиться на основі хроматографічного аналізу хімічними лабораторіями газопостачальних компаній не рідше одного разу на тиждень, не забезпечує оперативного контролю за якістю природного газу, в тому числі безпосередньо у споживачів. Це пов'язано з можливістю подавання газу від різних джерел (наприклад, за кільцевої системи газопостачання), а також часових змін якості газу протягом інтервалу відбору проб для хроматографічного аналізу газу. Ці фактори не сприяють підвищенню точності обліку природного газу в одиницях енергії. Тому актуальним є розроблення портативних пристроїв для експрес-контролю теплоти згорання газу безпосередньо у споживачів.

Згідно зі стандартом [3] для визначення теплоти згорання природного газу можна застосовувати прямі й непрямі методи. Прямі методи передбачають використання вимірювальних пристроїв, у яких проводять спалювання газу і визначають кількість енергії, що утворилася внаслідок цього. Непрямі методи передбачають визначення теплоти згорання природного газу переважно розрахунковими методами з урахуванням відомого компонентного складу природного газу. Спалювання газу при цьому не відбувається.

Найбільш поширеним непрямим методом визначення теплоти згорання природного газу є розрахунковий метод [5, 6], що базується на використанні даних стосовно компонентного складу природного газу, отриманих за допомогою хроматографічного аналізу. Хроматографи, в основному, є лабораторни-

ми засобами і застосовуються у відповідних підрозділах газотранспортних і газопостачальних організацій для періодичного і поточного контролю якості природного газу [7].

Однак застосування хроматографічного методу для визначення теплоти згорання природного газу не може бути реалізовано під час виконання вимірювань безпосередньо у промислових чи побутових споживачів.

Вивчення сучасних технічних рішень у сфері вимірювання теплоти згорання природного газу [8] засвідчило, що наявною є обмежена кількість принципів підходів і схемних рішень для апаратного експрес-контролю якості природного газу безпосередньо у газоспоживачів, серед яких можуть бути конкретизованими [9—11]. Оскільки немає даних стосовно результатів метрологічної атестації чи дослідного або серійного виготовлення вимірювальних засобів на базі будь-якого із зазначених технічних підходів, то актуальним є проведення експериментальних досліджень у сфері практичної реалізації методу експрес-контролю [11], який запропонований авторами цієї публікації. Актуальність дослідження саме такого підходу, на відміну від [9, 10], дозволяє враховувати прямим методом вплив вологи чи інших неспалюваних компонентів у складі природного газу на визначення його нижчої теплоти згорання. Водночас достатньо складним технічним завданням є вимірювання температури полум'я спалюваного газу, що практично не відображено у відомих наукових публікаціях.

Вивчення довідкових документів, нормативних і літературних джерел засвідчило відсутність конкретних нормованих температурних факторів, які би характеризували температуру полум'я в процесі згорання природного газу, який формує його енергопродуктивність, оскільки є сумішшю цих компонентів з непостійними об'ємними співвідношеннями. Також виявлено, що температура спалювання газу залежить від умов спалювання (параметрів навколишнього середовища), від кількості повітря, яке бере участь у горінні, а також від конструктивного виконання пальника. Так, за даними стандарту [12], температура полум'я метану за згорання у середовищі кисню за стандартних умов становить 2045 °С, а пропану — 2110 °С. За використання полум'я спалюваного газу в обладнанні для зварювання може розвиватися температура за згорання природного газу (2100...2200) °С і відповідно окремих його компонентів: метану (2043...2200) °С, пропану (2110...2500) °С, бутану (2118...2500) °С [13]. Тому також необхідно оцінити фактичну температуру

полум'я спалюваного газу за умов реалізації пристрою для експрес-контролю теплоти згорання природного газу [11].

Метою роботи є дослідження впливу температурного фактору на функціонування пристрою для експрес-контролю теплоти згорання природного газу за використання температури полум'я як інформативного параметра.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Авторами запропоновано спосіб визначення теплоти згорання природного газу за його температурою спалювання [11]. У процесі реалізації способу повинно забезпечуватися згорання суміші заданого об'ємного співвідношення досліджуваного газу з повітрям із застосуванням пальника спеціальної конструкції. Попередньо необхідно встановити градувальну характеристику засобу вимірювання як функціональну залежність теплоти згорання природного газу від температури полум'я пальника.

Алгоритм реалізації вимірювального контролю під час визначення теплоти згорання природного газу на основі запропонованої фізичної моделі записується формулою:

$$H_c = \frac{(A \cdot T - B \cdot K_i \cdot \varphi \cdot q_c \cdot \tau)}{q_c \cdot \tau}, \quad (1)$$

де H_c — нижча теплота згорання природного газу за стандартних умов, Дж/м³; A — коефіцієнт конструктивного виконання пальника, Дж/К; T — вимірювана температура полум'я пальника, °С; B — питома теплота пароутворення води, яка визначається вологістю повітря, яке бере участь у спалюванні газу, Дж/кг; K_i — коефіцієнт співвідношення об'ємів повітря і досліджуваного газу у пальнику, м³/м³; φ — абсолютна вологість повітря навколишнього середовища, кг/м³; q_c — об'ємна витрата газу в пальнику за стандартних умов, м³/год; τ — тривалість пропуску об'єму газу через пальник, с.

Значення коефіцієнта конструктивного виконання пальника A необхідно визначати експериментальним методом під час попереднього калібрування пристрою експрес-контролю теплоти згорання природного газу щонайменше на трьох його сумішах відомої теплоти згорання як функцію від робочих параметрів згорання газу.

Алгоритм (1) реалізації методу експрес-контролю теплоти згорання природного газу є наближеним, оскільки передбачається експериментальне визначення коефіцієнта A за згорання газоповітряної суміші за певного їх співвідношення. Тобто цей коефіцієнт є функціонально залежним від співвідношення газ-повітря і безпосередньо від витрати газу в паль-

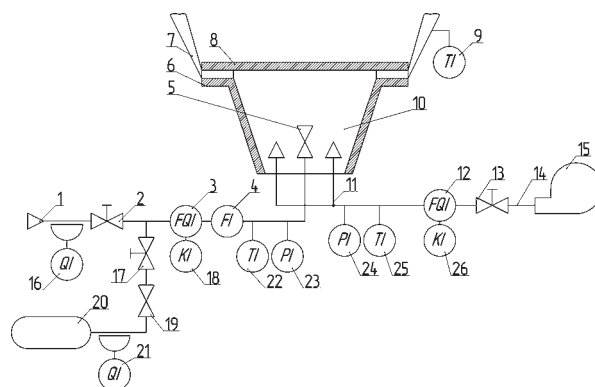


Рис. 1. Функціональна схема лабораторного стенда для дослідження температурного фактору за спалювання газу

Fig. 1. Functional diagram of the laboratory stand for the study of the temperature factor for gas combustion

нику, а також робочих параметрів умов згорання газу. Тому необхідно експериментально дослідити закономірності зміни температури полум'я за змінних параметрів умов згорання газу.

Розроблений лабораторний стенд (рис. 1) містить пальник у виді конструктивно вдосконаленої атмосферної горілки з технологічною можливістю подавання спалюваного газу і додаткового повітря для регулювання умов спалювання. Для досліджень вибрано пальник з камерою 10 змішування повітря з природним газом, яка утворена розсікачем 6 полум'я і кришкою 8 розсікача діаметром 80 мм. У камері 10 міститься торцевий звужувальний пристрій (сопло) 5, до якого подається природний газ від газової мережі гнучким трубопроводом 1 з регулюванням витрати за допомогою дросельного вентиля 2. Витрата газу у пальнику контролюється ротаметром 4 моделі РС-3А і обчислюється за допомогою побутового лічильника газу 3 моделі Premagas BK, типорозміру G1,6 і хронометра 18. Тиск газу в лінії перед соплом 5 вимірюється давачем надлишкового тиску 18 типу ROSEMOUNT моделі 2024 (верхній діапазон вимірювання 10 кПа) з вторинним цифровим приладом. Температура газу вимірюється цифровим термометром 23 моделі DS18B20. Лабораторний стенд передбачає можливість під'єднання балона 20 зі стиснутим природним або скрапленим газом з відомими фізико-хімічними показниками. У вихідній лінії балона 20 розміщено перекривний кран 19 і дросельний вентиль 17 подавання газу в технологічну лінію до камери 10. Витрата додаткового повітря для спалювання газу у лінії 14 формується повітродувкою 15 і дросельним вентилям 13. Додаткове повітря для кращого змішування зі спалюваним газом подається за допомогою декількох (у конструкції використаної горілки чотирьох)

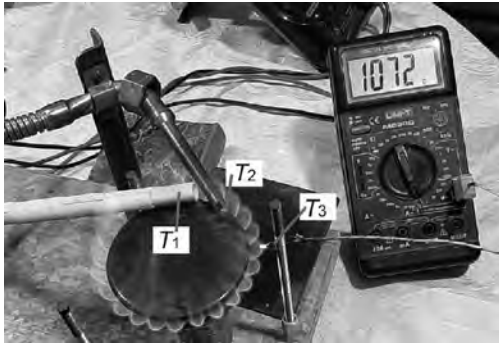


Рис. 2. Ілюстрація вимірювання температури полум'я трьома типами термоперетворювачів
Fig. 2. An illustration of the measurement of flame temperature by three types of thermocouples

паралельних вхідних патрубків 11. Витрата повітря в лінії 14 обчислюється за допомогою побутового лічильника газу 12 моделі *Premagas BK*, типорозміру *G1,6* і хронометра 26. У складі лабораторного стенда передбачена можливість застосування пробовідбірників газу 16 і 21 для лабораторного визначення за допомогою хроматографа фізико-хімічних параметрів газу, який використовується під час проведення експериментів. Для вимірювання температури полум'я 7 спалюваного газу використовуються термометри 9.

У процесі досліджень для вимірювання температури полум'я використовувалися три види високотемпературних датчиків: термопара типу К (хромель-алюмель) у захисному керамічному корпусі (T_1), термопара типу НК-СА (нікель-копель — спеціальний алюмель) у захисному металевому корпусі (T_2) та мініатюрний температурний зонд типу К (хромель-алюмель) загального призначення з відкритим контактом моделі TP-10 (T_3) для роботи з цифровим мультиметром моделі *UNI-T M890G* [14], що ілюструється на рис. 2.

Методологічний аспект вимірювання температури передбачав урахування умов спалювання досліджуваного газу. Для цього інформація стосовно витрати газу та додаткового повітря під час досліджень, які були отримані за робочих умов функціонування лабораторного стенда, зводилися до стандартних умов за формулами:

$$q_{ГC} = q_{Г} \cdot \frac{p_{Г}}{p_{C}} \cdot \frac{T_{C}}{T_{Г}} \cdot \frac{1}{K_{Г}}, \quad (2)$$

$$q_{ПДC} = q_{ПД} \cdot \frac{p_{ПД}}{p_{C}} \cdot \frac{T_{C}}{T_{ПД}} \cdot \frac{1}{K_{ПД}}, \quad (3)$$

де $q_{ГC}$ і $q_{ПДC}$ — витрати газу і додаткового повітря за стандартних умов відповідно, $q_{Г}$ і $q_{ПД}$ — витрати газу і додаткового повітря за робочих умов відповідно, $p_{Г}$ і $T_{Г}$ — абсолютний тиск і абсолютна температура газу перед соплом пальника відповідно, $p_{ПД}$

і $T_{ПД}$ — абсолютний тиск і абсолютна температура додаткового повітря у змішувачі пальника (на виході сопла) відповідно, p_{C} і T_{C} — значення стандартного тиску і стандартної температури відповідно, $K_{Г}$ і $K_{ПД}$ — коефіцієнти стисливості газу і повітря відповідно.

Коефіцієнт співвідношення витрат додаткового повітря і газу γ розраховувався за формулою:

$$\gamma = q_{ПДC} / q_{ГC}. \quad (4)$$

Спочатку було проведено вимірювання температури полум'я, використовуючи датчик температури T_3 (термопара хромель-алюмель) без захисного кожуха. Температура полум'я вимірювалася в двох точках: внизу біля виходу з пальника $T_{Н}$ та у верхній частині полум'я — $T_{В}$. При цьому витрата природного газу змінювалася від 0,1 до 0,36 м³/год за умови подавання постійної витрати додаткового повітря $q_{ПДC} = 0,55$ м³/год (рис. 3).

Вимірювання температури полум'я мініатюрним безкорпусним зондом характеризується суттєвим розкидом (100...200) °С внизу і вверху полум'я за різних витрат газу, що практично унеможливило достовірно вимірювати температуру полум'я. Тому наведені на рис. 3 результати є усередненими, оскільки в кожній точці розкид вимірювання містився в діапазоні, близькому до $\pm(40...50)$ °С. Водночас отримані значення температури спалювання суттєво відрізняються від даних із [12, 13], оскільки проведені експерименти стосувалися згорання газу в середовищі повітря, а не в середовищі кисню.

Отримані результати вимірювання обґрунтовують доцільність вимірювання температури полум'я за допомогою датчиків T_1 і T_2 із захисними кожухами, які можна розміщувати безпосередньо у полум'ї спалюваного газу, що ілюстровано на рис. 2.

З метою визначення можливої методичної похибки вимірювання температури термопарами T_1 і T_2 , внаслідок деякої неідентичності процесів теплообміну за обтікання кожухів термопар полум'ям газу, були проведені одночасні вимірювання двома термопарами.

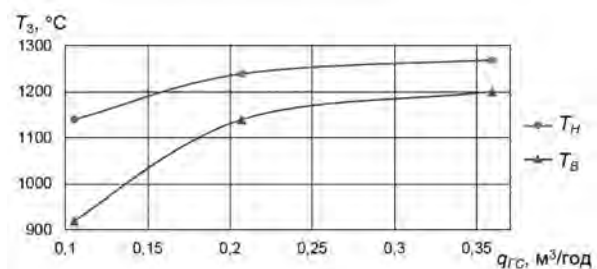


Рис. 3. Зміна температури в нижній $T_{Н}$ і верхній $T_{В}$ частинах полум'я
Fig. 3. Changing the temperature in the lower $T_{Н}$ and upper $T_{В}$ flames

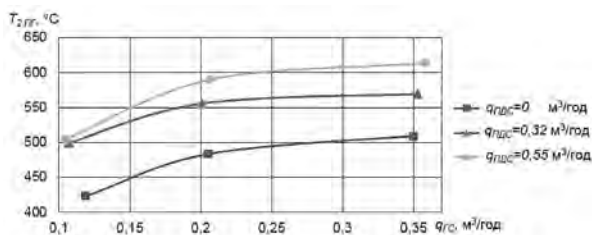


Рис. 4. Зміна температури згорання природного газу за вимірювання термопарою T_2 залежно від його витрати q_{GS} і витрати додаткового повітря q_{PDS}
 Fig. 4. Changing the combustion temperature of natural gas by measuring the thermocouple T_2 depending on its flow q_{GS} and flow rate of additional air q_{PDS}

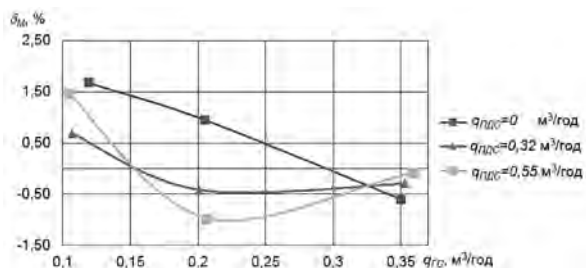


Рис. 5. Зміна методичної похибки від витрати газу і умов спалювання за вимірювання температури полум'я термопарами T_1 і T_2
 Fig. 5. Changing the methodical error from gas flow and combustion conditions for measuring the flame temperature by thermocouples T_1 and T_2

Результати вимірювання термопарою T_2 , за спалювання природного газу теплотворної здатності $35,3 \text{ МДж/м}^3$, наведено на рис. 4, а зміну похибки за цих умов, за вимірювання термопарою T_1 відносно T_2 , наведено на рис. 5.

Наведені залежності на рис. 4, 5 побудовані за умов відсутності витрати додаткового повітря $q_{PDS} = 0 \text{ м}^3/\text{год}$ і двох фіксованих витратах додаткового повітря $q_{PDS} = 0,32$ і $0,55 \text{ м}^3/\text{год}$. Графіки ілюструють зростання температури полум'я спалюваного газу із зростанням як витрати газу, так і витрати додаткового повітря. Однак залежності є нелінійними, і більший вплив на зміну температури полум'я виявлено за малих витрат газу, тобто менших від $0,2 \text{ м}^3/\text{год}$. Навіть за відсутності додаткового повітря ця закономірність є близькою до умов із наявністю додаткового повітря, оскільки в процесі згорання бере участь кисень із навколишнього повітря, який змішується з газом безпосередньо на виході розсікача полум'я. Більша стабілізація наведених залежностей за витрат понад $0,2 \text{ м}^3/\text{год}$ свідчить стосовно зменшення впливу витрати газу на температуру полум'я, що вказує на можливість вибору економічної та раціональної витрати у пальнику за контролю калорійності природного газу. Також було встановлено появу оранжевих язиків у полум'ї за зменшен-

ня витрати використуваного додаткового повітря. При цьому зростання інтенсивності забарвлення полум'я в оранжевий колір за однакової витрати газу свідчить стосовно нижчої температури згорання газу, що характеризує зниження ефективності використання газового обладнання, тобто зниження його теплогенерації.

Рис. 5 характеризує стосовно неперевіщення похибки $1,6 \%$ результатів вимірювання температури одночасно двома термопарами, причому за більших витрат газу ця похибка суттєво зменшується і за витрат газу $0,35 \text{ м}^3/\text{год}$ не перевищує $0,5 \%$.

Під час побудови залежностей на рис. 4, внаслідок різних значень витрати газу, коефіцієнт γ був змінним. Разом із тим для функціонування пристрою експрес-контролю потрібно дотримувати постійне співвідношення компонентів газо-повітряної суміші. Тому, використовуючи базу експериментально отриманих даних, здійснено моделювання температурного параметра за різних витрат газу та різних значень коефіцієнта γ (рис. 6).

Результати моделювання вказують на нелінійну закономірність зростання температури полум'я зі збільшенням як витрати газу, так і коефіцієнта γ і характеризують відносно наявності оптимізаційного виду досліджуваних характеристик.

Отримане апроксимаційне рівняння по двох змінних записується у виді:

$$T_{2ПГ} = 292,4 + 1363 \cdot q_{GS} + 32,24 \cdot \gamma - 2122 \cdot q_{GS}^2 + 107,6 \cdot q_{GS} \cdot \gamma - 5,015 \cdot \gamma^2, \quad (5)$$

де $T_{2ПГ}$ — температура полум'я за згорання природного газу, $^{\circ}\text{C}$; q_{GS} — витрата природного газу, $\text{м}^3/\text{год}$; γ — коефіцієнт співвідношення витрат додаткового повітря і газу, $\text{м}^3/\text{м}^3$.

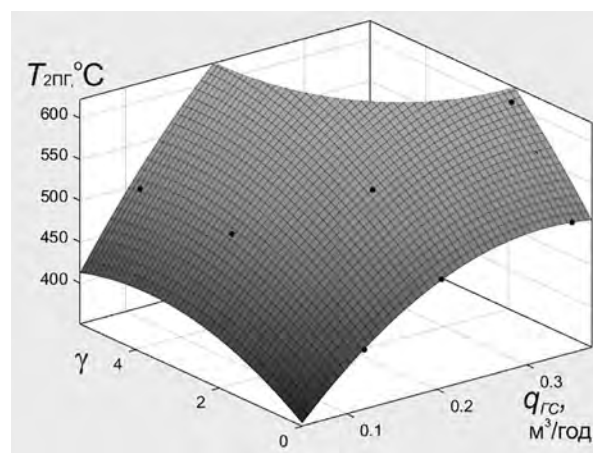


Рис. 6. Моделювання зміни температури полум'я T_2 від витрати q_{GS} природного газу та коефіцієнта γ
 Fig. 6. Simulation of the change in the flame temperature T_2 from the consumption of natural gas q_{GS} and the coefficient γ

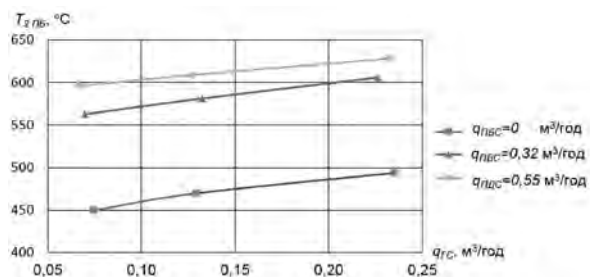


Рис. 7. Зміна температури згорання пропан-бутанової газової суміші за вимірювання термопарою $T_{2ПБ}$ залежно від її витрати $q_{ГС}$ і витрати додаткового повітря $q_{ПДС}$

Fig. 7. The change in the combustion temperature of the propane-butane gas mixture by measuring the thermocouple T_{2PG} depending on its flow q_{GS} and the flow rate of additional air q_{PDS}

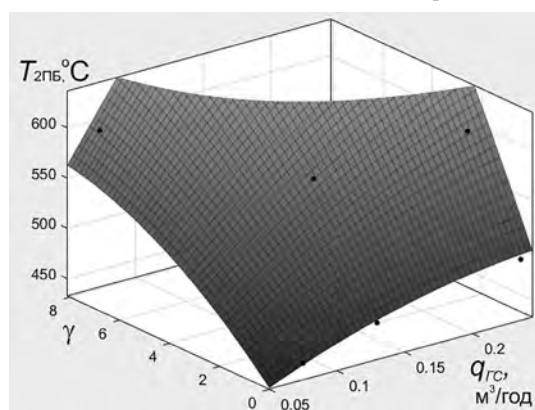


Рис. 8. Моделювання зміни температури полум'я $T_{2ПБ}$ від витрати $q_{ГС}$ пропан-бутанової газової суміші та коефіцієнта γ

Fig. 8. Simulation of the change in the flame temperature of T_{2PB} from the consumption of q_{GS} of propane-butane gas mixture and the coefficient γ

Результати експериментальних досліджень, які проведені за спалювання пропан-бутанової суміші скрапленого газу калорійністю 46,8 МДж/кг, наведено на рис. 7, а комп'ютерне моделювання за цих умов подано на рис. 8.

У цілому закономірності зміни температури полум'я є подібними до проведених досліджень на природному газі. Разом із цим температура полум'я для пропан-бутанової суміші, за однакових умов згорання, є вищою, а діапазон вимірюваних витрат парів газу є меншим, оскільки отвір сопла у пальнику горілки не змінювався.

Отримане апроксимаційне рівняння для пропан-бутанової суміші записується:

$$T_{2ПБ} = 402,6 + 704,5 \cdot q_{ГС} + 17,55 \cdot \gamma - 1257 \cdot q_{ГС}^2 + 182,2 \cdot q_{ГС} \cdot \gamma - 1,338 \cdot \gamma^2, \quad (6)$$

де $T_{2ПБ}$ — температура полум'я за згорання пропан-бутанової газової суміші, °C; $q_{ГС}$ — витрата природного газу, м³/год; γ — коефіцієнт співвідношення витрат додаткового повітря і газу, м³/м³.

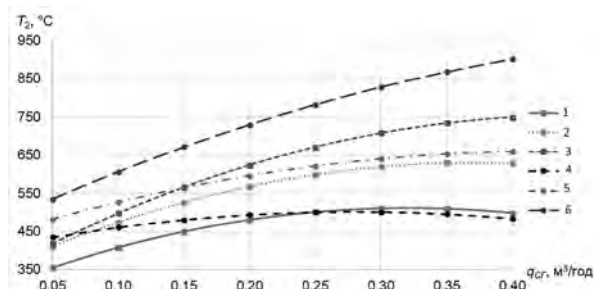


Рис. 9. Графічна ілюстрація зміни температури полум'я за спалювання природного газу (криві 1, 2, 3 за $\gamma = 0, 2, 5$ відповідно) і пропан-бутанової суміші (криві 4, 5, 6 за $\gamma = 0, 2, 5$ відповідно)

Fig. 9. Graphic illustration of the change in flame temperature for natural gas combustion (curves 1, 2, 3 for $\gamma = 0, 2, 5$ respectively) and propane-butane mixture (curves 4, 5, 6 for $\gamma = 0, 2, 5$ in accordance)

Отримані залежності (5, 6) дозволяють здійснити графічну ілюстрацію (рис. 9) впливу калорійності газу на температуру полум'я за його спалювання. Вони свідчать стосовно більшої температури полум'я пропан-бутанової суміші порівняно із температурою згорання природного газу за наявності суттєвої витрати ($\gamma = 5$) додаткового повітря, що відображають криві 3 і 6. Водночас за $\gamma = 2$ (криві 2 і 5) цей вплив є суттєво меншим, а за відсутності додаткового повітря, тобто $\gamma = 0$ (криві 1 і 4) закономірність впливу калорійності на температуру спалювання практично не виявлено. Це свідчить стосовно необхідності проведення додаткових досліджень з метою конструктивного вдосконалення пальника і вибору оптимального режиму його функціонування за контролю теплоти згорання природного газу.


ВИСНОВКИ

Здійснено вимірювання фактичної температури полум'я за умов лабораторного стенда і встановлено відмінність цієї температури полум'я від довідкових даних. Досліджено нерівномірність температури полум'я вздовж його висоти, яка може сягати до 200 °C, що виявлено вимірюванням за допомогою мініатюрного безкорпусного температурного зонда. Виявлено можливість вимірювання температури полум'я термоперетворювачами із захисними кожухами і потрібним наступним її коригуванням до фактичного значення за реалізації алгоритму методу експрес-контролю теплоти згорання природного газу. Оцінено кількісне значення методичної похибки за застосування різних термоперетворювачів із захисними кожухами, яке не перевищує $\pm 1,6$ %. Обґрунтовано можливість реалізації пристрою експрес-контролю теплоти згорання природного газу шляхом використання інформативного

параметра — температури згорання досліджуваних газів. Експериментально підтверджено зростання температури полум'я досліджуваних газів зі зростанням їх теплоти згорання. Установлено необхід-

ність подальшого дослідження оптимізаційних конструктивних характеристик пальників і робочих умов спалювання досліджуваних газів для проведення експрес-контролю їх теплоти згорання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

- ISO 15112:2007. Natural Gas — Energy determination.
- EN 1776:2015. Gas infrastructure. Gas measuring systems. Functional requirements
- ДСТУ ISO 15112:2009. Природний газ. Визначення енергії.[Чинний від 2011-01-01]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2011. 53 с. (DSTU ISO 15112: 2009. Natural gas. Determination of energy [Valid from 2011-01-01]. Kind. offic. Kyiv: State Consumer Standard of Ukraine, 2011. 53 p.).
- Власюк Я.М., Коробко І.В. (2019) Розвиток і становлення ефективних систем обліку та контролю якості природного газу. Нафтогазова галузь України (Vlasyuk Y.M., Korobko I.V. (2019) Development and development of efficient natural gas metering and quality control systems. Oil and gas industry of Ukraine). №2. — С/Р. 36—41.
- ГОСТ 22667-82. Газы горючие природные. Расчетный метод определения теплоты сгорания, относительной плотности и числа Воббе. [Введен с 1983-07-01]. Изд. офиц. Москва : Изд-во стандартов, 2006. 3 с. (GOST 22667-82. Natural gas. Estimated method for determining combustion heat, relative density and Wobbe number. [Introduced from 1983-07-01]. Ed. offic. Moscow: Standards Publishing House, 2006. 3 p.).
- ГОСТ 30319.1-96. Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение физических свойств природного газа, его компонентов и продуктов его переработки. [Введен с 2000-01-01]. Изд. офиц. Київ: Госстандарт Украины, 1999. 16 с. (GOST 30319.1-96. Natural gas. Methods for calculating physical properties. Determination of physical properties of natural gas, its components and products of its processing. [Introduced from 2000-01-01]. Ed. offic. Kyiv: Gosstandart of Ukraine, 1999. 16 p.).
- Як це працює. Енергетичні одиниці замість кубометрів газу (How it works. Energy units instead of cubic meters of gas). 104.ua : веб-сайт. URL: <https://104.ua/ua/analytics/id/jak-ce-pracjuje.-energetichni-odinici-zamist-kubom-21751> (дата звернення: 27.02.2020).
- Середюк О.Є., Малісевич Н.М. (2018) Аналіз патенто-захищених технічних рішень у сфері визначення теплоти згорання природного газу. Методи та прилади контролю якості. (Seredyuk O.E., Malisevich N.M. (2018) Analysis of patented technical solutions in the field of determination of natural gas combustion heat. Quality control methods and instruments) №1 (40). С/Р. 58—69.
- Спосіб оперативного визначення теплоти згорання газоподібних палив / Большаков В.І., Полевий Г.А., Прокопенко П.Г., Жилка О.І. : пат. 84975 С2 Україна. № а200703615; заявл. 02.04.07; опубл. 10.12.08; Бюл. № 23. 4 с. (Method of operative determination of combustion heat of gaseous fuels / Bolshakov V.I., Polevy G.A., Prokopenko P.G., Zhilka O.I.: Pat. 84975 C2 Ukraine. № а200703615; claimed 02.04.07; publ. 10.12.08; Bul. № 23. 4 p.).
- Спосіб експрес-визначення теплоти згорання природного газу / Карпаш О.М., Дарвай І.Я., Карпаш М.О. [та ін.] : пат. 92846 С2 Україна. № а200905201; заявл. 25.05.09; опубл. 10.12.10; Бюл. № 23. 6 с. (A method of express determination of the combustion heat of natural gas / Karpash O.M., Darvai I.Y., Karpash M.O. [and others]: Pat. 92846 C2 Ukraine. No. а200905201; claimed 25.05.09; publ. 10.12.10; Bul. № 23. 6 p.).
- Спосіб експрес-визначення теплоти згорання природного газу / Середюк О.Є., Лютенко Т.В, Малісевич Н.М.: пат. 112737 С2 Україна. № а201512215; заявл. 09.12.2015; опубл. 10.10.2016; Бюл. № 19. 7 с. (A method of express determination of the heat of combustion of natural gas / Seredyuk O.E., Lyutenko T.V., Malisevich N.M.: pat. 112737 C2 Ukraine. № а201512215; claimed 09.12.2015; publ. 10/10/2016; Bul. № 19. 7 p.).
- ГОСТ Р 56021-2014. Газ горючий природный сжиженный. Топливо для двигателей внутреннего сгорания и энергетических установок. Технические условия. Изд. офиц. Москва : Стандартинформ, 2014. 16 с. (GOST R 56021-2014. Natural combustible gas. Fuel for internal combustion engines and power plants. Technical conditions Ed. official Moscow: Standartinform, 2014.16 s.).
- Свойства и характеристики горючих газов (Properties and characteristics of combustible gases). Svarpost : веб-сайт. URL: <http://www.svarpost.ru/stati/54-svoystva-i-kharakteristiki-goryuchikh-gazov.html> (дата звернення: 15.02.2020).
- Термопара Ezodo TP-10. Маркет вимірювальних приладів «SIMVOLT» (Ezodo TP-10 thermocouple. SIMVOLT measuring devices market): веб-сайт. URL: <https://simvolt.ua/termopara-ezodo-tp-10.html> (дата звернення: 15.02.2020). 

Отримано / received: 01.03.2020.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. Ф.Д. Матіком (Україна).
Prof. F.D. Matiko, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.

DOI: 10.33955/2307-2180(2)2020.51-56

УДК 621.3

КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ГЕТЕРОГЕННОЙ СРЕДЫ ЖИДКОСТЬ- ТВЕРДОЕ ТЕЛО В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ АППАРАТЕ С БАРБОТАЖЕМ

A Computer Model of the Dynamics of a Heterogeneous Liquid-Solid Medium in a Technological Apparatus with Bubbling



О. Ю. Олейник, кандидат технических наук, доцент кафедры компьютерно-интегрированных технологий и метрологии, e-mail: oleinik_o@ukr.net

Ю. К. Тараненко, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, e-mail: taranen@rambler.ru

Украинский государственный химико-технологический университет, г. Днепр

O. Yu. Oliynyk, candidate of technical sciences, associate professor of the department of computer-integrated technologies and metrology, e-mail: oleinik_o@ukr.net

Yu. K. Taranenko, doctor of technical sciences, professor, head of the department, e-mail: taranen@rambler.ru

Ukrainian state chemical-technology university, Dnipro

Статья посвящена разработке компьютерной модели динамики гетерогенной среды жидкость-твердое тело в технологическом аппарате с барботажем. В гетерогенной среде барботажного аппарата известные методы контроля среды являются трудно реализуемыми и практически непригодны для контроля в потоке среды, поэтому необходимы новые подходы к реализации программно-аппаратного комплекса информационных систем.

Существующие математические не учитывают изменения концентрации жидкости вследствие образования суспензий твердых включений при барботаже жидкости дымовыми газами и динамики поведения газовых пузырьков в вибрационном поле аппарата. Вибрационные средства измерений могли бы решить поставленную задачу путем учета изменений плотности и вязкости составляющих среды.

В основе разработанной математической модели гетерогенной среды жидкость-твердое тело, обеспечивающей достоверность информации в информационных системах, — модель виброчастотного метода контроля концентрации твердой фракции суспензий, основанная на использовании особенностей поведения твердой фазы суспензии в вибрационном поле.

На основании уравнения движения частицы в вибрационном поле для случая сферической формы частицы, которая находится в свободных условиях при ламинарном режиме движения, с учетом зависимости плотности суспензии от плотности твердой фазы и жидкости, вязкости суспензии от вязкости жидкости и плотности твердой фазы, получено новое дифференциальное уравнение.

Полученное уравнение динамики гетерогенной среды жидкость-твердое тело в технологическом аппарате с барботажем решено про-

граммно в среде Python, с использованием библиотеки *сутру*, с применением комплексного сопряжения и упрощения.

Получены соотношения для контроля концентрации суспензии, образуемой в технологическом аппарате после барботирования дымовых газов через слой жидкости. Приведенные результаты программной реализации модели подтверждают, что с увеличением частоты вибрационного поля уменьшается относительная амплитуда твердой фазы, а следовательно, и её эффективная масса, участвующая в колебаниях среды.

Статья посвящена разработке компьютерной модели динамики гетерогенного среды жидкость-твердое тело в технологическом аппарате с барботажем. В гетерогенной среде барботажного аппарата известные методы контроля среды являются трудно реализуемыми и практически непригодны для контроля в потоке среды, поэтому необходимы новые подходы к реализации программно-аппаратного комплекса информационных систем.

Существующие математические не учитывают изменения концентрации жидкости вследствие образования суспензий твердых включений при барботаже жидкости дымовыми газами и динамики поведения газовых пузырьков в вибрационном поле аппарата. Вибрационные средства измерений могли бы решить поставленную задачу путем учета изменений плотности и вязкости составляющих среды.

В основе разработанной математической модели гетерогенной среды жидкость-твердое тело, обеспечивающей достоверность информации в информационных системах, — модель виброчастотного метода контроля концентрации твердой фракции суспензий, основанная на использовании особенностей поведения твердой фазы суспензии в вибрационном поле.



О. Ю. Олейник



Ю. К. Тараненко

На основі рівняння руху частинки у вібраційному полі для випадку сферичної форми частинки, яка перебуває за вільних умов за ламінарного режиму руху, з урахуванням залежності густини суспензії від щільності твердої фази і рідини, в'язкості суспензії від в'язкості рідини і густини твердої фази, отримано нове диференціальне рівняння.

Отримане рівняння динаміки гетерогенного середовища рідина-тверде тіло в технологічному апараті з барботажем розв'язано програмно у середовищі Python з використанням бібліотеки *sympy*, із застосуванням комплексного пари та спрощення.

Отримано співвідношення для контролю концентрації суспензії, утвореної в технологічному апараті після барботування димових газів через шар рідини. Наведені результати програмної реалізації моделі підтверджують, що зі збільшенням частоти вібраційного поля, зменшується відносна амплітуда твердої фази, а отже, її ефективна маса бере участь у коливаннях середовища.

The article is devoted to the development of a computer model of the dynamics of a heterogeneous liquid-solid medium in a technological apparatus with bubbling. In a heterogeneous bubbler medium, the known methods of environmental control are difficult to implement and practically unsuitable for control in the flow of the medium; therefore, new approaches to the implementation of the software and hardware complex of information systems are necessary.

Existing mathematical not take into account the change in the concentration of the liquid due to the formation of solid suspensions included in the bubbling of the liquid by flue gases and the dyna-

mics of the behavior of gas bubbles in the vibration field of the apparatus. Vibration measuring instruments could solve the problem by taking into account changes in the density and viscosity of the components of the medium.

The developed mathematical model of a heterogeneous liquid-solid medium, which ensures the accuracy of information in information systems, is based on the model of vibration frequency methods for monitoring the concentration of the solid fraction of suspensions, based on the use of the behavior of the solid phase of the suspension in a vibration field.

Based on the equation of motion of a particle in a vibrational field for the case of a spherical shape of the particle, which is in free conditions under a laminar regime of motion, taking into account the dependence of the density of the suspension on the density of the solid phase and liquid, the viscosity of the suspension on the viscosity of the liquid and density of the solid phase, a new differential equation is obtained.

The obtained equation of dynamics of a heterogeneous liquid-solid medium in a technological apparatus with bubbling is solved by a software solution in the Python environment, with the introduction of the *sympy* library using complex Conjugation and simplification.

Relations are obtained for controlling the concentration of the suspension formed in the technological apparatus after bubbling flue gases through a liquid layer. The presented results of the software implementation of the model confirm that with an increase in the frequency of the vibrational field, the relative amplitude of the solid phase decreases, and therefore its effective mass participating in the vibrations of the medium.

Ключевые слова: компьютерная модель динамики, вибросчастотный метод, концентрации твердой фракции, суспензия, Python.

Ключові слова: комп'ютерна модель динаміки, вібросчастотний метод, концентрації твердої фракції, суспензія, Python.

Keywords: computer model of dynamics, vibration-frequency method, concentration of solid fraction, suspension, Python.

Сложность внедрения информационных технологий в производство, прежде всего, связана с трудностями разработки программно-технических средств автоматизированных систем сложных технологических объектов. К таким объектам можно, бесспорно, отнести и теплообменные аппараты барботажного типа. Наличие гетерогенных сред в таких аппаратах требует особых подходов к реализации программно-аппаратного комплекса информационных систем.

Задача усложняется тем, что в гетерогенной среде барботажного аппарата известные методы контроля среды (оптический, ультразвуковой, счёта воздушных пузырей, радиационный) являются трудно реализуемыми и практически непригодны для контроля в потоке среды. Исключение могли бы составить вибрационные средства измерений, однако, без учёта изменений плотности и вязкости составляющих среды, вибрационный метод не может обеспечить достоверности информации; и поэтому такие информационные системы не получили широкого применения на производстве, а литературные данные немногочисленны и имеют экспериментальный характер.

Дымовые газы представляют собой продукты сгорания топлива, возникающие в результате сжигания газов любого типа в камере горения. Для повышения эффективности производства большинство предприятий применяет дымовые газы для рекупе-

рации тепловой энергии. В ряде технологических аппаратов рекуперация сводится к барботажу дымовых газов через жидкость. В работах, посвященных исследованию таких процессов и сред, авторы не учитывают изменения концентрации жидкости за счет образования суспензий твердых включений при барботаже жидкости дымовыми газами. Не учитывается и динамика поведения газовых пузырьков в вибрационном поле аппарата.

Основой математической модели гетерогенной среды жидкость-твердое тело, обеспечивающей достоверность информации в ИС, является модель вибросчастотного метода контроля концентрации твердой фракции суспензий, использующая особенности поведения твердой фазы суспензии в вибрационном поле [1].

Известно, что в вибрационном поле резонатора дисперсионная фаза (жидкость) ведет себя как твердое тело, жестко связанное с резонатором, а дисперсная фаза (твердые частицы), вследствие инерции и действия сил трения, движутся со сдвигом по фазе и имеют амплитуду колебаний, отличающуюся от амплитуды колебаний жидкости [2].

В условиях, когда среда в аппарате представляет собой гетерогенную систему типа жидкость-твердое тело или жидкость-газ, реакция в виде изменения частоты или амплитуды колебаний среды датчика не несет достоверной информации о составе и свойствах контролируемого вещества [3].

Немногочисленные публикации на тему реализации вибрационного метода контроля, в информационных системах сложных объектов в производственных условиях, посвящены применимости к гомогенным средам при решении измерительных задач контроля плотности или вязкости [4, 5]. В работе [5] представлена общая информация и анализ математических моделей устройств виброзащиты, реализуемых на основе магнитореологической суспензии. Отмечено, что применимость той или иной реологической модели заключается в замене истинной реологической зависимости некоторым уравнением, которое достаточно точно отображает экспериментальную кривую в выбранном диапазоне скоростей сдвига.

Таким образом, внедрение информационных систем с использованием виброчастотных средств измерения ограничено в связи с отсутствием научных основ методологии виброчастотного контроля в условиях гетерогенной среды. Решение этой проблемы является актуальной научно-прикладной задачей и позволит расширить внедрение информационных технологий в производство.

Целью данной работы является разработка компьютерной модели динамики гетерогенной среды жидкость-твердое тело в технологическом аппарате с барботажем, на основе усовершенствования известной модели вибрационно-частотного метода контроля путем учёта плотности и вязкости гетерогенной среды типа жидкость — твердое тело, с теоретическим анализом среды для условий естественного возникновения вибрационного поля при барботаже дымовых газов через жидкость для рекуперации тепловой энергии.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

В УСЛОВИЯХ ГЕТЕРОГЕННОЙ СРЕДЫ: ЖИДКОСТЬ — ТВЕРДЫЕ ЧАСТИЦЫ

Воспользовавшись предположением, приведенным в работе [6], согласно которому «эффективная масса» $m_{ЭТ}$ дисперсной фазы суспензии в вибрационном поле пропорциональна отношению амплитуд колебаний дисперсной и дисперсионной фаз, получим:

$$m_{ЭТ} = m_T \cdot \theta, \quad (1)$$

где m_T — масса твердой фазы.

Соотношение для θ можно получить из уравнения движения частицы в вибрационном поле [7, 8] для случая сферической формы частицы, которая находится в свободных условиях при ламинарном режиме движения:

$$\left. \begin{aligned} m'_T \cdot \frac{dv_T}{d\tau} &= m'_p \cdot \frac{dv_{ж}}{d\tau} + \frac{m'_p}{2} \cdot \left(\frac{dv_{ж}}{d\tau} - \frac{dv_T}{d\tau} \right) + \\ &+ \frac{9}{4} \cdot m'_p \cdot \omega \cdot \beta \cdot (v_{ж} - v_T) + \\ &+ 3 \cdot \pi \cdot \delta \cdot \mu_{ж} \cdot (v_{ж} - v_T) + \frac{9}{4} \cdot m'_{ж} \cdot \beta \cdot \left(\frac{dv_{ж}}{d\tau} - \frac{dv_T}{d\tau} \right), \quad (2) \\ \beta &= \frac{2}{\delta} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \mu_{ж}}{\omega \cdot \rho_{ж}}} \end{aligned} \right\}$$

где $v_{ж} = X_{\max} \cdot \sin(\omega \cdot \tau)$ — скорость колебательно-го движения жидкости; $v_T = \theta \cdot X_{\max} \cdot \sin(\omega \cdot \tau - \vartheta)$ — скорость колебательно-го движения частицы; ϑ — угол сдвига фаз колебаний частицы относительно жидкости; $X_{\max} = 1$ — амплитуда колебаний жидкости; ω — круговая частота колебаний вибрационного поля; $m'_T = \pi \cdot (\delta^3 / 6) \cdot \rho_T$ — масса твердой частицы; $m'_{ж} = \pi \cdot (\delta^3 / 6) \cdot \rho_{ж}$ — масса жидкости в объеме твердой частицы; δ — радиус твердой частицы; $\mu_{ж}$ — динамическая вязкость жидкости; $\rho_{ж}$ — плотность жидкости; τ — координата времени.

В реальных стеснённых условиях движения твердых частиц средняя скорость движения жидкости увеличивается вследствие вытеснения жидкости твердыми частицами [9] до значения:

$$v_{ж} = v''_{ж} + (v''_{ж} - v_T) \cdot \frac{C}{\rho_c - C}, \quad (3)$$

где $v''_{ж}$ — скорость колебательно-го движения жидкости без твердых частиц; C — концентрация твердой фазы в суспензии; ρ_c — плотность суспензии.

Для реализации виброчастотного метода контроля узкой фракции твердой фазы коллективом с автором статьи было предложено, для повышения достоверности контроля, учесть зависимость плотности суспензии от плотности твердой фазы и жидкости [10], а также вязкости суспензии μ_c от вязкости жидкости и плотности твердой фазы [11] согласно соотношениям:

$$\rho_c = \rho_{ж} + ((\rho_T - \rho_{ж}) / \rho_T) \cdot C, \quad (4)$$

$$\mu_c = \mu_{ж} \cdot (1 - C / \rho_T)^{-2,8}. \quad (5)$$

Подставляя (3), (4), (5) в дифференциальное уравнение (2), с учётом соотношения $\beta = (2/\delta) \cdot \sqrt{(2 \cdot \mu_c) / (\omega \cdot \rho_{ж})}$, получим новое дифференциальное уравнение:

$$\left(\frac{\rho_T - C}{\rho_c} + \frac{C}{\rho_T} + \frac{1}{2} + \frac{9}{4} \cdot \beta \right) \cdot \frac{dv_T}{d\tau} + \frac{9}{4} \cdot \omega \cdot \beta \cdot (1 + \beta) \cdot v_T = \left(\frac{3}{2} + \frac{4}{9} \cdot \beta \right) \cdot \frac{dv_{ж}}{d\tau} + \frac{9}{4} \cdot \omega \cdot \beta \cdot (1 + \beta) \cdot v_{ж}. \quad (6)$$

Получить аналитическое решение уравнения (6) возможно только с использованием преобразования Лапласа. Для этого разделим все члены уравнения

на $(9/4) \cdot \omega \cdot \beta \cdot (1 + \beta)$ и введём следующие обозначения:

$$T_1 = \frac{\frac{4}{9} \cdot \left(\frac{\rho_T - C}{\rho_c} + \frac{C}{\rho_T} + 0,5 \right) + \frac{2}{\delta} \cdot \sqrt{\frac{\mu_c}{\pi \cdot f \cdot \rho_{ж}}}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \frac{2}{\delta} \cdot \sqrt{\frac{\mu_c}{\pi \cdot f \cdot \rho_{ж}}}} \cdot \left(1 + \frac{2}{\delta} \cdot \sqrt{\frac{\mu_c}{\pi \cdot f \cdot \rho_{ж}}} \right),$$

$$T_2 = \frac{\frac{2}{3} + \frac{2}{\delta} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \mu_c}{\pi \cdot f \cdot \rho_{ж}}}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \frac{2}{\delta} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \mu_c}{\pi \cdot f \cdot \rho_{ж}}}} \cdot \left(1 + \frac{2}{\delta} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \mu_c}{\pi \cdot f \cdot \rho_{ж}}} \right) \quad (7)$$

С учётом введенных обозначений (7) дифференциальное уравнение (6) в операторной форме переписывается в виде:

$$T_1 \cdot p \cdot v_T + v_T = T_2 \cdot p \cdot v_{ж} + v_{ж} \quad (8)$$

Решая (8) относительно отношения $v_T / v_{ж}$, получим:

$$\frac{v_T}{v_{ж}} = \frac{T_2 \cdot p + 1}{T_1 \cdot p + 1} \quad (9)$$

Для решения (9) в аналитической форме после подстановки $p = i \cdot \omega$ нужно определить модуль и аргумент от этого комплексного соотношения. Программное решение получено в среде Python, с использованием библиотеки *sympy* с применением комплексного сопряжения и упрощения.

Получаем следующие решения в аналитической форме:

$$\left| \frac{v_T}{v_{ж}} \right| = \frac{\sqrt{T_2^2 \cdot w^2 + 1}}{\sqrt{T_1^2 \cdot w^2 + 1}},$$

$$\vartheta = a \operatorname{tang} \frac{w \cdot (T_1 - T_2)}{(T_1 \cdot T_2 \cdot w^2 + 1)}.$$

Полученные решения в аналитической форме переписываем согласно (7):

$$\theta = \frac{\left[\frac{\frac{2}{3} + \frac{2}{\delta} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \mu_c}{\pi \cdot f \cdot \rho_{ж}}}}{\frac{2}{\delta} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \mu_c}{\pi \cdot f \cdot \rho_{ж}}}} \cdot \left(1 + \frac{2}{\delta} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \mu_c}{\pi \cdot f \cdot \rho_{ж}}} \right) \right]^2 + 1}{\left[\frac{\frac{4}{9} \cdot \left(\frac{\rho_T - C}{\rho_c} + \frac{C}{\rho_T} + 0,5 \right) + \frac{2}{\delta} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \mu_c}{\pi \cdot f \cdot \rho_{ж}}}}{\frac{2}{\delta} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \mu_c}{\pi \cdot f \cdot \rho_{ж}}}} \cdot \left(1 + \frac{2}{\delta} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \mu_c}{\pi \cdot f \cdot \rho_{ж}}} \right) \right]^2 + 1} \quad (8)$$

$$\vartheta = \operatorname{arctang} \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot (T_1 - T_2)}{(2 \cdot \pi \cdot f)^2 \cdot T_1 \cdot T_2 + 1} \right) \quad (9)$$

Результаты, полученные в других публикациях, не противоречат результатам, полученным авторами данной статьи; например, в работе [11] получено соотношение для θ , которое не учитывает попра-

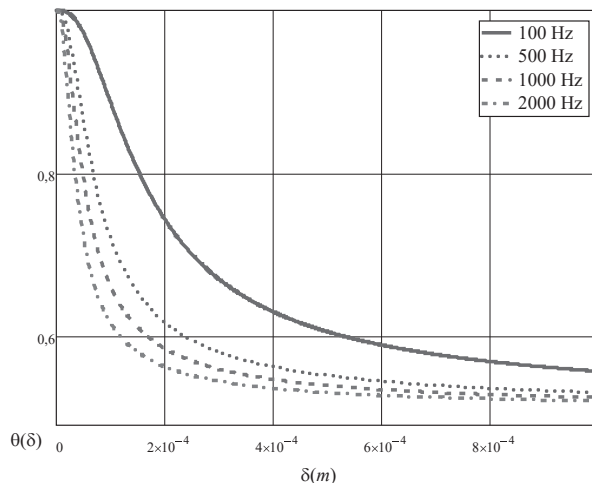


Рис. 1. Зависимость относительной амплитуды твердой фазы от частоты вибрационного поля и радиуса твёрдых частиц при концентрации водной суспензии известняка 100 кг/м³

Fig. 1. The dependence of the relative amplitude of the solid phase on the frequency of the vibration field and the radius of the solid particles at a concentration of an aqueous suspension of limestone of 100 kg/m³

вок (4), (5), повышающих достоверность контроля в среднем на 20 %.

Полученные соотношения (8), (9) можно использовать для контроля концентрации суспензии, образуемой в технологическом аппарате после барботирования дымовых газов через слой жидкости. Главной задачей контроля в этом случае является контроль концентрации твердой фракции при заданной концентрации водной суспензии. Приведенные

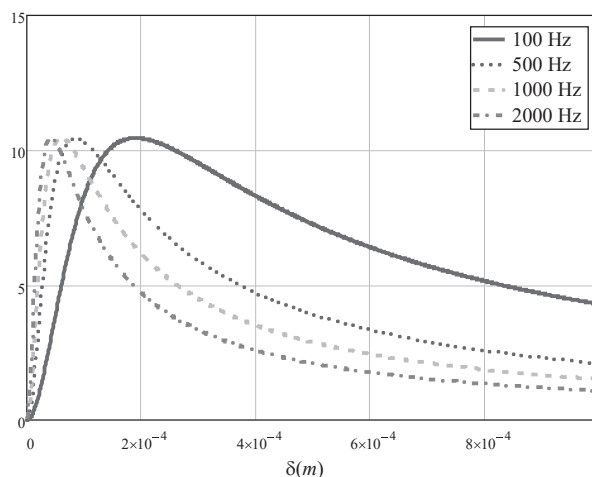


Рис. 2. Зависимость фазового сдвига твердых частиц по отношению к жидкости от частоты вибрационного поля и радиуса твёрдых частиц при концентрации водной суспензии известняка 100 кг/м³

Fig. 2. The dependence of the phase shift of solid particles with respect to liquid on the frequency of the vibration field and the radius of the solid particles at a concentration of an aqueous suspension of limestone of 100 kg/m³

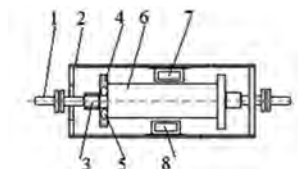


Рис. 3. Автоколебательный режим для автоматического изменения частоты вибрационного поля при помощи цилиндрического резонатора: а — технологический трубопровод; б — немагнитный корпус; 1 — вибрирующий цилиндр; 2 — фланцы со сквозными отверстиями; 3 — эластичные элементы крепления; 4 — опоры; 5 — резиновые манжеты; 6 — резонатор; 7, 8 — электромагнитные системы возбуждения окружных и меридиальных колебаний

Fig. 3. Self-oscillating mode for automatically changing the frequency of the vibration field using a cylindrical resonator: a — process pipeline; b — non-magnetic housing; 1 — vibrating cylinder; 2 — flanges with through holes; 3 — elastic fasteners; 4 — supports; 5 — rubber cuffs; 6 — resonator; 7, 8 — electromagnetic excitation systems of circumferential and meridial oscillations

на рис. 1, 2 зависимости подтверждают, что с увеличением частоты f_i вибрационного поля уменьшается относительная амплитуда твердой фазы θ , а следовательно, и её эффективная масса, участвующая в колебаниях среды, согласно соотношению (1).

При реализации информационной системы технически возможно организовать автоматическое изменение частоты вибрационного поля при помощи механического полого проточного резонатора, установленного в потоке суспензии на трубопроводе, согласно рис. 3 [13]. В качестве такого резонатора можно использовать трубку, цилиндр или пластину, снабженные системой возбуждения колебаний, как показано на рис. 3.

Обобщённая характеристика трубчатых, цилиндрических и пластинчатых резонаторов определяется соотношением [12]:

$$f = f_0 \sqrt{A/(A + \rho)}, \quad (10)$$

где f_0 , A , ρ — частота пустого резонатора; постоянная, определяемая экспериментально, и плотность среды, заполняющей резонатор.

Определим плотность суспензии ρ , протекающей через резонатор:

$$\rho = (m_{\text{ж}} + m_{\text{т}} \cdot \theta) / F, \quad (11)$$

где $m_{\text{ж}}$, $m_{\text{т}}$, F — массы единицы длины жидкости, твердых частиц и проходное сечение резонатора.

Часть площади $m_{\text{т}} / \rho_{\text{т}}$ проточного канала резонатора F будет занята твердой фазой, поэтому массу жидкости, на единицу длины резонатора с учётом $C = m_{\text{т}} / F$, определим из соотношения:

$$m_{\text{ж}} = \rho_{\text{ж}} \cdot (F - (C \cdot F / \rho_{\text{т}})). \quad (12)$$

Подставляя (12) в (11), с учётом $m_{\text{т}} \cdot \theta = C \cdot \rho_{\text{т}} \cdot \theta$, из соотношения (10) получим уравнение для обобщённой градуировочной характеристики резонатора в гетерогенной системе жидкость-твёрдое тело:

$$f = f_0 \sqrt{A / (A + \rho_{\text{ж}} + (\theta_{\text{cp}} - \rho_{\text{ж}} / \rho_{\text{т}}) \cdot C)}, \quad (13)$$

где θ_{cp} — средняя амплитуда колебаний твёрдых частиц заданной фракции.

Известно, что эффективная работа шаровых мельниц известняка определяется процентом содержания заданной фракции, в нашем методе массовой концентрацией. Фракционный состав суспензии $p(\delta)$ подчиняется распределению Розина-Рамллера:

$$p(\delta) = q \cdot m \cdot \delta^{q-1} \cdot e^{-m \delta^q},$$

де q , m — параметры распределения.

Тогда средняя амплитуда колебаний твёрдых частиц заданной фракции определяется из уравнения:

$$\theta_{\text{cp}} = \int_0^{\delta_{\text{cp}}} \theta(\delta) \cdot p(\delta) \cdot d\delta.$$


ВЫВОДЫ

Получена компьютерная математическая модель динамики гетерогенной среды жидкость-твёрдое тело в технологическом аппарате с барботажем на основе усовершенствования известной модели вследствие учета общей вязкости и плотности среды. Модель позволяет получать информацию путем измерения концентрации пульпы и суспензий с применением проточного механического резонатора любого из использованных в виброплотномерах типов, что значительно расширяет область их применения.

Полученная зависимость применяется для расчета критерия эффективности процесса и определения режима, обеспечивающего наиболее эффективный теплообмен между жидкостью и газом при его барботаже.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Тараненко Ю.К. (2006) Математична модель диференційного віброчастотного датчика концентрації дисперсних систем [Текст] / Ю.К. Тараненко // Вісник Академії митної служби України. Серія: технічні науки (Tararenko Yu.K. (2006) Matematichna model' diferentsynogo vibrachastotnogo datchika kontsentratsii dispersnikh sistem. Visnik Akademii mitnoi sluzhbi Ukraini. Seriya: tekhnichni nauki). — № 3 — С/Р. 109—116.
2. Шамов Н.А. (2003) Особенности динамики твердых частиц суспензии в моно- и полихроматическом звуковых полях [Текст] / Н.А. Шамов // Труды XXXIII Уральского семинара РАН «Механика и процессы

- управления», раздел «Механика жидкости и газа». — Миасс: Урал. отд. РАН. (Shamov N.A. (2003). Osobennosti dinamiki tverdykh chastits suspensii v mono- i polikhromaticheskom zvukovykh polyakh. Trudy XXXIII Ural'skogo seminar RAN «Mekhanika i protsessy upravleniya», razdel «Mekhanika zhidkosti i gaza»). — С/Р. 72—79.
3. Ермолаев А.Н. (2017) Современные средства измерения плотности жидких дисперсных сред / Ермолаев А.Н., Мельничук О.В. // Электротехнические и информационные комплексы и системы (Yermolayev A.N. (2017). Sovremennyye sredstva izmereniya plotnosti zhidkikh dispersnykh sred . Elektrotekhnicheskiye i informatsionnyye komplekсы i sistemy). — Т/У. 13. — № 4. — С/Р. 92—96.
 4. Билинский И.И., Огородник К.В., Яремшана Н.А. (2016) Анализ методов и средств измерения плотности нефтепродуктов // Научные труды Винницкого национального технического университета (Bilinskiy I.I., Ogorodnik K.V., Yaremishena N.A. (2016). Analiz metodov i sredstv izmereniya plotnosti nefteproduktov. Nauchnyye trudy Vinnitskogo natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta). — № 2. — С/Р. 10—23.
 5. Шурыгин А.М. (2017) Анализ математических моделей устройств виброзащиты технических объектов машиностроительных производств // Информационная среда вуз (Shurygin A.M. (2017) Analiz matematicheskikh modeley ustroystv vibrozashchity tekhnicheskikh ob'yektov mashinostroitel'nykh proizvodstv. Informatsionnaya sreda vuz). — № 1. — С/Р. 335—338.
 6. Гринман И.Г. (1970) Исследование колебаний суспензии с целью гранулометрического анализа твердой фазы пульпы // Автоматизация производственных процессов / И.Г. Гринман, Х.Ш. Нурғалиева, В.В. Шамрай. — Алма-Ата: Наука (Grinman I.G. (1970) Issledovaniye kolebaniy suspensii s tsel'yu granulometricheskogo analiza tvordoy fazy pul'py. Avtomatizatsiya proizvodstvennykh protsessov). — 324 с/р.
 7. Фукс В.А. (1955) Механика аэрозолей / В.А. Фукс. — М.: АН СССР (Fuks V.A. (1955). Mekhanika aerorozoley). — 351 с/р.
 8. Фукс Н.А. (1961) Успехи механики аэрозолей / Н.А. Фукс. — М.: АН СССР (Fuks N.A. (1961) Uspekhi mekhaniki aerorozoley). — 159 с/р.
 9. Гупало Ю.П. (1962) О некоторых закономерностях псевдосжженного слоя и стеснённого падения / Ю.П. Гупало // Инженерно-физический журнал (Gupalo Yu.P. (1962). O nekotorykh zakonomenostyakh psevdoszhzhenogo sloya i stesnonnogo padeniya. Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal). — Т/У. 5. — № 1. — С/Р. 96—98.
 10. А.с. 1467451 СССР, МКИ G01N 15/04 Частотный способ седиментационного анализа суспензий: / Ю.К. Тараненко и др. (СССР), — №4219643/24-25; заявл. 03.02.87; опубл. 23.03.89. Бюл. № 11, 1989 г (A.s. 1467451 SSSR. (1989). Chastotnyy sposob sedimentatsionnogo analiza suspensiy; 11).
 11. А.с. 1837210 СССР, МКИ G01N 15/04 Частотный способ седиментационного анализа суспензий: / Ю.К. Тараненко и др. (СССР), — №4852173/25; заявл. 17.07.90; опубл. 30.08. 93. Бюл. № 23, 1993 г (A.s. 1837210 SSSR. (1993). Chastotnyy sposob sedimentatsionnogo analiza suspensiy, 23).
 12. Жуков Ю.П. (1991) Вибрационные плотномеры / Ю.П. Жуков. — М.: Энергоатомиздат (Zhukov Yu.P. (1991) Vibratsionnyye plotnomery. Energoatomizdat). — 144 с/р.
 13. Олийник О.Ю. (2018) Multifunctional vibration frequency transducer with cylindrical resonator / Yu.K. Taranenko, O.Yu. Oliynyk // Measurement Techniques. — Vol. 61. — № 7. — С/Р. 41—46. 

Отримано / received: 23.02.2020.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. В.В. Лопатиним (Україна).
Prof. V.V. Lopatin, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.

DOI: 10.33955/2307-2180(2)2020.57-60

УДК 620.3

FEMTOSECOND OPTICAL TOMOGRAPHY

**Фемтосекундна
оптична томографія**



O. A. Kalnaya, optometrist,
«Ophthalmica» medical center, Kharkov, Ukraine,
Yu. S. Kurskoy, doctor of physical
and mathematics sciences,
associate professor of physical foundations
of electronic engineering department,
e-mail: kurskoy@rambler.ru
Kharkov national university of radio electronics, Ukraine

O. A. Кальна, оптометрист,
медичний центр «Офтальміка», м Харків, Україна,
Ю. С. Курський, доктор фізико-матиматичних наук,
доцент кафедри фізичних
основ електронної техніки,
e-mail: kurskoy@rambler.ru
Харківський національний університет
радіоелектроніки, Україна

The aim of the work is development of medical optical tomography technologies. The physical principles, tasks, and boundary possibilities of the optical tomography systems are considered. The authors propose to use the femtosecond lasers, operating in the «optical comb» mode, as a lught source in optical tomography system. The advantages of this source uses were analyzed and resolution power of femtosecond optical tomographs was calculated in the artical.

Статтю присвячено розвитку технологій оптичної томографії медичного призначення. Розглянуто фізичні принципи, завдання та граничні можливості оптичних систем томографії. Наведено напрямки та шляхи розвитку оптичної томографії. Запропоновано використання фемтосекундних лазерів, що працюють у режимі «оптичної гребінки» як джерела випромінювання в ситсемах оптичної томографії. Проаналізовано переваги використання цих джерел та виконано розрахунки роздільної здатності фемтосекундних оптичних томографів.

Ключові слова: оптична томографія, фемтосекундний лазер, роздільна здатність, довжина хвилі, корегентність випромінювання, інтерферометр, чутливість, офтальмологія.

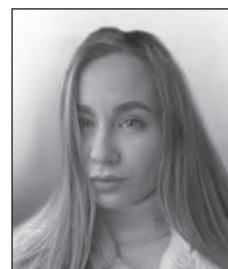
Keywords: optical tomography, femtosecond laser, resolution, wavelength, radiation correction, interferometer, sensitivity, ophthalmology.

INTRODUCTION

Tomography is a widely used in medicine method for step by step imagination of the object internal structure. There are irradiation (X-ray, ultrasound computer X-ray, radionuclide methods) and unirradiation tomography methods (ultrasound and magnetic resonance methods).

The irradiation methods have a high spatial resolution and give the accurate structural information. But, for example, X-ray tomography doesn't allow the classification of tumors and isn't used for patients younger than 30 years old. The magnetic resonance method can determine the chemical composition of the tissue, but it doesn't detect such important element as oxygen. Positron emission tomography has a low spatial resolution but it's very expensive and can produce a false result when a patient has diabetes. The development of optical tomography (or optical coherence tomography) methods (OT) can be a solution for these and another similar problems [1].

The OT method is the process of optical illumination of biological object and calculation of radiation reflection degree as a function of scanned medium layer depth. The main feature of OT is an ability to study the objects and mediums when the depth of optical radiation propagation is the several millimeters and a significant part



O. A. Kalnaya



Yu. S. Kurskoy

of radiation is diffuse scattered and absorbed. The advantages of OT are based on the short wavelength and coherence of radiation.

Visible and near-infrared (IR) light with low level of radiation density is safe for biological tissues and A human body is well adapted to this type of radiation. Light of this range penetrates well into biological tissue and, when it interacts with various structural and dynamic components, carries information about structural and dynamic changes which are the results of illness. Such processes as the diffusion, diffraction, interference, fluorescence, spring quasi-molecular and molecular dissipation are spoken in a biological middleware and are the sources of information about pathological processes.

OT is used in dermatology, ophthalmology, cardiology, dentistry and other fields of medicine. OT method is most effective in ophthalmology because of optical transparency of the retina and visual organ media [2]. For three-dimensional imagination of eye it is done the scanning in the longitudinal and transverse directions. Modern OT allows to do more than 25 000 linear scans per one second. The OT methods resolution in axial length reaches 3-8 microns, and in the transverse length — about 10-15 microns, which is much higher than the possibilities of ultrasonic methods. OT allows to determine and evaluate the morphological changes of the retina and nerve fiber layer and the thickness of these structures, parameters of the optic disc, anatomical structures of the anterior segment of eye and their spatial relationship.

The development of OT systems is going along the several ways. The first way is a researching the new sources, especially with a wide radiation spectrum, which have a small coherence length and can increase the resolution. The second direction is development of high-sensitivity and high-speed systems. They develop the OT systems that can in real-time observe and analyze three-dimension objects and inhomogeneous mediums that change their state.

The aim of the article is researching the possibilities of using the femtosecond lasers in optical tomography.

1. PRINCIPLES AND CHARACTERISTICS OF OT

The main part of the OT systems is the low-coherence Michelson interferometer with a wide-spectrum radiation source (Fig. 1). In the interferometer radiation is divided into a measuring wave that illuminates the object, and a reference wave, the optical path length of which can change with the controlled movement of the interferometer mirror.

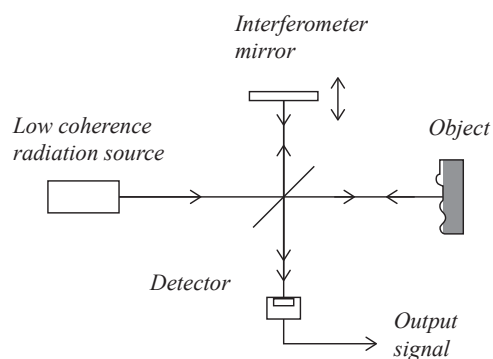


Fig. 1. Michelson interferometer scheme
Рис. 1. Схема інтерферометра малої когерентності

The low-coherence interference bands are observed when the optical path lengths of the measuring and reference waves are equal within the coherence length. Position of interferometer mirror, which achieves the maximum of bandwidth visible, characterizes the distance to the reflecting surface or the boundary of inner reflecting layer of medium. In this case there is only one perspective of probing the object in the depth with determination of distance to the reflecting layer. For formation and processing of low-coherence interferometric signals, different methods are used, especially methods of interference modulation, phase shift, and optical nonlinearity.

Another approach to layer-based sensing in the one perspective is based on the use of spectral interferometry methods. A spectral device is placed at the output of the low-coherence interferometer (Fig. 1). This device emits a narrow spectral interval for each wavelength value, which is determined by the resolution of spectroscopy and recording system. In this case, the selection of the layers reflection in depth is reduced to the frequency selection of periodic spectrum components.

With a non-zero fixed optical path difference of the measuring and reference waves, the intensity output light depends on the wavelength value, that is, on the number of wavelengths within that difference. As the wavelength changes within the spectral range of radiation, bands of equal chromatic order (groove spectrum) are observed, the frequency of which is proportional to the optical path difference. In the case of inhomogeneous medium volume reflection the groove spectra for the medium are summed up and the resulting spectrum contains information about the medium inhomogeneity or about the distribution of radiation reflection degree by the depth. The advantage of spectral interferometry technique is that there is no need to move the reference reflector of the interferometer. Example of tomographic researching results is given at Fig. 2.



Fig. 2. Linear scan of the retina macular area
 Рис. 2. Лінійний скан макулярної області сітківки в нормі

One of the main characteristics of OT is the resolution, that differs significantly in different directions: axial (longitudinal) and lateral, (transverse). In the longitudinal direction, or in the optical axis direction, the resolution δz is limited by the length of time coherence l_c :

$$l_c \approx \lambda_0^2 / \Delta\lambda, \quad (1)$$

where: λ_0 is a central wavelength, $\Delta\lambda$ is a radiation line width.

In the transverse direction the resolution δx is determined by a focused beam waist diameter (Fig. 3) [1].

The selection of reflected radiation along the depth is provided by limiting of the probe radiation coherent properties. Only radiation that comes from the region of space bounded in the longitudinal direction by the temporal coherence length l_c (1) can interfere with the reference wave and can be detected. Optical inhomogeneities with sizes smaller than the temporal coherence length l_c can't be recognized by OT.

The focused beam waist has finite size, which depend on the light wave properties — the central wavelength λ_0 , and focusing MO numerical aperture:

$$NA = n \cdot \sin \theta, \quad (2)$$

where n is a refractive index of medium.

Knowing λ_0 and $\Delta\lambda$, it is possible to estimate the length of focused beam waist or theoretical limit of the longitudinal resolution:

$$\delta z = l_c / 2. \quad (3)$$

This value determines the allowable depth of scanning, like a depth of field in microscopy or photography.

The focused beam waist diameter, which determines the theoretical resolution limit in the transverse direction, can be estimated by the formula:

$$\delta E \approx 0,61(\lambda_0 / NA). \quad (4)$$

Using the formulas (1)—(4) we can estimate the resolution parameters of the typical OT systems. For systems with $\lambda_0 = 850$ nm, $\Delta\lambda = 50$ nm, $NA = 0,1$. $\delta E \approx 5,18$ μ m, $\delta z \approx 15$ μ m. These results show that the resolution along the depth and along the transverse direction is significantly different. The equation (3)

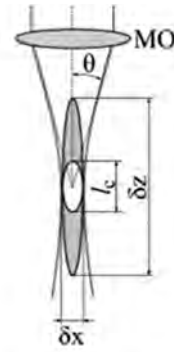


Fig. 3. Parameters defining the spatial resolution, where MO is a micro lens

Рис. 3. Параметри, що визначають просторову РЗ, де MO — мікроб'єктив

shows that practically the only way to increase the longitudinal resolution is to increase $\Delta\lambda$, that is, to extend the source radiation spectrum.

Therefore, the development of a OT new generation should be done by increasing the axial resolution by widening the radiation spectral line.

2. BASIS OF FEMTOSECOND OPTICAL TOMOGRAPHY

Femtosecond laser (FSL) is a laser that radiate the femtosecond duration optical pulses (1 fs = 10⁻¹⁵ s) It is a tape of the fiber ultra-speed and ultra-short pulse lasers [3]. FSL can generate such a laser mode as an optical comb (or supercontinuum) (OC). OC is a special type of electromagnetic synchronization in the optical range the frequency spectrum of which looks like a set of equidistant values with discrete value equals f_{rep} (Fig. 3) [4].

The frequency ν_m , which corresponds to the OC peak with number m , is determined by the relation:

$$\nu_m = f_{rep} \cdot m + \nu_{GEO}. \quad (5)$$

With the help of OC they solve a group of metrological and spectroscopic problems such as measuring of intervals between two optical frequencies or values of frequency in the ranges in which otherwise

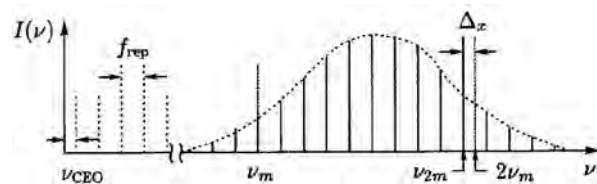


Fig. 3. Spectral characteristics (OC) of femtosecond Ti-Sa laser with passive mode synchronization, where: $I(\nu)$ is the radiation intensity, ν_{GEO} is the offset of the peak with the number $m = 1$ of the «ideal» frequency grid, Δx is the frequency of beat signal between ν_{2m} and $2\nu_m$ signals

Рис. 3. Спектральні характеристики фемтосекундного Ti-Sa лазера з пасивною синхронізацією мод, де: $I(\nu)$ — інтенсивність випромінювання, ν_{GEO} — зміщення піку з номером $m = 1$ «ідеальної» частотної сітки, Δx — частота сигналу биття між сигналом ν_{2m} та $2\nu_m$

it is difficult to measure them. OC are used in the precision clocks, satellite positioning systems, high resolution laser spectroscopy, for generating of low-noise electromagnetic radiation and analyzing the cold atoms or ions state, and more. [3].

FSL is an effective research tool in biomedicine that is used, for example, for study of suture processes or diagnosis of bio-objects with submicron resolution. FSLs are used as the radiation sources for influencing at the live objects (tissues, cells, cellular organelles) with aim to change their structures or functions not only in basic research but also in clinical practice. FSL has been successfully used in ophthalmology for the treatment of cataract and cornea (femto-LASIK method).

Today we propose to use FSL and OC in the OT systems (Fig. 1). First this will allow us to select the scanning frequency ν_m (5) depending on the test substance transparency in the OC frequency range. Secondly, the OC broad band radiation $\Delta\lambda$ will increase the OT resolution values (3), (4). Third, the femtosecond interval of pulse effects on live cells does not cause the latter to significantly heat.

Consider some FSLs and their radiation characteristics and consider the characteristics of OTs developed on these lasers basis. When using femtosecond Cr: Forsterite laser with $\lambda_0 = 1250$ nm, $\Delta\lambda = 125$ nm, pulse duration $\tau = 5,4$ fs longitudinal resolution of OT $\delta z \approx 6,2$ μm . When using Ti: Al_2O_3 FSL

based on photonic crystal fiber with $\lambda_0 = 1050$ nm, $\Delta\lambda = 550$ nm OT has an axial resolution $\delta z = 1$ μm . When using Ti: Al_2O_3 FSL with characteristics: $\lambda_0 = 800$ nm, $\Delta\lambda = 350$ nm, pulse duration $\tau = 5,4$ fs the OT resolution $\delta z \approx 0,91$ μm . The obtained values significantly exceed the resolution level of standard OTs using superluminescent diodes [5] and allow us to predict good prospects for the development of femtosecond optical tomography methods.


CONCLUSIONS

Analysis of literature revealed the main directions for development of optical tomography systems, the main of which is the search for new radiation sources with wide spectrum and small coherence length. Using such sources it will be impossible to increase the resolution of tomography.

For solving this problem in the paper the possibilities and prospects of using femtosecond lasers in optical tomography systems were researched. The obtained analytical and mathematical results show that the use of femtosecond lasers will allow us to choose the frequency of scanning radiation depending on the transparency of investigated substance in the wide frequency range of the optical comb and, due to the broad band of radiation, it becomes possible to increase the resolution value to 1 μm .

The results of the work begin a new direction of femtosecond optical tomography.

REFERENCES / СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Вольнский М.А., Гуров И.П. (2014) Анализ изображений в оптической когерентной томографии. Учебно-методическое пособие по лабораторным работам. — СПб: Университет ИТМО (Volynsky M.A., Gurov I.P. (2014) Image analysis in optical coherence tomography. Teaching aid for laboratory work. — SPb: ITMO University). — 32 с.
2. Хуснитдинов И.И. (2019) Оценка результатов хирургии глаукомы методом оптической когерентной томографии. Обзор. Офтальмология (Khusnitdinov I.I. (2019) Evaluation of the results of glaucoma surgery using optical coherence tomography. Overview. Ophthalmology). — 16(1S):118-122.
3. Gnatenko A.S., Machekhin Yu.P., Kurskoy Yu.S., Obozna V.P. (2018) Providing mode locking in fiber ring lasers // J. Nano-Electron. Phys. — № 10(2). — P. 02033.
4. Риле Ф. (2009) Стандарты частоты. Принципы и приложения. Пер. с англ. — Москва: Физматлит (Rile F. (2009) Frequency Standards. Principles and applications. Per. from English - Moscow: Fizmatlit). — 512 с/р.
5. <https://ravita.ua/katalog/ofthalmologicheskoe-oborudovanie/optiko-kogerentnyj-tomograf/spektralnyj-optiko-kogerentnyj-tomograf-hoct-1-1f-huvitz-detail.html> 

Отримано / received: 26.02.2020.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. І.М. Бондаренком (Україна).
Prof. I.M. Bondarenko, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.

DOI: 10.33955/2307-2180(2)2020.61-67

УДК [669.295 + 71]: 543.272.1/3

РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДИК ВИЗНАЧЕННЯ ВМІСТУ ДОМІШОК КИСНЮ, АЗОТУ, ВОДНЮ В АЛЮМІНІДАХ ТИТАНУ

Elaboration of Methods for Determination on Content of the Oxygen, Nitrogen, Hydrogen Admixtures in Titanium Aluminides



М. М. Калинюк, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,
Я. П. Грицьків, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,
Л. М. Капітанчук, науковий співробітник, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України, м. Київ, e-mail: mykkal@ukr.net

M. M. Kalyniuk, candidate of technical sciences, senior research fellow,
Ya. P. Gritskiv, candidate of technical sciences, senior research fellow,
L. M. Kahitanchuk, researcher, E.O. Paton Electrowelding institute of National academy of science of Ukraine, Kyiv, e-mail: mykkal@ukr.net

Інтерметаліди титану (TiAl та Ti₃Al) і сплави на їхніх основах застосовують в авіа- та космічній техніці й автомобілебудуванні.

Фізико-механічні властивості цих сплавів кращі, ніж у класичних Ti- чи Ni- сплавах, які використовують у літаках та ракетах.

Сплави на основі TiAl чи Ti₃Al виробляють з використанням вакуумно — дугового, плазмово — дугового, індукційно — гарнісажного, магнітокеронового електрошлакового плавлення, електрошлакового плавлення в інертній атмосфері під «активним» флюсом з металевим кальцієм; індукційного плавлення в багатосекційному кристалізаторі та холодному тиглі, аргоно — дугового плавлення з невитратним вольфрамовим електродом у мідному водоохолоджуваному тиглі; електронно — променевого плавлення з проміжною ємністю.

Для з'єднання деталей, виготовлених із цих сплавів, використовують зварювання тиском, контактне, електронно — променеве та дифузійне зварювання.

Сплави на основі алюмінідів титану мають суттєві вади: високу крихкість, низькі пластичність, в'язкість й опір термоудару.

Автори багатьох робіт пояснюють ці характеристики структурними особливостями алюмінідів титану та сплавів на їхніх основах, але не розглядають можливості впливу домішок кисню, азоту, водню.

У літературі немає жодної інформації стосовно методів визначення вмісту газових домішок (O, N, H) в алюмінідах титану та сплавах на їхніх основах.

Нами розроблено методики визначення вмісту кисню, азоту, водню в алюмінідах титану для аналізаторів TC436, RO316, TN114, RH402. У статті наведено параметри цих методик

(температури нагрівання графітових тиглів, час, маси аналітичних зразків та інш.)

Titanium intermetalides (TiAl and Ti₃Al) and alloys on theirs bases applies in air — and spacetechnology and automobile industry.

Physical and mechanical properties there alloys is better, then at classical Ti — or Ni — alloys, that are utilized in aeroplanes and rocets.

Alloys, based on TiAl and Ti₃Al, are made with utilization vacuum — arc, plasma — arc, induction-garnisage, magnetoperating electroslag melting, electron — beam melting with intermediate capacity, electroslag melting in inert atmosphere under «active» fluxes with metallic calcium, induction melting in muchsectional crystallizator and cold crucible, argon — arc melting with unexpended tungsten electrode in copper watercooling crucible.

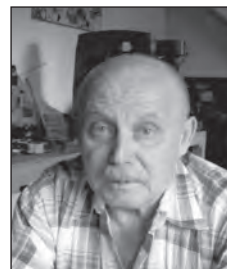
For connection of the details, that were made from these alloys, there were used welding by pressure, contact, electron — beam, diffusion welding.

Alloys, based on titanium aluminide, have essential defects — high brittleness and low plasticity, viscosity and resistance thermal impact strength.

Autors a lot of articles explaines these descriptions by structural special features of titanium aluminides and alloys on their bases, but does not consider possibilities of the influence by oxygen nitrogen, hydrogen admixtures.

In literature information about methods of determination gaseous admixtures (O, N, H) contents in titanium aluminides and alloys on their bases are absented.

Methods of determination oxygen, nitrogen, hydrogen contents in titanium aluminides on analysers TC436, RO316, TN114, RH402 are created. Parameters of these methods are described in this article (temperatures of heating on graphite crucibles, times, masses of analytical samples).



М. М. Калинюк



Я. П. Грицьків



Л. М. Капітанчук

Ключові слова: алюмінід титану, кисень, азот, водень, визначення.
Keywords: titanium aluminide, oxygen, nitrogen, hydrogen, determination.

Титанові сплави на основах інтерметалідних з'єднань TiAl, Ti₃Al є важливим класом конструкційних матеріалів з унікальними фізико — механічними властивостями в найбільш відповідальних застосуваннях [1—19]:

- високою міцністю до 900 °С, яка зростає з підвищенням температури;
- високим модулем пружності, який не так інтенсивно зменшується з підвищенням температури, як у Ti- та Ni- сплавах;
- коефіцієнтом самодифузії, який в алюмінідах титану на декілька порядків менший, ніж у Ti- та Ni-сплавах за порівняльних температур;
- низькою густиною (TiAl — 3,8 г/см³, Ti₃Al — 4,2 г/см³), що забезпечує високі питомі характеристики міцності;
- високими питомими жаростійкістю, жароміцністю, жаротривкістю за температур, характерних для робочих камер авіа- та ракетних двигунів: (700—900) °С;
- відносно високими температурами плавлення (TiAl — ~1450 °С);
- стійкістю до окислення та загоряння за температур (550—900) °С;
- негорючістю в атмосферах повітря та продуктів згоряння палива;
- довготривалою твердістю за температур (700—900) °С.

Алюмініди титану та сплави на їхніх основах використовують [1—19]:

- в авіа- та космічній техніці (газотурбінні двигуни: камери низького та високого тиску, лопатки, диски, елементи сопел, зовнішній тепловий захист й інш.);
- в автомобілебудуванні (ливарні вироби складної конфігурації: клапани, шатуни, поршні потужних двигунів внутрішнього згоряння, жаростійкі покриття, вироби, що працюють за статичних навантажень і високих температур);
- для довготривалої експлуатації деталей до 550 °С та короткострокової — до 600 °С, розширення інтервалу до 800 °С;
- для заміни в газотурбінних двигунах жароміцних Ni-сплавів, що дає більше, ніж 20 % зниження загальної маси двигуна, підвищує співвідношення «тяга — маса» літального апарата.

На сьогодні розроблені та використовуються такі металургійні технології виготовлення зливок алюмінідів титану та сплавів на їхніх основах: електронно-променеве плавлення з проміжною ємністю [10, 12—14]; вакуумно-дугове плавлення [5, 10]; аргоно-дугове плавлення з невитратним

вольфрамовим електродом у мідному кристалізаторі, що охолоджується проточною водою [8]; плазово-дугове плавлення [2, 4, 5]; магнітокерване електрошлакове плавлення [11]; електрошлакове плавлення в інертній атмосфері під «активним» флюсом, у якому є металевий кальцій [3]; індукційно-гарнісажне плавлення [2, 14]; індукційне плавлення в багатосекційному кристалізаторі та «холодному» тиглі [2, 5, 7].

Алюмініди титану та сплави на їхніх основах мають суттєві вади [1—19]: низькі пластичність, в'язкість й опір термоудару та високу крихкість.

Низьку пластичність та високу крихкість автопри багатьох робіт пояснюють структурними особливостями алюмінідів титану та сплавів на їхніх основах і пропонують різні методи підвищення пластичності та різні технології оброблення цих сплавів [1, 3—5, 7, 8, 10—14].

Але проблеми підвищення пластичності сплавів на основах алюмінідів титану за кімнатних температур не вирішені [4]. Це обмежує сфери застосування цих сплавів та спонукає проводити дослідження з легування TiAl та Ti₃Al такими елементами, як Nb, Mo, Cr, Fe, Y, B, La та інш. [1—19].

Перспективи використання інтерметалідних сплавів на основах алюмінідів титану також обмежені відсутністю надійних способів з'єднання їх між собою та з іншими конструкційними матеріалами [5, 15]. Були проведені експерименти з контактної зварювання алюмінідів титану з використанням нанощарових алюмінієво-титанових фольг [15], зварювання тиском інтерметалідного сплаву γ-TiAl [16], дифузійного та лазерного зварювання алюмінідів титану [5, 18], електронно-променевого зварювання та осаджування [17, 19], зварювання тертям [5]. Автори [5, 15—19] вважають свої дослідження перспективними для з'єднання тугоплавких матеріалів з низькою пластичністю, таких як сплави на основах алюмінідів титану.

Вплив легувальних і, особливо, домішкових елементів (O, N, H) вивчені недостатньо [3]. У роботах [2—7, 10, 13] висловлені припущення щодо впливу домішок кисню на пластичні властивості алюмінідів титану. Автори [10] визначили в литих сплавах на основі TiAl, легуваних V, Nb, Ta, Hf, Zr, вміст кисню 0,015 % мас. та азоту 0,0015 % мас. У роботі [2] виплавляли зливки сплавів на основі TiAl із вмістом кисню 0,02 % мас. Автори [13] виплавляли зливки TiAl із вмістом кисню 0,12 % мас. й азоту 0,015 % мас. Автори [15] вказують, що в сплаві на основі TiAl вміст кисню 0,08 % ат., азоту 0,02 % ат., водню 0,05 % ат. Автори [10, 15] виявили в сплавах

мікротріщини, порожнини та рядкові виділення, але без їхньої ідентифікації. У цих роботах немає жодного слова стосовно методик, згідно з якими аналізували сплави на основах алюмінідів титану на вміст газових домішок (кисню, азоту, водню) та прилади, за допомогою яких виконували ці аналізи [2, 10, 13, 15]. Потрібні жорсткі вимоги до хімічних складів сплавів на основах алюмінідів титану та вмісту в них газових домішок (кисню, азоту, водню) й їхнього контролю [7].

Мета роботи — розроблення методик визначення вмістів домішок кисню, азоту, водню в алюмінідах титану та сплавах на їхніх основах.

АНАЛІЗАТОРИ, МАТЕРІАЛИ ТА МЕТАЛИ, ЯКІ БУЛИ ВИКОРИСТАНІ В ЦІЙ РОБОТІ

Для розроблення методик визначення вмісту домішок кисню, азоту, водню в алюмінідах титану були використані аналізатори TC436 (кисень, азот), RO316 (кисень), TN114 (азот), RH402 (водень) фірми LECO [20].

У методі відновлювального плавлення аналітичні зразки розчиняють у рідкометалевих ваннах. Для створення цих ванн ми використали катодний нікель та олово чистотою ЧДА.

Катодний нікель переплавляли у графітових тиглях, в яких метал розкислювався та насичувався вуглецем. Зливки нікелю (діам. ~40 мм, висота ~150 мм) зачищали на токарному верстаті від залишків графітових тиглів. На машині CM10 (фірма LECO) абразивним диском з водяним охолодженням відрізували темплети товщиною ~2,0 мм. На ручних ножицях темплети різали на шматки ~(3,0 X 3,0 X 2,0) мм.

Нікель — олов'яні ванни використовували для визначення вмісту кисню й азоту в металах [20]. Ці ванни готували безпосередньо перед аналізуванням. У графітовий тигель завантажували ~1,0 г Ni та ~0,2 г Sn. У процесі дегазації нікель сплавляється з оловом. Ванна додатково дегазується. Частково олово випаровується. Визгони олова конденсуються на внутрішніх холодних поверхнях печі та пасивують сублімати титану, які утворилися під час попереднього аналізування. Ми використовували подвійні графітові тиглі для аналізування сплавів на основі TiAl на вміст кисню й азоту [20]. Матеріали ванн були перевірені на вміст кисню й азоту.

Вміст кисню в початковому катодному нікелі ~0,0020 % мас., азоту ~0,0004 % мас. Нікель практично не розчиняє азот ні в твердому, ні в розплавленому станах [25]. Нікель-олов'яна ванна після дегазування й аналізування вміщала $(1-4) \times 10^{-4}$ % мас. кисню та $(1...2) \times 10^{-4}$ % мас. азоту (аналіз «холостої» проби).

Вміст водню в сплаві на основі TiAl ми визначали за допомогою приладу RH402 з використанням рідкометалевої олов'яної ванни масою ~2,0 г [20].

Експерименти були проведені зі сплавом на основі алюмініду титану TiAl [7, 13]. Хімічний склад сплаву (62,6 Ti — 26,1Al — 4,8Nb — 4,0Cr — 3,8Mn — 0,2Si — 1,6Fe) % мас. було визначено нами на рентгенофлюоресцентному спектрометрі з хвильовим аналізатором X Unique фірми Philips та на Оже — мікросонді JAMP — 9500 F фірми JEOL.

Калібрування методик та аналізаторів проводили з використанням державних та зарубіжних стандартних зразків (еталонів) титанових сплавів з відомими вмістами кисню, азоту, водню (табл. 1). Стандартні зразки сплавів на основі алюмінідів титану на вміст кисню, азоту та водню відсутні.

РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДИК

Пробопідготування. Проби для виготовлення аналітичних зразків відбирали із середньої частини зливка сплаву на основі TiAl. Ці проби розбивали на шматки та відбирали зразки масою (0,05...0,5) г., які не мали зовнішніх дефектів (окислених поверхонь, тріщин, раковин й т.п.).

До аналізування зразки зберігали в ексикаторі.

Проведення експериментів. Основу сплаву, з яким ми працювали, складають два елементи: Ti та Al з різними фізико — хімічними властивостями,

Таблиця 1. Стандартні зразки складу титану на вміст кисню, азоту, водню

Table. 1. Standard samples of titanium composition on oxygen, nitrogen, hydrogen contents

| Країна | Стандартний зразок | Вміст домішки, масова доля, % мас. | | |
|-----------|--------------------------|------------------------------------|-----------------|-----------------|
| | | Кисень | Азот | Водень |
| Україна | CRM CA 018 | 0,058 ± 0,004 | 0,0130 ± 0,0012 | 0,0015 ± 0,0002 |
| | RM CA 015a | 0,070 ± 0,007 | 0,0071 ± 0,0011 | 0,0018 ± 0,0003 |
| | CRM CA 017 | 0,151 ± 0,007 | 0,0061 ± 0,0006 | 0,0039 ± 0,0004 |
| США | 501—657 lot j514 — 1 | 0,088 ± 0,004 | 0,007 ± 0,001 | ... |
| | 501—664 lot 0276 — 20 | 0,139 ± 0,009 | 0,009 ± 0,002 | ... |
| Німеччина | AR 649 lot 1217 B | 0,110 ± 0,003 | 0,0066 ± 0,0008 | 0,0212 ± 0,0005 |

особливо, за температурами плавлення [22]. Для аналізування цих металів на вміст газових домішок (кисню, азоту, водню) необхідні діаметрально протилежні підходи [20, 21, 23]. Особливо це стосується визначення вмісту кисню й азоту. На аналізаторах TC436, RO316, TN114 були проведені експерименти з використанням різних варіантів розміщення ванни та аналітичного зразка у шлюзі чи тиглі:

1. Рідкометалеву ванну (Ni 1,0 г + 0,2 г Sn) розміщали в тиглі, аналітичний зразок — у шлюзі. Тигель дегазували разом з ванною. Після закінчення дегазації зразок зі шлюзу падав у розплавлену ванну (TC436, RO316).

2. Рідкометалеву ванну (Ni 1,0 г) розміщали в тиглі, аналітичний зразок в олов'яній капсулі — у шлюзі (TC436, RO316).

3. «Пошаровий пиріг» [ванна (Ni 1,0 г + Sn 0,2 г) + аналітичний зразок] — у тигель. Попереднє підготування цього «пирога» — нагрівання тигля (~800 °C, ~15 с) [24]. Такий варіант був можливий, оскільки вміст кисню у початковому катодному нікелі після його переплавлення в графітовому тиглі був на рівні 0,0020 % мас. (TC436).

4. Рідкометалева ванна (Ni 1,0 г) — у тигель, аналітичний зразок — у шлюз (TN114).

5. Ванна (Ni 1,0 г) й аналітичний зразок — у шлюз (TN114).

Експерименти засвідчили, що найбільш прийнятним є перший варіант визначення вмісту кисню й азоту на аналізаторах TC436, RO316. Цей варіант використовують для аналізування титанових сплавів на вміст кисню й азоту, а п'ятий варіант — для визначення вмісту азоту на TN114 (табл. 2).

Концентрації кисню, азоту, водню, наведені в роботах [2, 13, 15], були визначені на приладах TC436, RO316, TN114, RH402 лабораторії аналізу газів у ме-

Таблиця 2. Визначення вмісту домішок кисню й азоту в сплавах на основі алюмініду титану TiAl

Table 2. Determination of oxygen and nitrogen contents in alloy, based on aluminide titanium TiAl

| Дегазування | Аналізування | Маса аналіт. зразка, г | Розміщ. ванни та аналіт. зразка* | % мас. x 10 ⁴ | | Аналізатор |
|----------------------|----------------------|------------------------|----------------------------------|--------------------------|------------------|------------|
| | | | | Кисень | Азот | |
| ~2700 °C ~30 сек. | ~2500 °C ~40 сек. | 0,05...0,15 | 1 | 762 ± 11 n = 9 ** | 21 ± 1 n = 9 | TC436 |
| | | | 2 | 747 ± 25 n = 10 | 21 ± 1 n = 10 | |
| | | | 3 | 752 ± 59 n = 3 | 21 ± 1 n = 3 | |
| | | | 1 | 758 ± 12 n = 5 | — | RO316 |
| | | | 2 | 752 ± 13 n = 5 | — | |
| 4 | — | 22 ± 2 n = 4 | TN114 | | | |
| 5 | — | 20 ± 2 n = 3 | | | | |

* дивись текст

** кількість паралельних визначень

талах Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України згідно з методикою, яку ми зараз представляємо. З деяких причин ми не вважали за потрібне її публікувати раніше.

Аналізування сплаву на основі TiAl на вміст водню ми виконували за таких режимів: температура дегазування ~1900 °C, температура аналізування ~1700 °C. Вміст водню в сплаві на основі TiAl не залежить від маси аналітичного зразка в інтервалі мас (0,05...0,15) г і складає (5,1 ± 1,1) x 10⁻⁴ % мас.

Сучасні аналізатори для визначення вмістів кисню, азоту, водню в металах (фірм LECO, Eltra, Heraeus, Balzers та інш.) мають однакові принципи екстракції газів з металів, схожі конструкції печей, газових трактів, детекторів для аналізування, графітових тиглів та т.п. Тому розроблені нами методики можуть бути використані на приладах цих фірм.

Таблиця 3. Вмісти хімічних елементів у неметалевих включеннях сплаву на основі TiAl (рис. 3)

Table 2. Constants of chemical elements in non — metallic inclusions in alloys, based on TiAl (fig. 3)

| Спектр | C | N | O | Na | Al | Si | Cl | K | Ca | Ti | Cr | Mn | Fe | Ni | Nb | Mo | La |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1 | 30,8 | 1,58 | 23,9 | 0,50 | 5,00 | 0,33 | 0,12 | 0,35 | 1,09 | 14,6 | 0,47 | 0,15 | 18,2 | 0,30 | 1,06 | 1,33 | 0,00 |
| 2 | 54,7 | 6,35 | 23,1 | 0,66 | 0,54 | 0,48 | 0,28 | 0,58 | 0,80 | 0,86 | 0,41 | 0,00 | 8,43 | 0,35 | 0,59 | 2,40 | 0,00 |
| 3 | 45,5 | 0,65 | 10,1 | 0,58 | 1,07 | 0,91 | 0,93 | 0,26 | 1,20 | 1,80 | 0,00 | 0,00 | 1,44 | 1,54 | 0,22 | 1,48 | 32,6 |
| 4 | 47,3 | 6,33 | 19,5 | 0,57 | 4,35 | 1,26 | 0,20 | 0,80 | 1,32 | 4,82 | 0,00 | 0,10 | 9,18 | 0,11 | 0,85 | 1,54 | 0,78 |
| 5 | 39,0 | 0,00 | 34,5 | 0,54 | 3,16 | 16,0 | 0,15 | 0,46 | 0,48 | 2,59 | 0,00 | 0,04 | 1,27 | 0,12 | 0,28 | 0,86 | 0,00 |

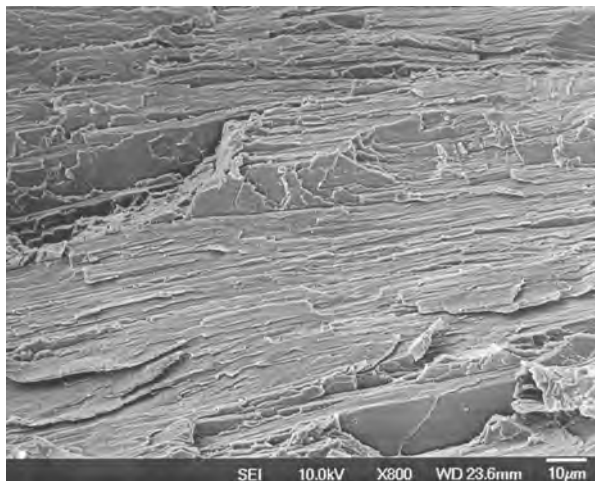


Рис. 1. Крихкий характер зламу сплаву на основі TiAl
Fig. 1. The fragile character of the fracture on alloy, based on TiAl

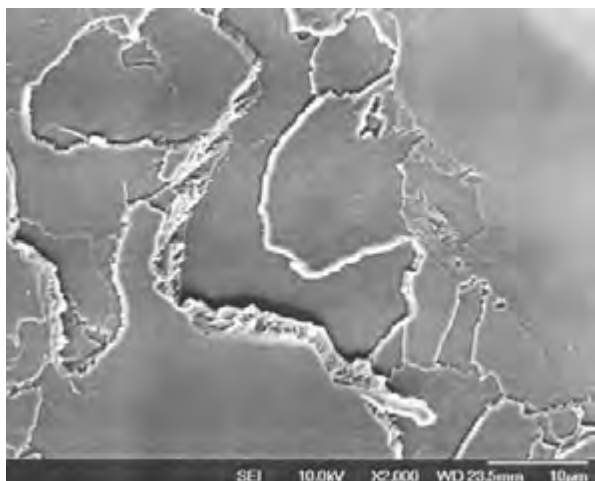


Рис. 2. Чисті (без виділень) поверхні лямелей зламу сплаву на основі TiAl
Fig. 2 The pure (without inclusions) lamela surfaces of the fracture on alloy, based on TiAl

Дослідження структурних та елементних складових сплаву на основі TiAl проводили за допомогою Оже — мікрозонда JAMP — 9500 F фірми JEOL, на якому встановлено рентгенівський енергодисперсійний спектрометр INCA Penta FETx3 (OXFORD INSTRUMENT), з використанням зламаних зразків, таких саме, як і для газового аналізу. Характер структури — лямельний, зламів — крихкий (рис. 1). У таблиці 3 наведено хімічні склади неметалевих включень з рис. 3. Поверхні лямелей чисті, без будь-яких виділень (наприклад, оксидів чи карбідів металів) (рис. 2). У сплаві наявні неметалеві включення роз-

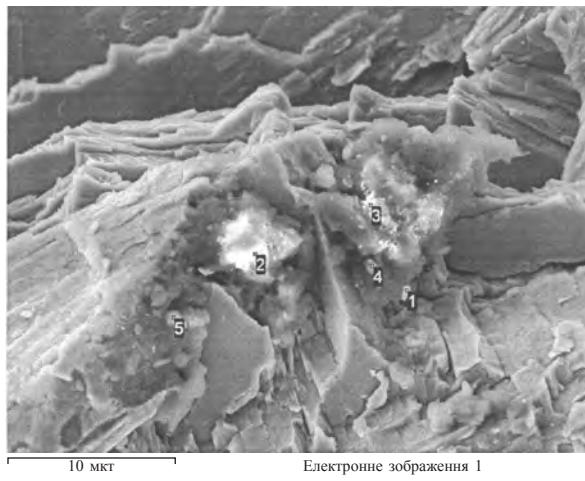


Рис. 3. Включення неметалевого характеру в злам сплаву на основі TiAl
Fig. 3. Inclusions of non-metallic nature in break of alloy, based on TiAl

міром (1...5) мкм (рис. 3). Для виявлення й ідентифікації неметалевих включень та встановлення можливого їхнього впливу на фізико-хімічні та механічні властивості сплавів на основі алюмінідів титану потрібні спеціальні дослідження з використанням можливостей світлової й електронної мікроскопії.

ВИСНОВКИ

Розроблено методики визначення вмісту кисню, азоту, водню в сплавах на основі алюмінідів титану:

1. Визначення вмісту кисню й азоту:

Аналізатор TC436 (або подібні до нього прилади інших фірм):

дегазація тиглю з Ni — Sn ванною (1,0 г Ni + 0,2 г Sn) ~2700 °C;

час дегазації ~30 сек.;

маса аналітичного зразка — (0,05...0,15) г;

розміщення аналітичного зразка — у шлюзі;

аналіз за температури ~2500 °C;

час аналізу ~40 сек.

2. Визначення вмісту водню:

Аналізатор RH402 (або подібні до нього прилади інших фірм):

дегазація тиглю зі Sn ванною (~2,0 г) ~1800 °C;

час дегазації ~(60...90) сек.;

маса аналітичного зразка (0,05...0,15) г;

розміщення аналітичного зразка — у шлюзі;


аналіз за температури ~1700 °C;

час аналізу ~90 сек.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

- Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С., (2009) Титановые сплавы. Состав. Структуры, свойства. Справочник, М., ВИЛС — МАТИ (Ilin A.A., Kolachev B.A., Polkin I.S., (2009) Titanium alloys. Composition, Structure, Properties, M., VILS — MATI). — 520 с/s.
- Григоренко Г.М., Шейко И.В., (2006) Индукционная плавка металлов в холодных тиглях и охлаждаемых секционных кристаллизаторах, К., Сталь (Grigorenko G.M., Shejko I.V.,

- (2006) Induction melting of the metals in cold crucibles and cooling sectional crystallizers, *K., Steel*, 320 c/s.
- Рябцев А.Д., Троянский А.А., Тарлов О.В., Пашинский В.В., Бенц М.Дж., Радченко В.Н., (2000) Исследование возможности получения титан — алюминиевого сплава методом электрошлакового переплава в инертной атмосфере под «активными флюсами», содержащими кальций *Проблемы специальной электрометаллургии (Rabtsev A.D., Trojanski A.A., Tarlov O.V., Pashinski V.V., Bentz M.G., (2000) Investigation of the possibilities of receiving titanium — aluminium alloys by electroslag remelting in inert atmosphere under «active» fluxes, containing calcium, Problems of the special electrometallurgy), №1, 75—78.*
 - Каблов Е.Н., Лукин В.И., (2008) Интерметаллиды на основе титана и никеля для изделий новой техники, *Автоматическая сварка (Kablov E.N., Lukin V.I., (2008) Intermetalloids on titanium and nickel bases for goods of new technic, Avtomatic welding), №11, 76—82.*
 - Куликовский Р.А., Пахолка С.Н., Павленко Д.В., (2015) Перспективы промышленного применения алюминидов титана в авиадвигателестроении, *Строительство, Материаловедение, Машиностроение: Стародубовские чтения (Kulikovski R.A., Paholka S.N., Pavlenko D.V., (2015) Perspectives of the industrial application of the titanium aluminides in avtomotorbuilding, Building, Material science, Mechanical engineering: Starodubovski reading), 369—372.*
 - Патон Б.Е., Тригуб Н.П., Ахонин С.В., Жук Г.В., (2006) Электронно-лучевая плавка титана, *К., Наукова думка (Paton B.E., Trigub N.P., Ahonin S.V., Zhuk G.V., (2006) Electron-beam melting of the titanium, K., Naukova dumka), 248 c/s.*
 - Северин А.Ю., (2014) Розробка технології електронно-променевого плавлення зливків алюмініду титану, мікролегованого бором та лантаном, автореф. дис. канд. техн. наук, НАН України, Інститут електросварювання ім. Є.О.Патона (Severin A.Y., (2014) Elaboration of the electron-beam melting technology of the titanium aluminide ingots, microalloyed by boron and lanthanum, avtoref. diss. kand. techn. nauk, NAN Ukraine, Instatute electrowelding, named E.O.Paton), *K.*, 22 c.
 - Горна І.Д., Баньковський О.І., Бегма М.Д., Котко А.В., Кулак Л.Д., Фірстов С.О., (2008) Структури і властивості сплавів на базі α_2 — Ti_3Al , легованих кремнієм. Фізико-хімічна механіка матеріалів (Gorna I.D., Bankovski O.I., Begma M.D., Kotko A.V., Kulak L.D., Firstov S.O., (2008) Structures and properties of the alloys, based on α_2 — Ti_3Al , alloyed by silicon, *Physic — chemical mechanics of the materials), №3, 3—11.*
 - Патон Б.Е., Тригуб Н.П., Ахонин С.В., (2008) Электронно-лучевая плавка титановых и высококремнистых металлов, *К., Наукова думка (Paton B.E., Trigub N.P., Ahonin S.V., (2008) Electron-beam melting of the refractory and high reactionary metals, K., Naukova dumka), 311 c/s.*
 - Поварова К.Б., Банных О.А., Буров И.В., Заварзина Е.К., Титова Т.Ф., Заварзин И.А., Иванов В.И., (1998) Структура и некоторые свойства литых сплавов на основе TiAl, легированных V, Nb, Ta, Hf, Zr, *Металлы (Povarova K.B., Bannyh O.A., Burov I.V., Zavarzina E.K., Titova T.F., Zavarzin I.A., Ivanov V.I., (1998) Structure and certain properties of the cast alloys on TiAl bases, alloyed by V, Nb, Ta, Hf, Zr, Metals), №3, 31—41.*
 - Компан Я.Ю., Назарчук А.Т., Петров Д.А., Белов А.М., Протоковилов И.В., (2009) Интерметаллидное жароупрочнение сплавов титана, получаемых способом магнитоуправляемой электрошлаковой плавки, *Проблемы специальной электрометаллургии (Kompan J.Y., Nazarchuk A.T., Petrov D.A., Belov a.m., Protokovilov I.V., (2009) Intermetallic heatresistivity of titanium alloys, that received by magnitoooperating electroslag melting, Problems of the special electrometallurgy), №1, 3—11.*
 - Жук Г.В., Тригуб Н.П., Замков В.Н., (2003) Получение слитков γ -алюминиды титана методом ЭЛПЕ, *Специальная электрометаллургия (Zhuk G.V., Trigub N.P., Zamkov V.N., (2003) Receiving of the γ -titanium aluminide by EBIC, Special electrometallurgy), №4, 20—22.*
 - Северин А.Ю., Жук Г.В., Тригуб Н.П., Топольский П.Ф., Петриченко И.К., (2008) Разработка и получение титанового сплава с повышенными жаропрочными характеристиками, *Специальная электрометаллургия (Severin A.Y., Zhuk G.V., Trigub N.P., Topolski P.F., Petrychenko I.K., (2008) Elaboration and receiving of the titanium alloys with increasing heat resistivity descriptions, Special electrometallurgy), №4, 17—19.*
 - Тригуб Н.П., Аснис Е.А., Березос В.А., Северин А.Ю., Пискун Н.В., Статкевич И.И., (2011) Получение сплавов интерметаллида системы TiAl с добавками бора и лантана способом ЭЛПЕ, *Специальная электрометаллургия (Trigub N.P., Asnis E.A., Berezos V.A., Severin A.Y., Piskun N.V., Statkevich I.I., (2011) Receiving of the Intermetalids alloys of TiAl system with additions of boron and lanthanum by EBIC, Special electrometallurgy), №3, 10—12.*
 - Кучук-Яценко В.С., Швец В.И., Сахацкий А.Г., Наконечный А.А., (2009) Особенности контактной сварки алюминидов титана с использованием нанослойных алюминиево-титановых фольг, *Автоматическая сварка (Kuchuk-Yatsenko V.S., Shvets V.I., Sahatski A.G., Nakonechny A.A., (2009) Peculiarity of the contact welding of the titanium aluminide with utilization nanolayers of aluminium-titanium foils, Avtomatical welding), №3, 19—22.*

16. Юштин А.Н., Замков В.Н., Сабокар В.К., Чвертко П.Н., (2001) Сварка давлением интерметаллидного сплава γ -TiAl, Автоматическая сварка (Yushtin A.N., Zamkov V.N., Sabokar V.K., Chvertko P.N., (2001) Pressure welding by intermetallic alloy γ -TiAl, Avtomaticheskaya welding). №1, 33—37.
17. Устинов А.И., Олиховская Л.А., Мельниченко Т.В., Шишкин А.Е., (2008) Твердофазные реакции при нагреве многослойных фольг Ti — Al, полученных методом электронно-лучевого осаждения, Современная электрометаллургия (Ustinov A.I., Olyhovska L.A., Melnychenko T.V., Shyshkin A.E., (2008) Solid-phase reactions attached to heating of the multilayer foils Ti — Al, that were received by electron-beam sediment method, Modern electrometallurgy), №2, 21—28.
18. Gam G., Bohm K.N., Kocak M., (1999) Diffusionsschweissen gegossener Titanaluminide, Schweissen und Schneiden, №8, 470—475.
19. Patterson R.A., Martin P.Z., Damkroger B.K., (1990) Christodoulou, Titanium Aluminide: electronbeam Weldability, Weld. Res. Supplement, №1, 39—44.
20. Калинюк М., (2014) Організація процесу аналізу титанових сплавів на вміст домішок кисню, азоту, водню та вуглецю, Метрологія та прилади (Kalyniuk M., (2014) Arrangement of the process of the analysis of titanium alloys on content of the impurities of oxygen, nitrogen, hydrogen and carbon, Metrology and instruments), №2, 50—57.
21. Калинюк М., (2014) Визначення вмісту «поверхневого» та «об'ємного» водню в алюмінії та сплавах на його основі, Метрологія та прилади (Kalyniuk M., (2014) Determination of «surface» and «volumetric» hydrogen content in aluminium and aluminium bases alloys, Metrology and instruments), №6, 61—69.
22. Haldgren R., Orr R.L., Fnderson P.D., Kelley K.K., (1963) Selected Values of Thermodynamic Properties John Wiley and Sons, Inc., N.Y., L., 963 s.
23. Вассерман А.М., Кунин Л.Л., Суровой Ю.Н., (1976) Определение газов в металлах, Наука, М. (Vasserman A.M., Kunin L.L., Surovoj Y.N., (1976) Determination gases in metals, Nauka, M.), 1976, 344 c/s.
24. Калинюк М., (2013) Визначення вмісту кисню у кремнії, Метрологія та прилади (Kalyniuk M., (2013) Determination of oxygen in silicium, Metrology and instruments), №6, 58—66.
25. Латаш Ю.В., Торхов Г.Ф., Калинюк Н.Н., Костенко Ю.И., (1986) Растворимость азота в жидких меди, никеле и сплавах Cu — Cr, Ni — Cr, Известия АН СССР. Металлы (Latash Y.V., Torhov G.F., Kaliniuk N.N., Kostenko Yu.I. (1986) Solubility of nitrogen in liquid copper, nickel and Cu — Cr, Ni — Cr alloys, Izvestia AN SSSR. Metals), №1, 45—49. 

Отримано / received: 26.02.2020.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н. О.Д. Сміяном (Україна).
D. Sc. (Techn.), O.D. Smiian, Ukraine, recommended this article to be published.

DOI: 10.33955/2307-2180(2)2020.68-71

УДК 616-093

ВИЗНАЧЕННЯ ТА АНАЛІЗУВАННЯ ГОЛОВНИХ ВИМОГ ДО КОМПЕТЕНТНОСТІ ЛАБОРАТОРІЙ

Definition and Analysis of the Main Requirements for Laboratory Competence



О. А. Никитюк, доктор сільсько-господарських наук, професор, заступник президента, Національна академія аграрних наук України, м. Київ, e-mail: tender.nmu@ukr.net

В. М. Новіков, доктор фізико-математичних наук, професор, Відокремлений структурний підрозділ «Інститут підвищення кваліфікації фахівців у галузі технічного регулювання та споживчої політики» Одеської державної академії технічного регулювання та якості, м. Київ, e-mail: secretar_ipk@ukr.net

O. A. Nykytyuk, doctor of agricultural sciences, professor, deputy president, National academy of agrarian sciences of Ukraine, Kyiv, e-mail: tender.nmu@ukr.net

V. M. Novikov, doctor of physical and mathematical sciences, professor, Institute for advanced training of specialists in the field of technical regulation and consumer policy of the Odessa state academy of technical regulation and quality, Kyiv, e-mail: secretar_ipk@ukr.net

Робота присвячена вивченню актуально-го питання технічного регулювання та метрології — визначенню критеріїв компетентності лабораторій.

Результати всесвітньої роботи з акредитації мають суб'єктивний характер і тому потребують постійного вдосконалення методів оцінки, що використовуються для визначення відповідності лабораторій стандартним вимогам до компетенції.

Проведено аналіз основних елементів системи управління, які відповідно до принципу Паретто, головним чином формують компетенцію лабораторій з її акредитації у національному органі.

Вперше автори за участю усіх зацікавлених сторін проаналізували та визначили основні вимоги до компетенції лабораторій у широкому діапазоні вимог ДСТУ ISO / IEC 17025: 2017.

Також вперше для аналізу критеріїв компетентності лабораторій була застосована технологія експертної оцінки.

Детально аналізуються рекомендації міжнародних організацій ILAC, EA та EUROLAB щодо критеріїв компетентності лабораторій. Особлива увага приділяється запровадженню конкретних вимог до компетентності персоналу та критеріїв акредитації, які так чи інакше пов'язані з компетентністю працівників лабораторій.

Експериментально встановлено (методом експертної оцінки), що такі елементи системи управління, як управління ризиками, управління персоналом, внутрішній аудит, внутрішньолабораторний контроль та міжлабораторні порівняння, сьогодні вважаються найважливішими для підтвердження компетентності лабораторій.

The work is devoted to the study of the actual issue of technical regulation and metrology — determination of criteria of competence of laboratories.

The results of the worldwide accreditation work are subjective in nature and therefore require continuous improvement in the assessment methods used to determine the compliance of laboratories with standard competency requirements.

The analysis of the main elements of the management system, which, in accordance with the Pareto principle, mainly form the competence of laboratories in its accreditation in the national body was held.

For the first time, the authors, with the involvement of all stakeholders, have analyzed and identified major competency requirements for laboratories across a wide range of DSTU ISO / IEC 17025: 2017 requirements.

Also, for the first time, the technology of peer review was applied to the analysis of the criteria of competence of laboratories.

The recommendations of ILAC, EA and EUROLAB international organizations for the criteria of competence of laboratories are analyzed in detail. Particular attention is given to the introduction of specific requirements for staff competence and accreditation criteria, which are in one way or another related to the competence of the laboratory staff.

It has been established experimentally (by the method of expert evaluation) that such elements of the management system as risk management, personnel management, internal audit, intralaboratory control and interlaboratory comparisons are considered today to be the most important in confirming the competence of a laboratory.



O. A. Никитюк



В. М. Новіков

Ключові слова: акредитація, управління персоналом, кваліфікація, компетентність
Keywords: accreditation, personnel management, qualification, competence

Одразу після публікації ISO нової версії стандарту ISO/IEC 17025:2017 [1] керівництво НААУ офіційним листом запросило зробити фаховий переклад [1] українською мовою.

У процесі перекладу (див. сайт ТОВ «НКЦ «ЄВРОАКАДЕМІЯ» [2]), що, в основному, увійшов до тексту відповідного робочого документа НААУ [3], було сформульовано пояснення та інтерпретації до деяких суттєвих положень [1] (у тексті [2] вони позначені «*»).

Досвід проведення навчань фахівців лабораторій та аудиторів НААУ довів актуальність необхідності аналізування та інтерпретації положень [1] для широкого кола фахівців лабораторій.

Очевидно, об'єм такої роботи, виконаної взагалі для усього тексту [1] надзвичайно великий навіть не для однієї, а для декількох робіт; тому метою цієї роботи було визначити найважливіші для підтвердження компетентності лабораторій елементи системи менеджменту (СМ) і стисло викласти в одній роботі результати аналізування саме цих головних елементів СМ.

Які ж саме елементи СМ (аргументовані підгрупи вимог до компетентності) гідні нашої з Вами уваги (тобто їх упровадження має викликати найбільші труднощі, а за аудиту в НААУ саме за цими вимогами можна отримати суттєві невідповідності виконання [1]).

Звісно, в кожній лабораторії підхід до подолання труднощів у процесі акредитації різний, відрізняється також досвід і оцінка ступеня важливості елементів СМ.

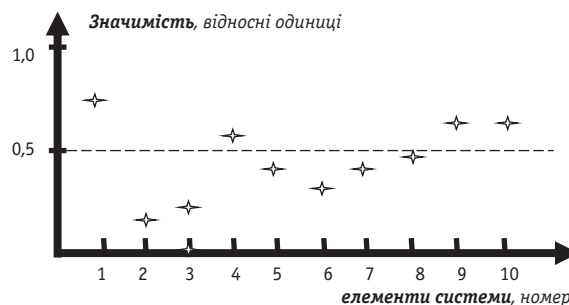
Досвід атестації аудиторів НААУ комісією з атестації персоналу НААУ доводить, що аудитори вважають найкритичнішими саме ті вимоги, інтерпретації яких наводиться у відповідних ILAC, EA — рекомендаціях [4, 5].

Тож думка постачальників послуг з акредитації нам зрозуміла — особливої уваги потребує аналізування тих ILAC, EA — рекомендацій, які стосуються лабораторій. Стосовно споживачів послуг акредитації (в нашому випадку — лабораторій), напевно, потрібно провести спеціальне дослідження, застосовуючи широковідомий метод експертних оцінок.

Експертами (споживачами послуг НААУ) будемо вважати фахівців лабораторій — слухачів відповідних курсів з підвищення кваліфікації, які у нас проводяться на постійній основі [2].

За січень-березень 2020 року опитування проводилося в трьох групах загальною чисельністю 57 чоловік.

Опитувальна анкета була простою. Від слухача вимагалось проставити оцінку важливості (за 5-тибальною системою) запропонованих із усієї сукупності [1] 10 елементів системи, а саме:



Експериментальні результати експертних оцінок важливості елементів СМ, зроблених фахівцями лабораторій

Experimental results of expert assessments of the importance of SM elements were made by specialists of laboratories

- управління ризиками та можливостями (1);
- управління документацією (2);
- управління даними (3);
- персонал (4);
- обладнання (5);
- умови довкілля (6);
- методики (7);
- управління невідповідною роботою і коригувальні дії (8);
- внутрішній аудит (9);
- внутрішньолабораторний контроль та міжлабораторні порівняння (10).

На рисунку представлено результати опрацювання отриманих даних експертних оцінок фахівців лабораторій ступеня значимості кожного з елементів системи у відносних одиницях (результати оцінки за 5-тибальною системою, поділені на 5).

Отримані результати засвідчують, що на сьогодні, на думку фахівців — споживачів послуг з акредитації НААУ, найбільш важливими елементами СМ є: управління ризиками і можливостями, управління персоналом, внутрішній аудит, внутрішньолабораторний контроль та міжлабораторні порівняння.

Для отримання даних щодо важливості елементів СМ для постачальників послуг з акредитації потрібно проаналізувати всі наявні рекомендації асоціації EA [5], ILAC [4] та EUROLAB [6] стосовно акредитації лабораторій.

Було виявлено такі публікації ILAC:

1. ILAC G3:08/2012 Guidelines for Training Courses for Assessors Used by Accreditation Bodies;
2. ILAC G24:2007 Guidelines for the determination of calibration intervals of measuring instruments;
3. ILAC P9:06/2014 ILAC Policy for Participation in Proficiency Testing Activities;

Публікації EA:

1. EA-4/02 M:2013 Evaluation of the Uncertainty of Measurement In Calibration;

2. EA-4/18 — *Guidance on the level and frequency of proficiency testing participation*;

3. EA-4/20:2014 — *Assessment of Laboratories against EN ISO 15189 and EN ISO 22870 Point-of-Care Testing (POCT)*.

EUROLAB надає рекомендації стосовно аналізування керівництва, управління персоналом, розрахунків невизначеності, скарг та ін.

Проведений аналіз наявних EA, ILAC та EUROLAB — рекомендацій засвідчує, що ці організації підкреслюють значимість і надають рекомендації щодо таких елементів СМ:

1. Міжлабораторні порівняння;
2. Установлення міжкалібрувальних інтервалів, розрахунки невизначеності;
3. Обладнання;
4. Управління персоналом лабораторії;
5. Аналізування керівництвом, внутрішні аудити.

Тож тепер маємо дані експертних оцінок ступеня важливості елементів СМ, отримані за результатами вивчення ILAC, EA, EUROLAB — рекомендацій, тобто фактично дані від постачальника послуг з акредитації.

Порівнюючи отримані дані з даними від споживачів послуг з акредитації, можна зробити висновок стосовно того, що є аргументовані підгрупи вимог до компетентності, надзвичайна важливість яких визначена обома зацікавленими сторонами. Це — міжлабораторні порівняння та управління персоналом.

Сучасний підхід до організації й проведення випробувань на професійність (PT) описаний в ILAC P9:06/2014 *ILAC Policy for Participation in Proficiency Testing Activities* (Загальні вимоги до політики НААУ у сфері випробувань на професійність, компетентність координаторів PT) та EA-4/18 INF:2010- *Guidance on the level and frequency of proficiency testing participation* (Рекомендації до частоти проведення PT в лабораторіях та формування груп методик сфери акредитації, результати PT, за якими можуть характеризувати рівень компетентності лабораторії в цілому).

Читач, безумовно, може ознайомитися самостійно з цими документами, тому не будемо їх детально розглядати. Підкреслимо тільки найважливіші, на наш погляд, положення. Потрібно розуміти, що PT мають бути організовані виключно компетентними координаторами, тобто акредитованою за ISO/IEC 17043 [7] лабораторією. Однак, сфера акредитації координатора завжди обмежена, що звужує можливості лабораторій для взаємного визнання за ISO/IEC 17043. Тому угод ILAC (MRA) чи EA MLA (BLA), які існують для, скажімо, акредитованих за ISO/IEC 17025 лабораторій, для координаторів PT нема, що додатково звужує можливості трансграничної, міжнародної участі лабораторій у PT.

Величезні можливості участі у PT відкриває Міжнародна база даних EPTIS (*European Proficiency Testing Information System*) [8].

Якщо координатор реєструє свою програму PT у цій міжнародній базі даних (без акредитації), то він автоматично вважається компетентним координатором, а лабораторії, що беруть участь у таких PT, доведуть свою компетентність по методикам сфери. Такий підхід не вимагає акредитації координатора, тобто не обмежується границями сфер акредитації і підписанням угод про визнання з ILAC чи EA (див., наприклад, сайт такого вітчизняного координатора [9]).

Перш ніж переходити до аналізування вимог Стандарту стосовно персоналу, ми радимо читачам ознайомитися з ILAC, EA, EUROLAB — документами, в яких сформульовано загальний методологічний підхід до того, як у лабораторії правильно організувати роботу з виконання вимог Стандарту з персоналу. Загальний підхід — використовувати цикл Демінга: «плануй-роби-перевірйай-коригуй».

Отже, лабораторія сама встановлює вимоги до персоналу (відповідно до вимог Стандарту), якщо вони не регламентовані регуляторними органами, описаннями методик чи обладнання; сама перевіряє виконання визначених вимог як до «кваліфікації», так і до «компетентності»; сама слідкує за необхідністю коригувань чи вдосконалень.

Стандарт вимагає наявності документованої процедури управління персоналом у лабораторії та ведення документованих доказів їх виконання.

Розрізняють поняття кваліфікації, як необхідного рівня знань для виконання певної функції (роботи), та компетентності, як здатності застосовувати ці знання, тобто доведеної здатності виконувати покладені функції.

Стандартом вимагається документування вимог до кваліфікації всього персоналу. Весь персонал лабораторії за функціями зазвичай розподіляють (умовно) на персонал, що виконує функції управлінські (менеджменту); технічний персонал (оператори, задіяні у виконанні методик досліджень протягом усього життєвого циклу виконання дослідження); допоміжний персонал (наприклад, відділ кадрів чи прибиральниці).

Підкреслимо, що вимоги до кваліфікації всього персоналу повинні бути встановлені.

Як правило, ці вимоги встановлюються у посадових інструкціях. Рекомендуємо в Настановах з якості лабораторій розробляти матриці відповідальності в рамках СМ (де визначалися б відповідальності й повноваження персоналу по елементах СМ, процедурах СМ) і матриці відповідальності за технічні операції, де визначалися б повноваження і відповідальності

за виконання технічних процесів життєвого циклу. У такий спосіб і мають бути встановлені вимоги до компетентності всього персоналу. Нічого нового у цих вимогах до персоналу немає. Всі пам'ятають посадові інструкції ще радянських часів, у яких були обов'язкові розділи: «повинен знати...» (кваліфікація) і «персонал повинен вміти...» (компетентність).

Якщо вимоги до кваліфікації й компетентності персоналу регламентовано регуляторними документами, методиками, описаннями до обладнання, то лабораторія має встановити саме ці регламентовані вимоги.

Стосовно сумісників та інших тимчасово залучених, треба зазначити, що, оскільки етичні аспекти та неупередженість мають значення для медичних лабораторій, то функції та взаємозв'язки цього персоналу «за основним місцем роботи» мають бути прописані, а ризики його неупередженості виявлені (як правильно рекомендують відповідні ІЛАС-рекомендації).

Уведення стажистів до штату лабораторії має відбуватися за визначеною лабораторією програмою.

Тут потрібно пам'ятати, що під час стажування персонал не відповідає за якість своєї роботи (відповідає старший, знайомий з функціями роботи; необхідний час і умови стажування визначає лабораторія, як і критерії, за якими вона може довести відповідність компетентності персоналу своїм вимогам і щодо введення до штату).

У Стандарті зазначено, за якими саме напрямками (як мінімум, має здійснюватися підготовка персоналу; окремо Стандартом визначено вимоги до аудиторів і персоналу, що інтерпретує результати).

Найскладнішим питанням є оцінювання компетентності персоналу. Рекомендується навіть створювати окрему процедуру оцінювання компетентності персоналу.

Традиційно оцінювання ступеня виконання персоналом установлених вимог до компетентності раніше називали атестацію персоналу.

Стандарт вимагає, щоби лабораторія (по кожному співробітнику окремо) пересвідчилася у виконанні вимог до компетентності.

Тож треба мати критерії, за якими можна оцінити ступінь відповідності вмінь персоналу (пересвідчитися у компетентності).

Лабораторія має вибрати і встановити критерії оцінки компетентності кожного та періодично оцінювати компетентність кожного за критеріями.

Особливою додатковою вимогою саме цього Стандарту є: «Необхідне періодичне оцінювання результативності роботи персоналу, тобто ступеня досяжності цілі кожного із працюючих у загальному розумінні щорічних цілей і задач лабораторії».

Програми постійного підвищення кваліфікації мають охоплювати весь персонал (регулярно).

Тобто, спочатку має виявлятися потреба в підготовці персоналу (кожного), далі — формуватися програми підвищення кваліфікації, далі — проводиться моніторинг їх виконання. Лабораторія має оцінювати результативність підвищення кваліфікації кожного після навчання. В ІЛАС — рекомендаціях зазначається, що лабораторія має обґрунтовувати випадки, у разі, коли підвищення кваліфікації для певної особи не є потрібним.

Періодичність підвищення кваліфікації не визначено ні Стандартом, ні ІЛАС/ЕА — рекомендаціями. Зазвичай цю періодичність пов'язують із міжакредитаційним інтервалом, якщо немає інших ризиків цілісності функціонування СМ (зміни структури, керівництва, персоналу та ін.)

Періодичність і вимоги до підвищення кваліфікації можуть регламентуватися і регулятором, тоді ці вимоги треба постійно виконувати.


Оскільки діяльність лабораторії постійно вдосконалюється, то мають удосконалюватися і змінюватися з часом також вимоги до кваліфікації та компетентності персоналу (нові обладнання, методики, приміщення тощо), тож обговорюваний вище цикл Демінга по персоналу має повторюватися.

ВИСНОВКИ

Уперше методом експертних оцінок визначено рівень значимості елементів СМ лабораторій під час акредитації.

Наведено результати аналізування таких важливих вимог до компетентності елементів СМ, як випробування на професійність і управління персоналом.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. ISO/IEC 17025:2017 General requirements for the competence of testing and calibration laboratories;
2. <http://www.euroacademia.com.ua/>;
3. <https://naau.org.ua/>;
4. <https://ilac.org/>;
5. <https://european-accreditation.org/>;
6. <https://www.eurolab.org/>;
7. ISO/IEC 17043:2010 Conformity assessment — General requirements for proficiency testing;
8. <https://www.eptis.org/>;
9. <https://www.metrologyservice.com.ua/> 

Отримано / received: 02.04.2020.

Стаття рекомендована до публікації д.ф.-м.н., проф. І.М. Вергуною (Україна).
Prof. I.M. Vergunova, D. Sc. (Phys.-mat.), Ukraine, recommended this article to be published.

Міністерство розвитку економіки, торгівлі та сільського господарства України
 Міністерство освіти і науки України
 Харківський національний університет радіоелектроніки
 Північно-Східний науковий центр Національної академії наук і Міністерства освіти і науки України



Національний науковий центр
«Інститут метрології»

XII МІЖНАРОДНА НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ

МЕТРОЛОГІЯ
ТА ВИМІРЮВАЛЬНА
ТЕХНІКА



6–8 жовтня 2020 р., м. Харків

Мета конференції: стимулювання розвитку науки про вимірювання і впровадження її досягнень у дослідження, практику і освіту.

На конференції планується розглянути такі питання:

- Відтворення та поширення одиниць *SI*
- Фундаментальна метрологія та простежуваність
- Результати міжнародних звірень
- Еталони та вимірювальні системи
- Сенсори, давачі та інтелектуальні системи
- Індустрія 4.0 та адитивні технології
- Комп'ютерне моделювання для потреб метрології
- Метрологія для підвищення ефективності та надійності енергетичних систем та мереж
- Нові документи та стандарти в метрології, законодавча метрологія

Учасники конференції можуть подати доповіді у таких видах вимірювань:

- акустика, ультразвук, вібрація (*AUV*);
- електрика та магнетизм (*EM*);
- довжина та кут (*L*);
- маса та пов'язані з нею величини (*M*);
- фотометрія та радіометрія (*PR*);
- фізична хімія (*QM*);
- іонізуючі випромінювання (*RI*);
- температура (*T*);
- час та частота (*TF*).

У рамках конференції планується проведення нової секції «Метрологічні аспекти обліку природного газу»

Учасникам конференції пропонується надати тези доповідей відповідно до шаблону, який розміщено на сайті www.metrology.kharkov.ua/index.php?id=mvt2020

Ключові дати: **20 травня** — кінцевий термін приймання тез наукових доповідей;
1 червня — кінцевий термін приймання заявок та доповідей;
1 вересня — кінцевий термін приймання заявок для учасників без доповідей;
1 жовтня — кінцевий термін приймання платежів;
5–6 жовтня — заїзд учасників;
6 жовтня — відкриття конференції.

Контакти:

Адреса оргкомітету:

ННЦ «Інститут метрології»,
 вул. Мироносицька, 42, Харків, 61002, Україна
 E-mail: MVT2020@metrology.kharkov.ua

Довідки за телефоном:

(057) 704-98-12 — секретар Ганна Мицік

Оформлення договорів:

(057) 704-97-73

(057) 700-35-77 — Ірина Каліберда

Матеріали необхідно надсилати на електронну адресу: MVT2020@metrology.kharkov.ua

Форми запрошення, заявки на участь у конференції, вимоги до оформлення доповідей, реквізити, а також іншу додаткову інформацію можна знайти на сайті: www.metrology.kharkov.ua