

Вимірюйте
усе доступне вимірюванню
й робіть недоступне вимірюванню
доступним.

Галілео Галілей

ISSN 2307-2180

Метрологія



Та прилади

METROLOGY AND INSTRUMENTS

№ 5 (85), 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:

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.
Сичикова Я.О., д. т. н.
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.Б., 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

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](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;
Свідоцтво про внесення
до Держреєстру видавців,
виготівників і розповсюджувачів
видавничої продукції
серія ХК № 90 від 17.12.2003.

Підписано до друку 05.11.2020.
Формат 60×84/8. Папір крейдований.
Ум. друк. арк. 8,43. Обл.-вид. арк. 7,13.
Друк офсетний. Тираж 400 прим.
Замовлення № 46.

© «Метрологія та прилади», 2020

Журнал зареєстровано
у Міністерстві юстиції України,
свідоцтво серія КВ № 22796-12696ПР
від 03.07.2017;
включено до Переліку наукових
фахових видань України, в яких
можуть публікуватися результати
дисертаційних робіт на здобуття наукових
ступенів доктора наук, кандидата наук
та ступеня доктора філософії (категорія В),
затвердженого Наказом Міністерства освіти
і науки України № 409 від 17.03.2020
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 № 22796-12696PR
dated 03.07.2017;

is included to the List of scientific
professional publications of Ukraine,
in which the results of dissertations
for the degree of doctor of sciences,
candidate of sciences and the degree
of doctor of philosophy (category B),
may be published, approved by the order
of the Ministry of Education and Science
of Ukraine No. 409 dated 17.03.2020
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.
Koshovyi 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.
Sychikova Ya.O., D.Sc. (Eng.)
Tuz Yu.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)
Mykhalchenko 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.
Surdu 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

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](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 05.11.2020
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 46.

ISSN (print) 2307-2180

ISSN (online) 2663-9564

DOI: 10.33955/2307-2180

© «Metrology and Instruments», 2020

ТЕНДЕНЦІ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

Коржак О. В., Петришин І. С., Бас О. А.

Перспективи розвитку метрологічного забезпечення обліку скрапленого вуглеводневого газу в Україні 3

МЕТОДИ ТА МЕТОДИКИ

Кошева Л. О., Моїсенко Є. В., Іванець О. Б.

Метод оптимізації досліджень для оцінювання біологічної рівноваги людини 11

НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ

Серіков Я. О.

Принципи формування типів пружних хвиль за дослідження надійності монолітних і багатoshарових будівельних конструкцій ультразвуковим імпульсним методом 17

ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ ТА СИСТЕМИ

Яцишин С. П., Мідик А. В., Лиса О. В.

Кіберфізична система для вирощування овочів з регулюванням тепло-вологісно-інсоляційного режиму 23

ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ТА СЕНСОРИ

Ащеулов А. А., Дерев'янчук М. Я., Лавренюк Д. А.,

Веренко О. С., Романюк І. С.

Анізотропний електроомічний трансформатор 27

ПОХИБКИ ТА НЕВИЗНАЧЕНOSTI

Воробіов Л. Й., Декуша О. Л., Кобзар С. Г., Декуша Л. В.

Оцінювання складової похибки вимірювання теплового потоку, зумовленої нерівномірністю просторової чутливості перетворювача 33

ШКАЛИ ВИМІРЮВАННЯ

Промоскаль В. І., Заруба В. К., Близниченко О. М.,

Будко В. В., Бикова Т. І.

Подання результатів контролю неметричними шкалами процесів в енерготехнології вугільних енергоблоків ТЕС 42

ЯКІСТЬ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ

Аксioнова Л. І.

Статистичне дослідження результативності процесів у ході здійснення аудиту якості 55

НАНОМЕТРОЛОГІЯ

Ковальчук В. В.

Глибоко субмікронні частинки у твердотільному матричному оточенні 59

ВІЙСЬКОВА МЕТРОЛОГІЯ

Дзисюк О. В., Бойко В. М., Тішкін В. В.

Актуальні питання розроблення нормативної основи метрологічного забезпечення процесу контролю та управління еталонними сигналами часу і частоти у Збройних Силах України 64

КОМПЕТЕНТНІСТЬ ЛАБОРАТОРІЙ

Коржов І. М., Новомодний О. М., Мигущенко Р. П.

Перевірка професійного рівня: калібрування мегомметрів 69

TRENDS AND PROSPECTS FOR DEVELOPMENT

Korzhak O. V., Petryshyn I. S., Bas O. A.

Prospects for the Development of Liquefied Petroleum Gas Metrological Base in Ukraine

METHODS AND PROCEDURES

Kosheva L. O., Moiseyenko Ye. V., Ivanets O. B.

Method the Optimization of Research for Evaluation of Biological Balance of A Organism

NONDESTRUCTIVE CONTROL

Serikov Ya. A.

Principles of Formation of Types of Elastic Waves When Studying the Reliability of Monolithic and Multilayer Building Structures by the Ultrasonic Pulse Method

MEASURING INSTRUMENTS AND SYSTEMS

Yatsyshyn S. P., Midyk A. V., Lisa O. V.

A Cyber-Physical System for the Vegetables Production with the Heat-Moisture-Insolation Control

CONVERTERS AND SENSORS

Ashcheulov A. A., Derevianchuk M. Ya., Lavreniuk D. A.,

Verenko O. S., Romanjuk I. S.

Anisotropic Electroohmic Transformer

ERRORS AND UNCERTAINTY

Vorobiov L. Y., Dekusha O. L., Kobzar S. G., Dekusha L. V.

Estimation of the Component of the Heat Flux Measurement Error Due To the Non-Uniformity of the Spatial Sensitivity of the Transducer

MEASURING SCALES

Promoskal V. I., Zaruba V. K., Blyznychenko O. M.,

Budko V. V., Bykova T. I.

Presentation of Control Results By Non-Metric Scales of Processes In Energy Technology of Coal-Fired Power Units

QUALITY AND EFFICIENCY

Aksionova L. I.

Statistical Study of Process Efficiency During Quality Audit

NANOMETROLOGY

Kovalchuk V. V.

Deep Submicron Particles In A Solid Matrix Environment

MILITARY METROLOGY

Dzisyuk O. V., Bojko V. M., Tishkin V. V.

Pressing Questions of Working Out of a Standard Basis of Metrological Maintenance of Process of the Control and Management of Reference Signals of Time and Frequency in Armed Forces of Ukraine

COMPETENCE OF LABORATORIES

Korzhov I. M., Novomodny O. M., Mygushchenko R. P.

Professional Level Check: Calibration of Megohmmeters

DOI: 10.33955/2307-2180(5)2020.3-10

УДК389.64:66.078

ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ МЕТРОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОБЛІКУ СКРАПЛЕНОГО ВУГЛЕВОДНЕВОГО ГАЗУ В УКРАЇНІ

Prospects for the Development Liquefied Petroleum Gas Metrological Base in Ukraine

О. В. Коржак, генеральний директор,
І. С. Петришин, доктор технічних наук, професор,
головний науковий співробітник,
О. А. Бас, кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник,
ДП «Івано-Франківськстандартметрологія»,
Івано-Франківськ, Україна,
e-mail: alexandr.sanya@gmail.com

O. V. Korzhak, general director,
I. S. Petryshyn, doctor of technical sciences, professor,
chief researcher,
O. A. Bas, candidate of technical sciences,
senior researcher,
SE «Ivano-Frankivskstandardmetrology»,
Ivano-Frankivsk, Ukraine,
e-mail: alexandr.sanya@gmail.com

Обговорено актуальні питання розвитку метрологічного забезпечення обліку скрапленого вуглеводневого газу (СВГ) в Україні. Акцентовано увагу на відсутності вищої ланки відтворення одиниць об'єму та об'ємної витрати СВГ. Проведено репрезентативне моделювання з урахування зміни рідкої фракції СВГ відносно процентної зміни основних компонентів. Також показано нелінійну залежність густини парової фази СВГ залежно від надлишкового тиску та температури. Представлено аналіз нормативного та технічного метрологічного забезпечення обліку СВГ в Україні та показано світовий досвід. Обґрунтовано доцільність застосування об'ємного динамічного методу реалізації відтворення одиниць об'єму та об'ємної витрати СВГ із використанням установки поршневого типу. Розроблено структурну та гідравлічну схеми еталона одиниць об'єму та об'ємної витрати СВГ.

The article is devoted to the development of metrological base liquefied petroleum gas (LPG) in Ukraine. It was announced that the Technical Regulations on LPG Requirements will be put into effect, the annexes to which set requirements for the quality parameters of LPG. Emphasis is placed on the absence of a higher level of reproduction of units LPG volume and volume flow rate and, accordingly, the

inability to implement a traceability chain in terms of calibration of working standards. Representative modeling is performed taking into account the change of the liquid fraction of LPG relative to the percentage change of the main components (propane and butane). The nonlinear dependence of the density of the LPG vapor phase as a function of excess pressure and temperature is also shown. The analysis of normative (ISO, API, OIML) and technical metrological (standard prover) support LPG accounting in Ukraine is presented and the world experience is shown. The procedures for calibration of LPG meters and fuel columns using a water meter by the method of equivalent volumetric displacement of LPG liquid are given. The expediency of application the volume dynamic method for realization reproduction units LPG volume and volume flow rate with piston prover is substantiated. The structural scheme of the standard units LPG volume and volume flow rate is developed. The diagram details the components of the measuring cylinder and the drive system in the form of an actuator based on an electromechanical cylinder with a stepper motor. The hydraulic scheme of the standard is built using two tanks with butane and propane with the ability to specify different values of the volume percentage of the components of the propane-butane mixture. Emphasis is placed on the need to maintain the excess pressure required to exceed the vapor limit of LPG components.

Ключові слова: СВГ, еталон, об'єм, об'ємна витрата, поршнева установка, еталонний лічильник.
Keywords: LPG, standard, volume, volume flow rate, piston prover, master meter.

За умов невинного зростання вартості енергоносіїв та їх дефіциту, велика увага приділяється підвищенню точності обліку енергоресурсів, зокрема скрапленого вуглеводневого газу (СВГ). Цей продукт набув ширшого використання у народному господарстві України, зокрема в комунально-побутовій сфері. Окрім цього, скраплений вуглеводневий газ також застосовується як автотранспортне паливо.



О. В. Коржак



І. С. Петришин



О. А. Бас

Постановою Кабміну України № 667 від 29.07.2020 року, яка набуває чинності через шість місяців від дати публікування, затверджено Технічний регламент щодо вимог до газу скрапленого для автомобільного транспорту, комунально-побутового споживання та промислових цілей. Пунктом 2 зазначеної Постанови скраплені гази віднесено до переліку видів продукції, щодо яких органи державного ринкового нагляду здійснюють державний ринковий нагляд. Відповідно до вимог Технічного регламенту скраплені гази підлягають оцінці відповідності, яку, згідно з [1], здійснюють призначені Мінекономіки Органи з оцінки відповідності (ООВ). Однією з основних вимог під час призначення Органу з оцінки відповідності є за свідчення компетентності Національним агентством України з акредитації (НААУ) та наявність акредитованої, згідно з вимогами ДСТУ ISO 17025 [2], випробувальної лабораторії. Потрібно відзначити, що на етапі акредитації випробувальної лабораторії, окрім перевіряння технічної компетенції та кваліфікації персоналу, вимагається підтвердження простежуваності еталонів та випробувального обладнання лабораторії до національних еталонів, яка забезпечується через нерозривний ланцюг калібрування кожної ланки.

Скраплені (вуглеводневі) гази (*liquefied petroleum gas* — *LPG*) — це суміш вуглеводневих компонентів групи С — Н, які за нормальних (стандартних) умов перебувають у газоподібному агрегатному стані, а за збільшення надлишкового тиску та постійної температури в замкненому об'ємі або зниження температури за умови атмосферного тиску переходять із газоподібного стану в зріджений і перебувають у рідкій фракції. Основними компонентами СВГ, який застосовується в Україні як паливо для автомобільного транспорту та комунально-побутового споживання, є: пропан (C_3H_8) і бутан (C_4H_{10}), процентний вміст яких нормується. Окрім того, до складу СВГ можуть входити інші гази: метан, етан, етилен та пропілен і бутилен, а також пентан і гексан (рідкий залишок яких аналогічно нормується).

Сировиною для отримання СВГ є, в основному, нафтові попутні гази, продукція газоконденсатних родовищ і гази, отримувані в процесі перероблення нафти та в процесі ректифікації широкої фракції легких вуглеводнів [3].

Висока теплотворна здатність, чистота згорання під час використання як палива для автомобільного транспорту, зручність зберігання та транспортування, відсутність корозії, можливість подальшого хімічного перероблення — основні чинники, що забезпечують постійне зростання використання СВГ. Відповідно розширюється і мережа автогазозаправ-

них станцій (АГЗС), обладнаних колонками для відпуску СВГ. Окрім того, СВГ застосовуються як сировина для органічного синтезу.

Реалізація СВГ в Україні як комерційного продукту для кінцевого споживача здійснюється в одиницях об'єму на автогазозаправних станціях (АГЗС) для автомобільного транспорту або газонаповнювальних станціях в балонах для комунально-побутового споживання. Транспортування СВГ до зазначених станцій здійснюється спеціалізованими автоцистернами, які, зазвичай, обладнані лічильниками об'єму відпущеного СВГ.

Відповідно до Закону України «Про метрологію та метрологічну діяльність» облік енергетичних та матеріальних ресурсів, торговельно-комерційні операції (до яких належить відпуск СВГ) відносяться до сфери законодавчо регульованої метрології. Тому питання, що стосуються підвищення точності та достовірності обліку СВГ, метрологічного забезпечення законодавчо регульованих ЗВТ для його комерційного обліку є актуальними на сьогодні.

Проведемо короткий аналіз наявного стану метрологічного забезпечення обліку СВГ в Україні та закордоном, зокрема його нормативну та технічну основу.

Наразі в Україні щодо використання СВГ у комунально-побутовій сфері та як палива для автомобільного транспорту діють ДСТУ 4047-2001 [4], ГОСТ 27578-87 (чинний в Україні до 01.01.2022) [5] та гармонізований ДСТУ EN 589:2017 (EN 589:2008+A1:2012, IDT), чинність якому надана від 01-02-2018 [6]. Ці стандарти регламентують загальні технічні та якісні характеристики СВГ, проте в них відсутні вимоги до точності обліку такого продукту. Ці вимоги загалом встановлені в «Інструкції про порядок приймання, зберігання, відпуску та обліку газів вуглеводневих скраплених для комунально-побутового споживання та автомобільного транспорту» (Інструкції), затвердженої наказом Міністерства палива та енергетики України № 332 від 03.06.2002.

У розділі 4 зазначеної «Інструкції» кількість СВГ визначається одним із методів, передбачених ГОСТ 26976-86 [7]:

- масовим — у разі визначення маси шляхом зважування на вагах для статичного зважування;
- об'ємним — у разі визначення об'єму в резервуарах бази зберігання та автоцистернах, а також для обліку СВГ під час продажу на АГЗС;
- об'ємно-масовим — у разі визначення маси СВГ за об'ємом і густиною за умов фактичної температури.

Проте, нині в Україні ГОСТ 26976-86 відмінений, натомість чинним є ДСТУ 7094:2009 Метрологія. Маса нафти та нафтопродуктів. Загальні вимоги до методик виконання вимірювання (ГОСТ 8.587-2006, MOD) [8], відповідно до якого, передбачені такі методи вимірювань кількості продукту:

- прямий метод статичних вимірювань (зважування на вагах);
- прямий метод динамічних вимірювань (за допомогою лічильника-масоміра);
- опосередкований метод динамічних вимірювань (за допомогою вимірювання об'єму лічильником та густини);
- опосередкований метод статичних вимірювань (за допомогою вимірювань рівня та густини або за допомогою градувальних таблиць).

Окрім того, в цій «Інструкції» наведено посилання на ряд документів, які втратили чинність, наприклад, ПМУ 21-2001 «Правила користування засобами вимірювальної техніки у сфері торгівлі, громадського харчування та надання послуг». В «Інструкції» також відсутні метрологічні характеристики колонок паливороздавальних відпуску СВГ для заправлення паливних балонів автотранспортних засобів СВГ на комерційних АГЗС тощо.

Як свідчить проведений аналіз ця «Інструкція» потребує суттєвого доопрацювання, що і передбачено наказом Мінпаливенерго №162 від 16.03.2012, згідно з яким вона підлягає перегляду та приведенню у відповідність з чинним законодавством України.

Характерним параметром СВГ, як суміші вуглеводневих газів, є змінне значення компонентного складу, залежно від марки СВГ або типу суміші (додаток 1, додаток 2 Технічного регламенту), що, у свою чергу, впливає на безпосередню зміну густини та інші фізико-хімічні властивості СВГ, пов'язані зі складнощами організації обліку скрапленого вуглеводневого газу. Для прикладу, проілюструємо результати моделювання зміни густини газів відносно процентного вмісту основних складових СВГ (пропану і бутану) (рис. 1) та зміну густини рідкої фракції вуглеводневих компонентів за зміни температури (рис. 2), з якого видно, що густина СВГ є параметром динамічним.

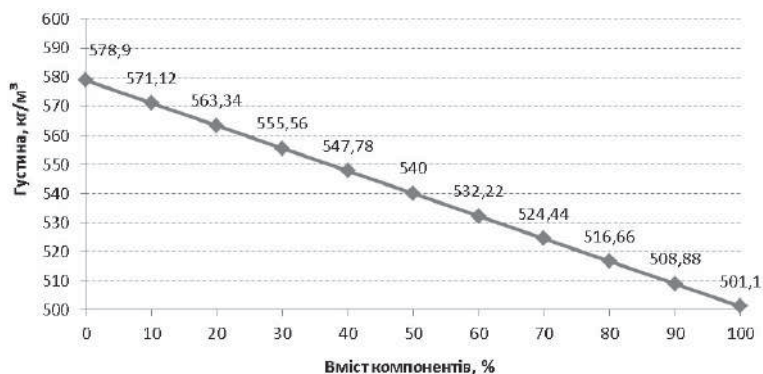


Рис. 1. Результати моделювання зміни густини СВГ залежно від процентного вмісту компонентів пропану і бутану (від 0 до 100 %)
Fig. 1. The results of modeling the change in the density of LPG depending on the percentage of propane and butane components (from 0 to 100 %)

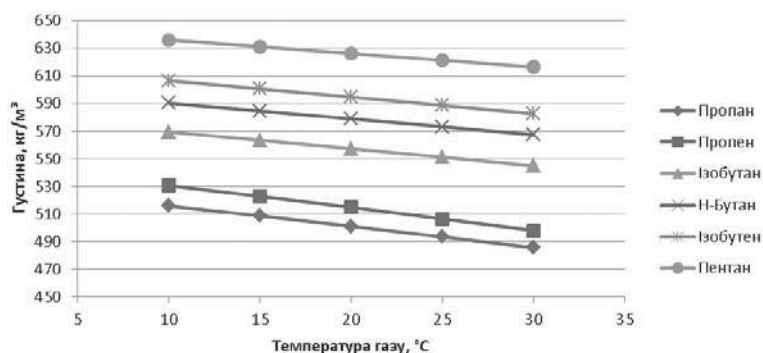


Рис. 2. Результати аналітичних досліджень зміни густини від температури в діапазоні від 10 °C до 30 °C основних компонентів СВГ
Fig. 2. The results of analytical studies of changes in density from temperature in the range from 10 °C to 30 °C of the main components of LPG

Окрім того, суттєвим параметром СВГ є наявність парової фази. На рис. 3 наведено зміну густини парової фази СВГ залежно від температури та процентного вмісту компонентного складу. Також з графіка видно, що за зростання температури відбувається зростання надлишкового тиску парової фази через коефіцієнт об'ємного розширення, який для пропану складає 0,003 / °C, а для бутану — 0,0022 / °C [9], внаслідок чого залежність має нелінійний характер. Отже, проведені дослідження свідчать, що густини рідкої й газоподібної фракції СВГ та наявні фазові переходи негативно впливають на зміну маси СВГ та відповідно недостовірність його обліку. Така особливість пароутворення газу накладає певні обмеження у частині експлуатації етапного обладнання.

Для більш детального та ґрунтовнішого аналізу розглянемо нормативну основу метрологічного забезпечення обліку природного газу в провідних країнах світу.

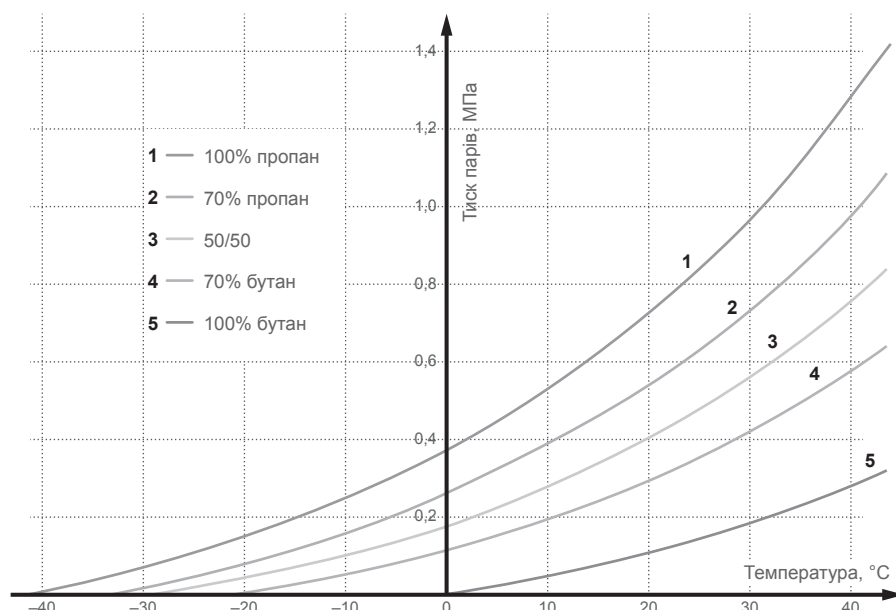


Рис. 3. Залежності зміни густини парової фази СВГ залежно від температури та процентного вмісту компонентів

Fig. 3. Dependences of changes in the density of the vapor phase of LPG depending on the temperature and the percentage of components

На теренах Європейського Союзу (ЄС) основоположним документом, що регламентує облік СВГ є стандарт *OIML* (Міжнародної організації законодавчої метрології) *R 117 Measuring systems for liquids other than water* (Вимірювальні системи для рідин, інших, ніж вода) [10]. Цей документ встановлює технічні та метрологічні вимоги щодо вимірювальних систем, що використовуються для обліку рідин, які, як зазначається в назві стандарту, за своїми властивостями відмінні від води. У стандарті наведено ланцюг вимірювання рідин на всіх стадіях: від виробництва/отримання СВГ — до роздавальних колонок на автогазозаправних станціях, з відповідними допустимими похибками на кожному етапі вимірювання. Що стосується стандартів *ISO* (Міжнародної організації зі стандартизації), то розроблено стандарт *ISO 6578 Refrigerated hydrocarbon liquids — Static measurement — Calculation procedure* [11]. Цей стандарт описує процедури визначення об'єму та маси скрапленого природного газу (*LNG*) та СВГ (*LPG*). У США облік вуглеводнів регламентується стандартами *API* (*American Petroleum Institute* — Американського інституту з питань палива), що у США мають статус національних стандартів. Цим інститутом розроблені нормативні документи з питань обліку скраплених газів, процесу вимірювання, точності вимірювання, метрологічного забезпечення (у сфері калібрування робочих засобів вимірювань та еталонних установок) обліку скраплених газів [12].

І на завершення короткого аналізу нормативного метрологічного забезпечення стосовно обліку СВГ доцільно відзначити те, що в Україні впроваджено гармонізований міжнародний стандарт *OIML R 117 Measuring systems for liquids other than water* під шифром ДСТУ *OIML R 117-1:2014* Динамічні вимірювальні системи для рідин, інших, ніж вода. Частина 1. Метрологічні та технічні вимоги (*OIML R117-1:2007, IDT*) [13].

Наступна частина статті стосуватиметься аналізу технічної основи

метрологічного забезпечення обліку СВГ. Основний аналіз стосуватиметься наявної міжнародної практики зі створення еталонів одиниць об'єму та об'ємної витрати СВГ.

Для початку доцільно проаналізувати основні принципи і відповідно методи, які на них базуються і використовуються для технічної реалізації еталонного обладнання. Зазвичай, в основу вимірювання закладено фізичну одиницю, яка у подальшому використовуватиметься для побудови ієрархічної схеми передавання розміру одиниці. Однак, для деяких типів еталонних установок за основу береться інша фізична одиниця, а потрібна уже визначається як похідна. Стосовно установки такого типу йтиметься далі.

Один із найпоширеніших і часто застосовуваних методів відтворення одиниці об'єму — об'ємний статичний метод з використанням еталонного мірника [14]. Реалізуючи такий метод, необхідно врахувати декілька основних впливних факторів, а саме: температурні об'ємні розширення робочої рідини, тобто СВГ, та тіла мірника. Окрім того, для вимірювання різних значень об'ємів необхідно використовувати велику кількість мірників. Разом із тим, цей метод не є первинним з точки зору формування, тобто відтворення фізичної одиниці, оскільки еталонний мірник не простежується безпосередньо до основних одиниць системи СІ.

Розглянемо наступний метод, також об'ємний, але динамічний, в якому як еталон використовується поршневий мірник [15]. Принцип полягає

у вимірюванні за допомогою детекторів переміщення поршня, що рухається в каліброваній ділянці трубопроводу з відомими геометричними параметрами. При цьому вимірюваний контрольний об'єм СВГ дорівнює калірованому об'єму вимірювального трубопроводу, що міститься між двома детекторами.

Окрім того, як уже зазначалося, отримав поширення метод, в основу якого покладено принцип вимірювання одиниці маси, за якою через значення густини визначається об'єм. Такі установки називаються гравіметричними [16]. Процес вимірювання базується на прямому зважуванні маси рідини (СВГ), що пройшла через досліджуваний засіб.

Тепер наведемо приклади деяких іноземних еталонів, побудованих на різних принципах відтворення та передавання одиниць об'єму та об'ємної витрати рідких вуглеводнів (СВГ).

На сьогодні у Нідерландах (*NMI VSL* — Національний метрологічний інститут) створено еталонний комплекс *EuroLoop*. Розробники заявляють відносно найширшого динамічного діапазону вимірювання з поміж наявних еталонних установок аналогічного типу. Еталонний комплекс складається з двох секцій: секції для вимірювання об'єму та об'ємної витрати газу (*GasCal*) та секції вимірювання аналогічних одиниць рідких вуглеводнів (*HuCal*). Зупинимося детальніше на секції *HuCal*. Діапазон вимірюваних витрат складає від 10 м³/год до 5000 м³/год з в'язкістю робочої рідини від 1 до 1200 сСт. Робочий тиск становить до 1 МПа. Що стосується принципу вимірювання, то тут реалізовано два поршневі мірники. Перший працює у діапазоні витрат до 1200 м³/год, а другий — до 5000 м³/год. Заявлене значення розширеної невизначеності становить 0,02 % [17].

Також у Нідерландах (*NMI VSL*) проводяться роботи щодо створення первинного еталона одиниць об'єму та об'ємної витрати скрапленого природного газу (*LNG*), який є робочим середовищем за температури -162 °С і робочого тиску до 0,5 МПа. Технічна реалізація — зважування ємності 0,5 м³, заповненої кріорідиною — *LNG*. На цьому етапі створено первинний еталон гравіметричного типу в діапазоні витрат від 1 м³/год до 25 м³/год. У подальшому планується розширення діапазону еталона методом нарощування витрати до 7000 м³/год, з використанням сумування витрат відкаліброваних ідентичних еталонних лічильників. Запланована невизначеність еталона — 0,05 % [18].

Також заслуговує уваги еталонний комплекс для вимірювання рідких вуглеводнів Австралії (*NMIA* — Національний метрологічний інститут Австралії).

Комплекс складається з декількох еталонних установок для вимірювання одиниць об'єму та об'ємної витрати: бензину, дизельного палива, СВГ (*LPG*) та стисненого природного газу (*CNG*). Що стосується СВГ, діапазон вимірюваних витрат еталонної установки становить 0,3 м³/год — 102 м³/год, як робоче середовище використовуються дві ємності по 6 м³ з пропаном і бутаном, робочий тиск — 1,6 МПа. Принцип роботи еталона, як і попереднього, — поршневий, використовується поршневий мірник з об'ємом 0,04 м³. Невизначеність становить 0,03% [19].

Окрім того, первинний еталон одиниць об'єму та об'ємної витрати СВГ має Чехія (СМІ — Чеський метрологічний інститут). Еталон побудовано на базі установки поршневого типу. Установка експлуатується з можливістю транспортування її до місця проведення калібрування. Діапазон відтворення одиниць об'ємної витрати СВГ складає від 0,4 м³/год до 400 м³/год з розширеною невизначеністю $U = (0,05—0,1) \%$ [20].

Також у літературі наводяться дані стосовно еталонів витрати СВГ в інших країнах, зокрема в Швеції, Польщі, Великобританії [21].

З урахуванням фізико-хімічних особливостей СВГ та необхідності експлуатації еталонного та дослідного обладнання за надлишкового тиску до 1,6 МПа, а також технічної можливості транспортування до місця проведення калібрування, після аналізу наявних методів відтворення фізичних одиниць об'єму та об'ємної витрати СВГ, встановлено, що оптимальним потенційним варіантом є застосування об'ємного динамічного методу в частині реалізації первинної ланки відтворення фізичної одиниці витрати СВГ.

Потрібно відзначити, що наразі вітчизняне метрологічне забезпечення побудовано на застосуванні як робочих еталонів для перевірки законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки — паливно-роздавальних колонок для відпуску СВГ на автогазозаправних станціях еталонних лічильників об'єму СВГ (типу *ADAST*, «Шельф») та еталонних об'ємних мірників скрапленого газу. Для проведення перевірки колонок, діапазон об'ємної витрати СВГ еталонного лічильника складає від 0,3 м³/год до 3 м³/год. Окрім того, лічильники об'єму СВГ, які встановлені на газозаправних та використовуються під час комерційних розрахунків у процесі заповнення ємностей на автогазозаправних станціях також підлягають процедурі перевірки. Для прикладу, на ринку присутні лічильники об'єму типу *M-series* (*MA-series*) з максимальним значенням об'ємної витрати СВГ від 9 м³/год до 180 м³/год (рис. 4).

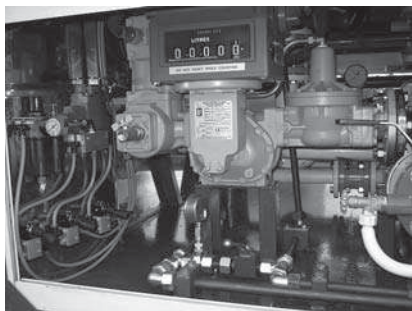


Рис. 4. Зовнішній вид лічильника об'єму СВГ, який встановлено на автомобільній цистерні
 Fig. 4. Appearance of the LPG volume meter installed on the tank truck

Наразі серед державних підприємств та повірочних лабораторій тільки ДП «Укрметртестстандарт» проводить повірку таких лічильників. Згідно з галузю уповноваження повірка проводиться в діапазоні об'ємної витрати СВГ до 24 м³/год. Окрім того, повірочна лабораторія ТОВ «Київське метрологічне бюро» уповноважено на повірку лічильників масової витрати СВГ (коріюлісових) в діапазоні до 13,28 м³/год. Метрологічне забезпечення на вищі діапазони об'ємної витрати в Україні відсутнє. З урахуванням розміщення лічильників, їхня повірка проводиться без демонтажу з газозовозу із застосуванням СВГ як робочого середовища. Схему проведення повірки лічильників наведено на рис. 5, і проводиться вона шляхом витіснення води із ємності у мірник за допомогою СВГ, який проходить послідовно через досліджуваний лічильник і заповнює ємність. У такий спосіб здійснюється еквівалентне об'ємне витіснення (заміщення) рідин. Методики проведення повірки згідно із зазначеною схемою (рис. 5) та іншими схемами, із застосуванням одного або двох еталонних мірників СВГ, наведені в [22].

Отже, з урахуванням необхідності забезпечення метрологічної простежуваності лічильників та витратомірів СВГ, та оцінивши результати моделювання зміни густини рідкої та парової фаз СВГ, запропоновано застосувати для створення первинного еталона одиниць об'єму та об'ємної витрати газу метод геометричного витіснення об'єму за допомогою установки поршневого типу. На рис. 6 наведено схему поршневої установки. Установка призначена для проведення калібрування робочих еталонів — еталонних лічильників та витратомірів об'єму та об'ємної витрати СВГ типу ADAST й інших і еталонних мірників об'єму СВГ.

Гідравлічна схема еталона (рис. 7) повинна об'єднувати в собі дві ємності, кожна з яких заповнена пропаном та бутаном, відповідно, підвищеної чистоти для можливості проведення комплексу ре-

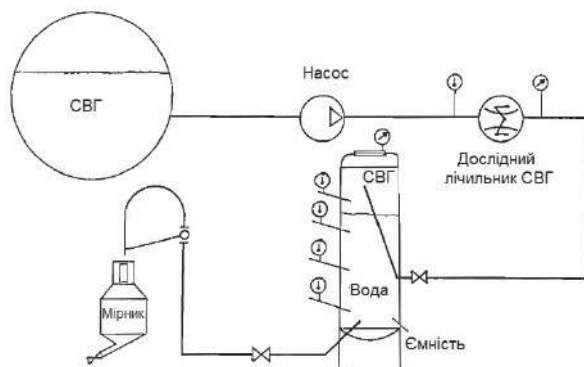


Рис. 5. Схема проведення повірки лічильника СВГ із застосуванням мірника води
 Fig. 5. Scheme of calibration of the LPG meter with the use of a water measuring tank

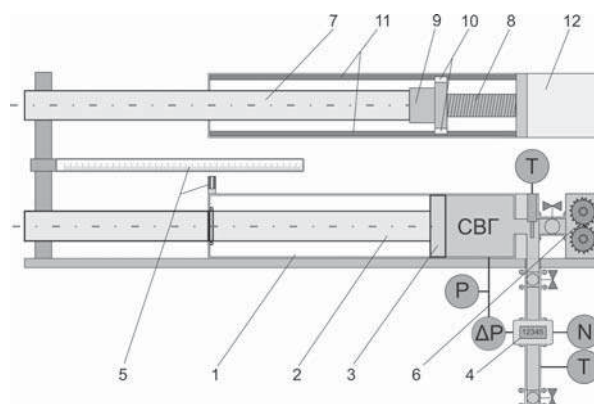


Рис. 6. Схема установки поршневого типу для відтворення та передавання одиниць об'єму та об'ємної витрати СВГ
 Fig. 6. Scheme of piston prover for reproduction and transmission LPG volume and volume flow rate
 1 — циліндр поршневої установки; 2 — шток; 3 — поршковий розділювач; 4 — еталонний лічильник СВГ; 5 — цифрова лінійка миттєвого значення об'ємної витрати з оптичним давачем; 6 — нагнітач СВГ для здійснення заповнення внутрішнього об'єму циліндра поршневої установки; 7 — актуатор (електромеханічний циліндр); 8 — гвинт кульково-гвинтової пари; 9 — гайка кульково-гвинтової пари; 10 — каретки; 11 — лінійні напрямні; 12 — електродвигун; Т — вимірювач температури СВГ, Р — вимірювач абсолютного тиску СВГ; ΔР — вимірювач перепаду тиску між циліндром та лічильником СВГ; N — вимірювач кількості імпульсів від еталонного лічильника СВГ

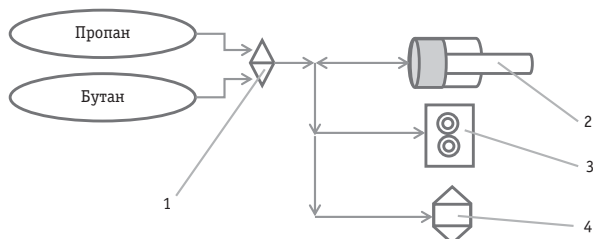


Рис. 7. Гідравлічна схема еталона об'єму та об'ємної витрати СВГ

Fig. 7. Hydraulic scheme the LPG volume and volume flow rate standard

1 — пристрій дозування (змішування) суміші пропан-бутанової; 2 — установка поршневого типу; 3 — еталонний лічильник; 4 — еталонний мірник


з міркувань перевищення межі пароутворення компонентів СВГ (рис. 3). Гідравлічні тракти еталона повинні унеможливити наявність гідроопорів, що можуть змінювати профіль потоку газу, типу «раптове розширення», для забезпечення відсутності фугитивності, тобто переходу рідкої фракції суміші в газоподібний стан. Якщо це неможливо забезпечити, необхідно встановити газові сепаратори. Умови роботи еталона повинні міститися в межах (20 ± 2) °C для зменшення дрейфу густини СВГ та відповідно до розробленого алгоритму врахування зміни густини під час приведення фізичних умов еталона до умов калібрування лічильника.

ВИСНОВОК

Із проведеного аналізу випливає, що на сьогодні в Україні метрологічне забезпечення обліку СВГ перебуває на незавершеному етапі, оскільки відсутня верхня ланка відтворення одиниць об'єму та об'ємної витрати СВГ. Також необхідні суттєві доопрацювання стосовно гармонізації або розроблення нормативних документів. Істотним кроком вперед є затвердження Технічного регламенту та впровадження OIML R 117. Однак практичне застосування цього стандарту наразі не має технічного підґрунтя, тобто метрологічної бази, оскільки питання повірки та калібрування засобів вимірювання, в тому числі еталонних, не забезпечено повноцінно. Обумовлюється, якщо повірка (калібрування) засобу вимірювання здійснюється не на робочому середовищі, тобто СВГ, то вимагається проведення репрезентативних досліджень на середовищі — замінику та робочому середовищі з метою визначення впливу останнього на метрологічні характеристики засобу вимірювання, які повинні бути проведені під час оцінки відповідності. ДП «Івано-Франківськстандартметрологія» проводить науково-дослідну роботу щодо створення на базі установки поршневого типу еталона одиниць об'єму та об'ємної витрати скрапленого вуглеводневого газу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Закон України № 124-VIII «Про технічні регламенти та оцінку відповідності», Відомості ВРУ (Law of Ukraine № 124-VIII «On technical regulations and conformity assessment», Information of the Verkhovna Rada), 2015, № 14, ст. 96.
2. ДСТУ ISO/IEC 17025:2017 Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій (ISO/IEC 17025:2017, IDT) (DSTU ISO / IEC 17025:2017 General requirements for the competence of testing and calibration laboratories (ISO / IEC 17025: 2017, IDT)).
3. Н.Л. Стаскевич, Д.Я. Вигдорчик Справочник по сжиженным углеводородным газам — Ленинград (N.L. Staskevich, D.Ya. Vigdorichik Handbook of liquefied hydrocarbon gases — Leningrad), 1986. 543 с/р.
4. ДСТУ 4047-2001 Газы углеводневі скраплені паливні для комунально-побутового споживання. Технічні умови. Київ, Держспоживстандарт (DSTU 4047-2001 Liquefied hydrocarbon gases fuel for communal and household consumption. Specifications. Kyiv, Derzhspozhyvstandart).
5. ГОСТ 27578-87 Газы углеводородные сжиженные для автомобильного транспорта. Технические условия. Москва (GOST 27578-87 Liquefied hydrocarbon gases for road transport. Technical conditions. Moscow).
6. ДСТУ EN 589:2017 (EN 589:2008+A1:2012, IDT) Палива автомобільні. Газ нафтовий скраплений. Технічні вимоги та методи контролювання. Чинний від 01-02-2018 (DSTU EN 589: 2017 (EN 589: 2008 + A1: 2012, IDT) Automotive fuels. Liquefied petroleum gas. Technical requirements and control methods. Valid from 01-02-2018).
7. ГОСТ 26976-86 Нефть и нефтепродукты. Методы измерения массы. Дата введения 1987-01-01 (GOST 26976-86 Oil and oil products. Mass measurement methods. Date of introduction 1987-01-01).
8. ДСТУ 7094:2009 Метрологія. Маса нафти та нафтопродуктів. Загальні вимоги до методик виконання вимірювань (ГОСТ 8.587-2006 MOD) (DSTU 7094:2009 Metrology. Mass of oil and oil products. General requirements for measurement methods (GOST 8.587-2006 MOD)).
9. В. Christie. On the Correlation between Isothermal Compressibility and Isobaric Expansivity // Midstream Oil and Gas Solutions — White Paper. April 2016.
10. OIML R 117 Measuring systems for liquids other than water. 1995 — 96 p.

11. ISO 6578 Refrigerated hydrocarbon liquids — Static measurement — Calculation procedure. Geneva, Switzerland. 1991 — 28 p.
12. API Manual of Petroleum Measurement Standards Chapter I-Vocabulary. Table of Contents. Washington. 1994 — 77 p.
13. ДСТУ OIML R 117-1:2014 Динамічні вимірювальні системи для рідин, інших, ніж вода. Частина 1. Метрологічні та технічні вимоги (OIML R117-1:2007, IDT) (DSTU OIML R 117-1: 2014 Dynamic measuring systems for liquids other than water. Part 1. Metrological and technical requirements (OIML R117-1: 2007, IDT)).
14. Fundamentals of Liquid Measurement III — Dynamic. Peter W Kosewicz. Assistant Director the University of Texas — PETEX 2700 W. W. Thorne Drive Houston, Texas 77073. — 10 p.
15. Piston prover primary standart for night pressure gas metering / H. Bellinga, C.P. Hocks, A. Kool // OIML Bulletin Leg. — 1985. — No 100. P. 21—31.
16. Hydrocarbon liquid flow calibration service NIST Special Publication 250-1039 — 46 p.
17. Mijndert P. van der Beek EuroLoop: Metrological concepts for efficient calibrations and primary realization of accurate reference values in flow // 25th North Sea Flow Measurement Workshop, Norway, Oslo. — 26 p.
18. Metrology for LNG <http://www.lngmetrology.info/>
19. APMP TC Fluid Flow Initiative Project Traceability Scheme Study for LPG Metering Progress Report at APMP 2011 TCFM Meeting Chun-Min Su, Ph.D. Center for Measurement Standards, ITRI Dec. 5, 2011
20. New CMI piston prover for flowmeter calibrations for liquids other than water — 3 p.
21. EURAMET Project No 1020. A collaborative project to assess coriolis meter intercomparison package — 23 p.
22. J. Goellner. Survey of methods used in Europe for the verification of LPG dispensers // OIML Bulletin Leg. — 1989. — No 114. P. 10—24. 

Отримано / received: 12.10.2020.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. П.М. Райтером (Україна).
Prof. P.M. Raiter, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.

DOI: 10.33955/2307-2180(5)2020.11-16

УДК 159.9:629.7:656.7.086.1 (045)

МЕТОД ОПТИМІЗАЦІЇ ДОСЛІДЖЕНЬ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ БІОЛОГІЧНОЇ РІВНОВАГИ ЛЮДИНИ

Method the Optimization of Research for Evaluation of Biological Balance of A Organism

Л. О. Кошева, доктор технічних наук, професор кафедри біокібернетики та аерокосмічної медицини, e-mail: l.kosh@ukr.net

Є. В. Моїсеєнко, доктор медичних наук, професор кафедри, e-mail: moiseyenkoev@gmail.com

О. Б. Іванець, кандидат технічних наук, доцент кафедри, e-mail: olchik2104@ukr.net
Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна

L. O. Kosheva, doctor of technical science, professor of department of biocybernetics and aerospace medicine, e-mail: l.kosh@ukr.net

Ye. V. Moiseyenko, doctor of medical science, professor of department, e-mail: moiseyenkoev@gmail.com

O. B. Ivanets, candidate of technical sciences, associate professor of department, e-mail: olchik2104@ukr.net
National Aviation University, Kyiv, Ukraine

Запропоновано метод визначення оптимальної кількості проведення досліджень медико-біологічних параметрів, необхідних та достатніх для діагностування порушення біологічної рівноваги. Метод полягає у технології поєднання опису результатів дослідження часовими рядами та урахування факторних впливів на показники функціонального стану за виконання навантажувальних проб. Обстеження у ході функціонального навантаження дозволяє визначити додаткову біомедичну інформацію, яка може виявити можливі приховані порушення рівноваги функціонування біологічного об'єкта, які не помітні за традиційного порівняння медико-біологічних параметрів з межами референтних значень як у стані спокою, так і за навантаження. Запропонований метод може бути використаний для поглибленої діагностики та прогнозу наслідків довготривалого впливу надзвичайних факторів середовища.

A method for determining the optimal number of studies of medical and biological parameters necessary and sufficient to diagnose biological imbalance is proposed. It is proposed to consider the human body as an object of diffusion, which has uncertainty both in terms of biological functioning and in the parameters that reflect their dynamics over time. This means that in addition to the main factors of interest to the researcher, it is necessary to take into account many other perturbing factors, giving rise to the heterogeneity of the measurement experiment in the form of noise and non-stationary drifts. In biomedical research, any consecutive measurement results are two-dimensional (in value and time) and should be considered as time series. This approach to the description of primary measurement information takes into account the following features of the assessment of medical and biological parameters:

being experimental, this information is limited by the amount of sample data; stochastic of time influence on the sequence of results of biomedical measurements (in long-term studies) is always accompanied by the presence of trends (general and local latent regularity) that characterize the dynamics of the biological state; contrast to models of discretized probabilistic processes, stochastic time series are fundamentally non-stationary and unbounded at observation intervals, as irregular and random factor influences on the object of study are allowed. The probabilistic properties of a stochastic time series and, accordingly, the models of the variability of its values are determined by the regularities of the influence of time on the numerical characteristics of the series.

The method of optimization the medical and biological parameters consists in the technology of combining the description of the results of the study in time series and taking into account the factor influences on the indicators of the functional state when performing load tests. Examination during functional load allows you to identify additional biomedical information that may reveal possible latent imbalances of the biological object, which are not noticeable in the traditional comparison of medical and biological parameters with the reference values at rest and during exercise. The method of optimization the medical and biological parameters allows to determine the necessary and sufficient number of studies to diagnose biological imbalance. This method allows to reduce the number of studies by 2 times, and it is enough to use only 2 modes of experimental measurements: at rest and with little exercise, which is established by Fisher's criteria. The method can be used to determine the adaptive capacity of the human body to long-term extreme loads in different situations and to assess the biological balance of the human body, taking into account uncertainty in both biological performance and parameters that reflect their dynamics over time.



Л. О. Кошева



Є. В. Моїсеєнко



О. Б. Іванець

Ключові слова: оцінювання, результати вимірювань, метод оптимізації, регресійна залежність, медико-біологічні параметри, факторні впливи, тренд, біологічна рівновага.

Key words: estimation, measurement results, optimization method, regression dependence, medico-biological parameters, factor influences, trend, biological equilibrium.

Аналіз літературних джерел щодо оцінювання біологічної рівноваги функціонування біологічних об'єктів виявив неспроможність стандартних підходів до отримання адекватних оцінок стану біологічної рівноваги. Це пов'язано з неможливістю урахування мінливості параметрів біологічного об'єкта, зумовленої впливом чинників різної природи на його стан. Розрізняють такі підходи до оцінювання біологічної рівноваги: оцінювання функціональних резервів на основі однієї з підсистем організму [1], оцінювання гомеостазу на основі визначення функціонального стану системи [2, 3], оцінювання напруженості механізмів імунної регуляції [4], оцінювання на основі порівняння окремих показників із загальноприйнятною нормою [1] та інші. Недоліками проаналізованих підходів є неможливість урахування зовнішніх і внутрішніх випадкових впливів, неврахування впливів джерел як невизначеності за проведення вимірювань [5], так і невизначеності, зумовленої мінливістю параметрів біологічного об'єкта [6].

Будь-який біологічний об'єкт, у тому числі й організм людини, має бути розглянутий як об'єкт дифузійний [7], що має невизначеність як у показниках біологічного функціонування, так і в параметрах, що відображають їхню динаміку в часі. Ця невизначеність ускладнюється і фактичною відсутністю апріорних знань стосовно ймовірнісних властивостей параметрів, причому вибір останніх визначається апріорі заданим видом математичної моделі динамічних змін. Необхідно враховувати і той факт, що будь-яке дослідження з оцінювання параметрів динамічної рівноваги біологічного об'єкта неминуче використовує результат вимірювань, розподілений за часом [9]. Це означає, що, окрім основних факторів, які цікавлять дослідника, необхідно враховувати і безліч інших факторів, що збурюють, породжуючи неоднорідність вимірювального експерименту у виді шумів та нестаціонарних дрейфів. Присутність останніх спотворює результати оцінювання стану біологічної рівноваги, породжуючи зниження достовірності діагностичних рішень.

ОСНОВНА ЧАСТИНА

Під час тривалих біомедичних досліджень будь-які послідовні результати вимірювань є двовимірними (за значенням і часом) та мають розглядатися як часові ряди [10]. Такій підхід до опису первинної вимірювальної інформації враховує такі особливості оцінювання медико-біологічних параметрів [11]:

а) будучи експериментальною, ця інформація обмежена за обсягом вибіркового даних;

б) стохастичність впливу часу на послідовність результатів біомедичних вимірювань (за тривалих досліджень) завжди супроводжується наявністю трендів (загальної та локальної прихованої регулярності), які характеризують динаміку біологічного стану;

в) на відміну від моделей дискретизованих імовірнісних процесів стохастичні часові ряди принципово нестаціонарні та неграничні на інтервалах спостережень, оскільки допускаються нерегулярні та випадкові факторні впливи на об'єкт дослідження.

Імовірнісні властивості стохастичного часового ряду, а відповідно, й моделі мінливості його значень визначаються закономірностями впливу часу на числові характеристики ряду (математичне сподівання, дисперсію та інші).

Такий вплив може мати складові двох видів:

- зовнішні, джерелами яких є різного роду неоднорідності дослідження, зумовлені порушенням його умов [8];
- внутрішні, що залежать від стабільності процесів динамічної рівноваги біологічного об'єкта [6].

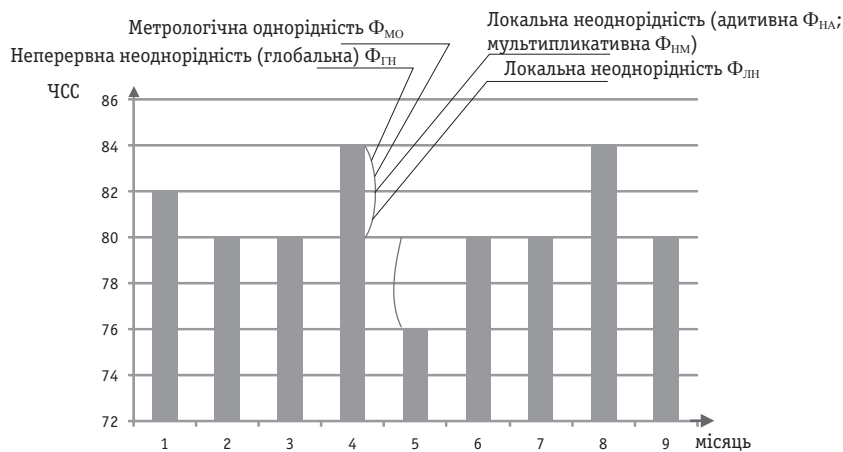


Рис. 1. Фактори впливу на результати вимірювань медико-біологічних параметрів

Fig. 1. Factors influencing the results of measurements of medical and biological parameters

Аналіз медико-біологічних параметрів надав можливість визначити факторні впливи на результати їх вимірювань. На рис. 1 наведено результати спостережень за частотою серцевих скорочень (ЧСС) групи досліджуваних протягом кількох місяців за умов, які можуть вплинути на параметри зміни біологічної рівноваги [12].

Відхилення значень ЧСС від середнього по групі зумовлено впливом як зовнішніх, так і внутрішніх факторів. Зокрема, можуть вплинути неточність вимірювання, кліматичні чинники, внутрішньо індивідуальна варіабельність параметрів досліджуваних, адаптаційні процеси та, власне, порушення біологічної рівноваги [9].

Ефекти факторних впливів на динаміку результатів первинного вимірювання, розподілених на інтервалах усіх послідовних спостережень біологічного об'єкта (див. табл. 1) такі:

$\Phi_{ГН}$ — неперервна неоднорідність (глобальна), зумовлена глобальними впливами зовнішнього середовища (кліматичними, метеорологічними тощо);

$\Phi_{НА}$ — адитивна нестабільність (локальна), зумовлена порушенням динамічної рівноваги біологічного об'єкта;

$\Phi_{ЛН}$ — локальна неоднорідність, зумовлена індивідуальними особливостями біологічного об'єкта;

$\Phi_{НМ}$ — мультиплікативна нестабільність (локальна), зумовлена адаптацією організму до впливу зовнішніх факторів;

$\Phi_{МО}$ — метрологічна однорідність. Під поняттям метрологічної однорідності розуміється стабільність характеристик процесу вимірювання та його складових, які не вийдуть за допустимі границі під час дослідження [6].

У таблиці 1 наведено зв'язок факторів впливу на результати вимірювань медико-біологічних параметрів з урахуванням впливу часу та їх залежність від локальних ефектів неоднорідностей та біологічної варіабельності (нестабільності) для груп послідовних результатів вимірювань. Априорі постулюється суміщення локальних ефектів неоднорідностей різного роду та біологічної нестабільності для груп послідовних результатів вимірювань [7].

Отримані у роботі узагальнення ґрунтуються на результатах ретроспективного дослідження медико-біологічних параметрів групи з 12 досліджуваних, яке проводилося протягом року. Кожного місяця вимірювалися їх медико-біологічні параметри у 4 станах: спокою та у разі навантаження на велоергометри за 3 різних режимів (50 Вт, 100 Вт, 150 Вт) [7].

У процесі опрацювання загального ряду результатів вимірювань, з обсягом вибірки N , числом K послідовних груп, отримано результати окремих вимірювань x_{ij} (i — номер результату вимірювання, $i = \overline{1, n_j}$, усередині j -ї групи ($j = \overline{1, K}$), де n_j — число внутрішньогрупових вимірювань). Якщо \bar{X} — загальне середнє для всіх результатів часового ряду, то оцінка математичного сподівання для часового ряду цих результатів може бути отримана з урахуванням:

- виду регресійних моделей для глобального та локального трендів;
- імовірнісних моделей дискретної неоднорідності та метрологічної однорідності;
- адитивності (або неадитивності) елементів факторного впливу.

Для побудови моделі, що описує глобальні та локальні факторні впливи на результати вимірювань, використано лінійні регресії [1].

Таблиця 1. Особливості факторного впливу на динаміку часового ряду результатів біомедичних вимірювань

Table 1. Features of the factor influence on the dynamics of the time series of the results of biomedical measurements

№ п.п	Модель факторного впливу	Імовірнісні властивості елементів часового ряду	Функціональні прояви впливу часу	Факторний вплив
1	Глобальна неоднорідність	Глобальна нестационарність за математичним сподіванням	Глобальний (основний) тренд	$\Phi_{ГН}$
2	Нестабільність адитивна	Неергодичність послідовностей групованих результатів	Адитивні зміщення локальних трендів	$\Phi_{НА}$
3	Неоднорідність дискретна	Локальна нестационарність за математичним сподіванням	Мінливість групових середніх результатів вимірювань	$\Phi_{ЛН}$
4	Нестабільність мультиплікативна		Мультиплікативні зміни локальних трендів	$\Phi_{НМ}$
5	Метрологічна однорідність	Стационарність за дисперсією залишкових нерегулярних відхилень	Сталість стандартної невизначеності типу А	$\Phi_{МО}$

Для глобального тренду:

$$\xi_{ji} = \bar{X} + B_0(t_{ji} - \bar{t}), \quad (1)$$

де B_0 — регресійний коефіцієнт для компенсації ймовірнісних збурень глобальних трендів.

\bar{t} — загальне середнє часу спостережень.

Для локальних трендів:

$$\hat{x}_{ji} = \bar{X}_j + B_j(t_{ji} - \bar{t}_j), \quad (2)$$

де \bar{X}_j — середнє в j -й групі;

B_j — регресійний коефіцієнт для компенсації ймовірнісних збурень локальних трендів.

\bar{t}_j — середнє групове часу спостережень.

Для тренда, що характеризує мінливість групових середніх результатів вимірювань:

$$\hat{\delta}_j = Z_j + B_m(t_j - \bar{t}), \quad (3)$$

де Z_j — дискретна випадкова величина (вільний член регресії),

B_m — додатковий регресійний коефіцієнт.

Уважаємо, що дисперсія $\sigma_Z^2 = \text{const}$ для будь-яких j .

Для побудови моделі результатів вимірювання введемо додаткову регресійну модель середньозваженої регресії з кутовим коефіцієнтом [10]:

$$B_c = \frac{\left\{ \sum_{j=1}^k B_j \sum_{i=1}^n (t_{ji} - \bar{t}_j)^2 \right\}}{\left\{ \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n (t_{ji} - \bar{t}_j)^2 \right\}}. \quad (4)$$

Потрібно зазначити, що додаткові регресійні коефіцієнти B_m (3) та B_c (4) введено аби описати ймовірнісні складові параметрів \bar{X}_j та B_j локальних трендів (2) та виділити складові для моделі результатів вимірювань. Остання, у припущенні адитивності ефектів факторних впливів, прийме вид зміщеної (складової) регресії, доповненої ймовірнісними збуреннями:

$$x_{ji} = \bar{X} + B_0(t_{ji} - \bar{t}) + \{(B_c - B_m)(\bar{t}_j - \bar{t}) + Z_j\} + (B_j - B_c)(\bar{t}_j - \bar{t}) + \varepsilon_{ji}, \quad (5)$$

де ε_{ji} — випадковий залишок моделі, що характеризує її метрологічну однорідність

Оскільки інформація, яка цікавить дослідника, стосовно порушення динаміки стану біологічної рівноваги утримується в складових випадкових та систематичних відхиленнях результатів вимірювань x_{ji} від загального середнього \bar{X} (фактично біомедичної норми), то є сенс провести розподіл повної дисперсії такого результату на відповідні складові. Таку можливість надає математичний апарат дисперсійного аналізу для моделей кусково-лінійної апроксимації (коваріаційного аналізу [7, 8]).

Використання такого підходу надає можливість тестувати результати групованих вимірювань на наявність або відсутність складових у загальному від-

Таблиця 2. Фактори впливу та суми квадратів дисперсійного розкладання, що їм відповідають

Table 2. Factors of influence and sums of squares of variance decomposition corresponding to them

Позначення фактору	Вид фактору	Сума квадратів з індексацією факторної відповідності
$\Phi_{ГН}$	Глобальної неоднорідності	$Q_1 = Q_{ГН}$
$\Phi_{НА}$	Нестабільності адитивної (локальної)	$Q_2 = Q_{НА}$
$\Phi_{ЛН}$	Локальної неоднорідності	$Q_3 = Q_{ЛН}$
$\Phi_{НМ}$	Нестабільності мультипликативної (локальної)	$Q_4 = Q_{НМ}$
$\Phi_{МО}$	Метрологічної однорідності	$Q_5 = Q_{МО}$

хиленні Δx_{ji} результатів x_{ji} від загального середнього:

$$\Delta x_{ji} = x_{ji} - \bar{X},$$

ураховуючи зв'язок цих складових з відповідними ефектами факторного впливу

Визначимо змішану модель як адитивну для п'ятих складових:

$$\Delta x_{ji} = B_0(t_{ji} - \bar{t}) + (B_c - B_m)(\bar{t}_j - \bar{t}) + z_j + (B_j - B_c)(\bar{t}_j - \bar{t}) + \varepsilon_{ji}. \quad (6)$$

Уводимо позначення загальної суми квадратів відхилень x_{ji} від \bar{X} :

$$Q = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n \Delta x_{ji}^2. \quad (7)$$

Представимо формально загальний вираз дискретного розкладання суми Q на п'ять відповідних складових моделі (6) доданків:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5. \quad (8)$$

Уведемо позначення для факторів впливу (з таблиці 1), вказавши для них відповідний доданок з правої частини розкладання (8), та внесемо до таблиці 2.

Середні квадрати $\overline{Q_{ГН}}$, $\overline{Q_{НА}}$, $\overline{Q_{ЛН}}$ та $\overline{Q_{НМ}}$, які відображають абсолютні рівні неоднорідності та нестабільності ймовірнісної моделі (6), можуть бути використані для контролю на значимість відповідних факторних впливів.

Якісну оцінку значимості такого впливу можна отримати, якщо порівнювати перераховані середні квадрати з середнім квадратом $\overline{Q_{МО}}$, що кількісно відображає ступінь метрологічної однорідності результатів вимірювань. Така однорідність тим вища, чим менше середній квадрат $\overline{Q_{МО}}$. Порівняння факторних середніх квадратів $\overline{Q_{ГН}}$, $\overline{Q_{НА}}$, $\overline{Q_{ЛН}}$ та $\overline{Q_{НМ}}$ з метрологічно стабільним $\overline{Q_{МО}}$ здійснюється відносно

Таблиця 3. Значення функції статистичної стійкості δ для послідовно ускладнених варіантів (L) уніфікації
 Table 3. The value of the statistical stability function δ for sequentially complicated variants (L) of unification

Варіанти навантажень	Ступінь уніфікації L	Функція статистичної стійкості	
		для статистики F_{HA}	для статистики F_{HM}
«50»	1	0,5923	1,1051
«50» + «150»	2	2,1443	1,2062
«50» + «150» + «100»	3	1,9247	0,8279
«50» + «150» + «100» + «0»	4	1,1578	0,5642

статистики дисперсійного відношення, за яку обрано F -статистику Фішера [1]:

$$\begin{cases} F_{ГН} = \overline{Q_{ГН}} \cdot \overline{Q_{МО}}^{-1} \\ F_{HA} = \overline{Q_{HA}} \cdot \overline{Q_{МО}}^{-1} \\ F_{ЛН} = \overline{Q_{ЛН}} \cdot \overline{Q_{МО}}^{-1} \\ F_{HM} = \overline{Q_{HM}} \cdot \overline{Q_{МО}}^{-1} \end{cases} \quad (9)$$

Вираз (9) має подвійне інформаційне навантаження:

а) дозволяє отримати первинну непряму вимірну інформацію стосовно кількісних у середньому змін ефектів неоднорідностей та біологічної нестабільності;

б) надає можливість виділити інформаційну вторинну інформацію, використовуючи статистику (9) як критеріальну, під час тестування ефектів на статистичну значимість за заданих ризиків.

Кількісно стійкість критерію визначається відношенням критеріальної F -статистики, що досліджується, до критичної $F_{кр}$:

$$\delta = F/F_{кр} \quad (10)$$

За $F_{кр}$ приймається верхня α -відсоткова точка, що має ті ж самі ступені свободи, що й F — статистики виразу (9) [1].

Імовірнісні моделі (5) та (6), окрім випадкових величин Z_j та ε_{ji} , включають неявно й випадкові кутові коефіцієнти групових лінійних регресій як статистичні оцінки B_j , B_{e_j} .

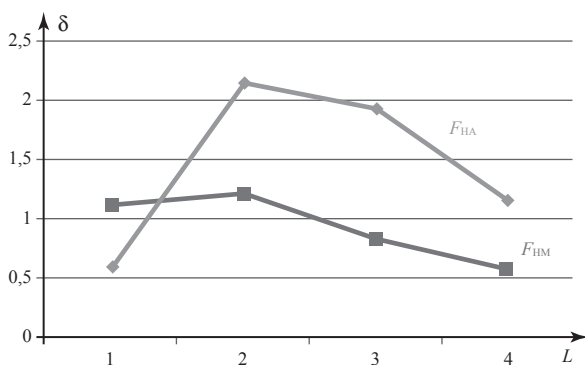


Рис. 2. Залежності δ від L для F_{HA} та F_{HM}
 Fig. 2. Dependences of δ on L for F_{HA} and F_{HM}

У такий спосіб встановлено значення F -статистик для моделі (5) та отримано результати її дисперсійного аналізу [9].

Варіанти уніфікації задано поєднанням навантажень «0», ... «150» з їх попереднім ранжуванням за зменшенням статистики F_{HM} досліджуваних з максимальною кількістю скарг на самопочуття [7].

У таблиці 3 представлено результати розрахунків функції статистичної стійкості δ за виразом (10) залежно від складності уніфікації моделі (5), що визначається числом L об'єднаних величин $\{X_e\}_1^L$. Фізична однорідність модельована різними значеннями фізичних навантажень за біомедичним параметром частот серцевих скорочень.

На рис. 2 наведено графічні реалізації залежностей $\delta = f(L)$ для дослідження F -статистик біологічної нестабільності F_{HA} та F_{HM} .

Із таблиці 3 та рис. 2 випливає, що параметр δ є цільовою функцією оптимізації (за максимумом статистичної стійкості δ), оптимум уніфікації відповідає $L = 2$. Статистика F_{HA} є більш стійкою за статистику F_{HM} , оскільки максимум $F_{HA} = 2,1443$ більший за максимум $F_{HM} = 1,2062$.

Обґрунтованість використання функції δ (6) для оптимального вибору ступеня уніфікації $L_{опт}$ базується на суворому виконанні умов еквівалентності статистичної стійкості та статистичної потужності правил прийняття рішень [9]. Це означає, що для визначення необхідної та достатньої кількості досліджень з різним навантаженням на біологічний об'єкт необхідно використовувати значення статистик Фішера, що є чутливими до порушень біологічної рівноваги. Згідно з розрахунками та цільовою функцією оптимізації можна зробити висновок, що порушення біологічної рівноваги можна діагностувати вже за навантаження 50 Вт та немає необхідності проводити вимірювання за навантаження 100 Вт та 150 Вт. Отже доведено, що оптимальним, з точки зору використання часових, матеріальних та людських ресурсів, є проведення досліджень медико-біологічних параметрів у 2 режимах: стані спокою та навантаженні 50 Вт для діагностування


порушення біологічної рівноваги. Така оптимізація дозволила скоротити кількість досліджень у 2 рази, не втрачаючи високого ступеня достовірності отриманих результатів. При цьому чутливими до порушень динаміки біологічної рівноваги є максимальні значення статистик Фішера $F_{НА}$ та $F_{НМ}$, які більші від критичних. Такий підхід було апробовано під час проведення реальних досліджень [7].

ВИСНОВКИ

У роботі запропоновано метод оптимізації довготривалих досліджень медико-біологічних параметрів, який дозволив визначити необхідну та достатню кількість досліджень для діагностування по-

рушення біологічної рівноваги. Цей метод дозволяє скоротити кількість досліджень у 2 рази, при цьому достатньо використовувати тільки 2 режими проведення експериментальних вимірювань: у стані спокою та за незначного фізичного навантаження, що встановлено за критерієм Фішера. Метод може бути використаний для завдань визначення адаптаційних можливостей організму людини до дії довготривалих екстремальних навантажень у різних ситуаціях та оцінювання біологічної рівноваги організму людини з урахуванням невизначеності як в показниках біологічного функціонування, так і в параметрах, що відображають їхню динаміку в часі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Baevky R.M., Chernikova A.G. To the problem of physiological norm: Mathematical model of functional states based on the analysis of heart rate variability. *Aerospace and Environmental Medicine*, 2002, 6, p. 11–17.
2. Korshunov G.V. etc. The method of determining the functional state of the system. RF Patent№2109297 class. 0 05 33/86, 1998.
3. Shabalin V.N., Shatokhina S.N. A method for diagnosing the state of homeostasis of the body: RF patent №2007716: G 01N 33/48, 1998.
4. Кузнецова Л.В., Бабаджан В.Д., Харченко Н.В. та ін.. Клінічна та лабораторна імунологія. — К.: ООО «Полиграф плюс» (Kuznetsova L.V., Babadjan V.D., Kharchenko N.V. etc. *Clinical and laboratory immunology*. — К.: LLC «Polygraph Plus»), — 2012. — 922 с/р.
5. Ivanets O. Arkhyrei M. Reducing uncertainty in health systems. *ISSN 1990-5548 Electronics and Control Systems* 2014. N 3(41): 114–117.
6. Ivanets O.B, Kosheva L.O. Approach to the Evaluation of the Functional State of the Human Body Taking into Account the Variability of Medical and Biological Indicators. *Proceeding of CAOL*2019 International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers with UM*2019 XVI Scientific Workshop «Measurement Uncertainty: Scientific, Normative, Applied and Methodical Aspects»* Sozopol, Bulgaria. September 6 — 8, 2019. — С/Р. 661—665. #978-1-7281-1814-7/19/31.00 с 2019 IEEE.
7. Shchapov P.F., Ivanets O.B., Sevryukova O.S. Dynamic properties of the time series of biomedical measurements. *Science-based technologies* № 2(46), 2020. DOI: 10.18372 / 2310-5461.46.
8. Volodarskyi E.T. Kosheva L.O. .Statystychna obrobka danykh. *Navchalnyi posibnyk* — К.:NAU, 2008. — 308 p.
9. Ivanets O.B., Arkhyrei M.V., Khristenko A.A., Dikhtyaryuk O.V. Uncertainty of test results. *Optoelectronic information and energy technologies*. — 2015. — № 1. — P. 5—9.
10. Jonhson N., Leone F.: *Statistical and experimental design. Engineering and the Physical Science* (second ed). Wiley and Sons. New York-London-Sidney-Toronto, (1977).
11. Boichenko S.V., Kosheva L.O., Kuzovik V.D., Ivanets O.B. Methodological aspects of evaluating a homeostasis of a biological object. *Proceedings of XIV International conference on modern achievements in science and education*. 26.09—03.10 2019. Netanya (Israel). P19-22. — ВВК 72: 74 С56, 2019. — 250pp ISBN 978-966-330-352-
12. Antarctica challenges the new horizons in predictive, preventive, personalized medicine: preliminary results and attractive hypothesis for Секція медичних проблем 19 multi-disciplinary prospective studies in the Ukrainian `Akademik Vernadsky` Station EPMA [Electronic resource] / Y.V. Moiseyenko, V.I. Sukhorukov, Yu.P. Georgiy at all // *Journal* 2016;7:11.DOI: 10.1186/s13167- 016-0060-8. — Mode off access <http://epmajournal/biomed-central.com/> 

Отримано / received: 26.10.2020.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. Є.Т. Володарським (Україна).
Prof. Ye.T. Volodarskyi, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.

DOI: 10.33955/2307-2180(5)2020.17-22

УДК 534.6.08

ПРИНЦИПИ ФОРМУВАННЯ ТИПІВ ПРУЖНИХ ХВИЛЬ ЗА ДОСЛІДЖЕННЯ НАДІЙНОСТІ МОНОЛІТНИХ І БАГАТОШАРОВИХ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ УЛЬТРАЗВУКОВИМ ІМПУЛЬСНИМ МЕТОДОМ

Principles of Formation of Types of Elastic Waves When Studying the Reliability of Monolithic and Multilayer Building Structures By the Ultrasonic Pulse Method

Я. О. Серіков, кандидат технічних наук, професор, Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова, Україна, e-mail: s0509088828@gmail.com

Ya. A. Serikov, candidate of technical sciences, professor, O.M. Beketov National University of Urban Economics in Kharkiv, Ukraine, e-mail: s0509088828@gmail.com

Сучасний розвиток будівельної галузі в Україні й зарубіжних країнах характеризується використанням монолітного бетону і матеріалів з багатошаровою структурою. Це потребує розроблення нових методів і приладів для дослідження їх надійності. Описано типи пружних хвиль, використовуваних за дослідження матеріалів ультразвуковим імпульсним методом. Проведено аналіз формування пружних хвиль у розглянутих будівельних матеріалах з метою розроблення теоретичної бази для створення методик і приладів.

the manufacturing quality of construction objects of this type, their condition during operation using existing non-destructive methods and means is difficult, and in some cases even impossible. This necessitates the development of new or improvement of existing non-destructive methods, techniques for such studies during final inspection and during operation. The development of devices for their implementation is also necessary. The most promising for solving this problem is the ultrasonic pulse method. However, the use of classical methods and existing devices for such studies does not allow achieving the required reliability of the results, and in some cases is not technically feasible. This is due to the insufficient theoretical basis of the features of the formation of types of elastic waves during their propagation in materials of this type. The analysis of the propagation and formation of types of elastic waves of this type in the considered building materials is carried out in order to develop a theoretical basis for the creation of techniques and devices.

The modern development of the construction industry in Ukraine and economically developed countries is characterized by the widespread use of monolithic concrete and materials with a multilayer structure. Such materials are used in the construction of high-rise buildings, bridges and other construction projects, which are subject to increased requirements for operational reliability. Investigation of

Ключові слова: багатошарові будівельні матеріали, монолітний бетон, надійність, дослідження, неруйнівні методи, пружні хвилі.
Keywords: multilayer building materials, monolithic concrete, reliability, research, non-destructive methods, elastic waves.

Використання пружних хвиль для дослідження якості будівельних матеріалів у монолітних бетонних і багатошарових конструкціях та спорудах неруйнівними ультразвуковими методами є актуальним напрямом. Розвиток цього напрямку дослідження зумовлений як широким застосуванням такого типу конструкцій у практиці сучасного будівництва, так і характеристиками цих методів: достатньою точністю й достовірністю даних вимірювань, оперативністю отримання кінцевих результатів [1, 2].

Для багатошарових конструкційних матеріалів характерним є сполучення декількох шарів, які відрізняються, як правило, фізико-механічними властивостями і мають значні розміри. Розміри й технологія виготовлення конструкцій з монолітного бетону: дамб гідроелектростанцій, мостових споруд тощо, — також ставлять нові вимоги до методик дослідження їх надійності, якості бетону неруйнівними методами. Причому суть питання полягає не тільки в конструкційних і технологічних відмінностях розглянутих матеріалів від, умовно назвемо, стандартних, до яких відносяться, наприклад, бетони за касетної чи блок-кімнатної технології. Порушення в технологічних процесах під час спорудження монолітних конструкцій, а також за виготовлення багатошарових конструкційних будівельних матеріалів призводять до виникнення дефектів нових типів: розшарування конструкційного



багатошарового матеріалу; наявності ділянок у з'єднувальному шарі, що характеризуються недостатньою міцністю; формування площин розшарування у монолітному бетоні й ін. [4, 5]. Такі дефекти негативно позначаються на фізико-механічних характеристиках конструкцій у цілому й, як правило, не спостерігаються в матеріалах і виробках, виготовлених за звичайними технологіями з використанням одношарових матеріалів.

Виявлення описаних вище типів дефектів у монолітних бетонах та у багатошарових конструкційних будівельних матеріалах є актуальним завданням, яке практично неможливо вирішити із залученням відомих методів та наявних приладів, що дозволяють вимірювати параметри інформаційного сигналу повздовжньої, поперечної або поверхневої хвиль [1, 2]. Ряд таких завдань може бути вирішено на основі використання, наприклад, тіньового або ехо-методів. Однак, їхнє застосування обмежується дослідженням виробів із дрібноструктурних матеріалів: металів, пластмас тощо [1, 6, 7]. При цьому сфера їх застосування обмежується також виробами, що характеризуються невеликими розмірами. Це обмеження формується внаслідок того, що наявні методики контролю й технічні характеристики контрольно-вимірювальної апаратури не дозволяють вирішувати поставлені завдання [3, 4].

У зв'язку з таким положенням вирішення завдання вдосконалення наявних або розроблення нових методик неруйнівного контролю й контрольно-вимірювальної апаратури для дослідження якості розглянутих класів будівельних матеріалів у монолітних і багатошарових конструкціях на основі використання пружних хвиль є актуальним.

Очевидно, що для розроблення метрологічного й приладового забезпечення дослідження надійності монолітних і багатошарових будівельних конструкцій ультразвуковим імпульсним методом необхідно теоретичне підґрунтя відносно принципів формування типів пружних хвиль, розширюються в будівельних матеріалах таких класів.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Дослідження якості монолітного бетону й багатошарових будівельних матеріалів у конструкціях і спорудах з використанням пружних хвиль характеризується рядом особливостей, що виявляються за умов поширення зондувального і формування типів пружних хвиль і амплітудно-частотних характеристик інформаційного сигналу. До них відносяться як особливості структурних і фізико-механічних властивостей таких матеріалів, так і розміри й форма дефектів, що зустрічаються

найбільш часто. (Тут у вказівці на структурні властивості мається на увазі те, що бетон є композитним матеріалом, який відрізняється структурою з крупними компонентами, а як дефекти розглядається, наприклад, наявність площин розшарування матеріалу в конструкціях або спорудах із багатошарового чи монолітного бетону) [8, 9]. Такі умови завдання накладають певні обмеження на використання відомих методик контролю якості й вимагають більш глибокого підходу за використання теорії поширення пружних хвиль у разі розроблення нових методик дослідження. У зв'язку з цим розглянемо основні положення формування типів пружних хвиль за поширення їх у багатошаровому та однорідному крупноструктурному композитному середовищі, що містить дефекти значного розміру.

На етапі постановки завдання обумовимо, що в розглянутому випадку розміри структурних неоднорідностей у контрольованих матеріалах, до яких віднесемо й наявність шарів у багатошарових матеріалах, значно більші за довжину хвилі зондувального сигналу. Ця обставина призводить до того, що випромінювальний перетворювач трансформується в джерело утворення хвиль сферичних або поширення яких характеризується слабкою діаграмою спрямованості. Зважаючи на це, під час дослідження характеристик поширення пружних хвиль з метою виявлення закономірностей зв'язку «структура досліджуваного матеріалу — параметри інформаційного сигналу» були прийняті принципи геометричної акустики, яка розглядає тільки головні напрямки поширення пружних коливань і не враховує їх розсіювання через дифракцію й інтерференцію хвиль [8, 9].

У геометричній акустиці основними є відомі принципи Гюйгенса й Ферма. Відповідно до принципу Гюйгенса кожна точку фронту пружної хвилі в початковий момент часу t_0 можна представити у виді елементарного джерела коливань [11, 12]. Аналітичним виразом, що представляє принцип Гюйгенса, є диференціальне рівняння Гамільтона, яке є рівнянням поля часів t :

$$\left(\frac{dt}{dX}\right)^2 + \left(\frac{dt}{dY}\right)^2 + \left(\frac{dt}{dZ}\right)^2 = \frac{1}{v^2(X, Y, Z)}, \quad (1)$$

де (X, Y, Z) — заданий розподіл швидкості пружної хвилі в середовищі (для повздовжньої або поперечної хвилі).

У результаті розв'язання цього рівняння отримується такий вираз для хвильового фронту:

$$S(X, Y, Z, t) = 0.$$

Потрібно зазначити, що для однорідного ізотропного середовища рівняння Гамільтона приймає такий вид:

$$t = (1/v) \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}, \quad (2)$$

де X, Y, Z — координати точки визначення t .

Цей вираз є функцією поля часів, яке є сферичною поверхнею.

У процесі поширення пружної хвилі, збудженої точковим джерелом, її фронт, залежно від пружних властивостей контрольованого матеріалу, в якому вона поширюється, займає у ньому в однакові моменти часу різні положення. Поверхні матеріалу, в разі його шаруватої структури, з якими фронт хвилі збігається у різні моменти часу, є ізохронами. Для однорідного ізотропного матеріалу ізохрони являють собою сферичні поверхні. У випадку анізотропного матеріалу ізохрони можуть приймати складний вид, залежно від виду пружної симетрії контрольованого середовища. Внаслідок цього, як було зазначено вище, випромінювальний перетворювач електричного сигналу в пружну хвилю має нечітко виражену діаграму спрямованості, й тому представляється можливим розглядати його як точковий. Тобто, в однорідному середовищі діаграма спрямованості точкового джерела збудження пружної хвилі (ξ) є сферичною поверхнею (рис. 1). Ця хвиля є прямою.

У багат шаровому та середовищі з, як зазначено вище, дефектом, що має значні розміри (рис. 2, 3), така хвиля, досягнувши границі (межі) розділу середовищ, буде відбиватися й переломлюватися (рис. 4, 5). Так, наприклад, за падіння повздовжньої хвилі P_1 під кутом α на плоску гладку границю розділу двох середовищ утворюються чотири вторинні хвилі (рис. 4). Дві з них, повздовжня P_{11} і поперечна P_1S_1 , поширюються в першому шарі досліджуваного двошарового матеріалу, тобто в тому ж середовищі, що й падаюча хвиля. Ці хвилі є відбитими.

Дві інші, повздовжня P_{12} і поперечна P_1S_2 , проходять через границю розділу в друге середовище і є прохідними. Причому, відповідно до прийнятої класифікації, хвилі, які не змінюють свій тип на границі розділу середовищ, є монотипними, а ті, що змі-

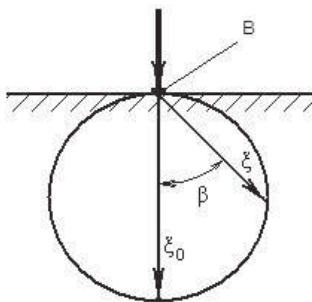


Рис. 1. Діаграма спрямованості точкового випромінювача пружної хвилі: B — точковий випромінювач; ξ_0 — напрям поширення фронту хвилі; β — кут розкриття діаграми спрямованості
 Fig. 1. The radiation pattern of a point emitter of an elastic wave

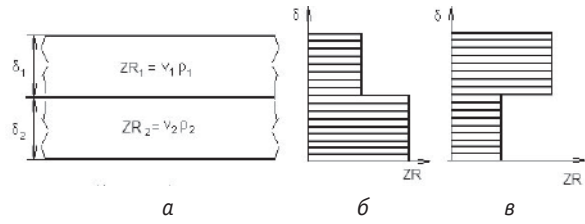


Рис. 2. Модель двошарового середовища: ZR — хвильовий опір середовища; δ_1, δ_2 — товщина першого та другого шарів відповідно; ρ_1, ρ_2 — питома щільність першого та другого шарів відповідно; v_1, v_2 — швидкість поширення в першому та другому шарі відповідно; a — розріз двошарового середовища; б, в — зміна хвильового опору в двошаровому середовищі за $ZR_1 < ZR_2$ та за $ZR_2 < ZR_1$

Fig. 2. Model of two-layer medium

нюють свій тип — обмінними. Останній клас хвиль утвориться лише в тому випадку, коли $\alpha \neq 0$.

Необхідною умовою для утворення відбитих хвиль на межі розділу середовищ є достатня розбіжність у величинах їх акустичних (хвильових) опорів — добутку $(\rho \cdot v)$. Це випливає із формули:

$$\frac{A_{\text{від}}}{A_{\text{пад}}} = \frac{\rho_1 \cdot v_1 \cdot \rho_2 \cdot v_2}{\rho_1 \cdot v_1 + \rho_2 \cdot v_2} = A_{\text{pp}}, \quad (3)$$

де $A_{\text{від}}$ і $A_{\text{пад}}$ — амплітуди відбитої й падаючої хвилі; ρ_i, v_i — відповідно питома щільність середовища (матеріалу) і швидкість поширення в ньому пружної хвилі; $(\rho_1 \cdot v_1)$ і $(\rho_2 \cdot v_2)$ — відповідно хвильові опори першого й другого шарів середовища. У розглянутому випадку $(\rho_1 \cdot v_1)$ — хвильовий опір першого (верхнього) шару середовища, в якому поширюються повздовжня P_{11} і поперечна P_1S_1 хвилі; $(\rho_2 \cdot v_2)$ — хвильовий опір другого (нижнього) шару, в якому поширюються хвилі повздовжня P_{12} і поперечна P_1S_2 .

Границі (межі) середовищ, за яких коефіцієнт відбиття падаючої хвилі A_{pp} , більший за 0,5, класифікуються як сильні, зі значенням $A_{\text{pp}} < 0,1$ — як слабкі; а границі, коефіцієнт відбиття на яких розміщується в діапазоні $0,5 > A_{\text{pp}} > 0,1$, — як середні. Формула (3) справедлива для випадку, коли $\alpha = 0$, тобто коли фронт поширення пружної хвилі перпендикулярний до відбиваючої поверхні.

Із формули (3) випливає, що зсув часток середовища (їх стискування чи розтягування), що спостерігається за поширення пружних коливань, на фронті відбитої хвилі має такий же характер, як і на фронті падаючої, в тому випадку, якщо $A_{\text{pp}} > 0$ ($\rho_1 \cdot v_1 < \rho_2 \cdot v_2$), і має протилежний — коли $A_{\text{pp}} < 0$.

Розглядаючи умови формування відбитих хвиль у багат шаровому середовищі, аналіз яких є необхідним за правильної постановки експерименту

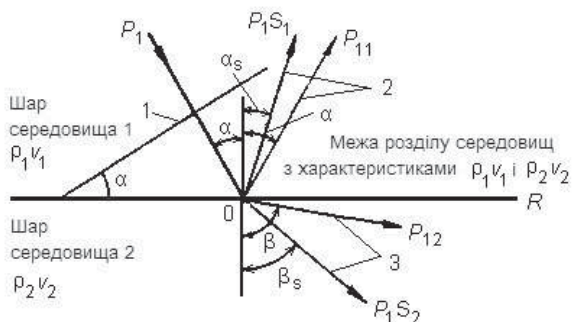


Рис. 3. Схема утворення відбитих і прохідних хвиль за дослідження двошарового будівельного матеріалу чи наявності площини розшарування у монолітному бетоні: $(\rho_1 \cdot v_1)$ і $(\rho_2 \cdot v_2)$ — відповідно хвильові опори першого й другого шару середовища; P_1 — зондувальний сигнал; P_{11} — відбита хвиля; P_1S_1 — відбита зсувна хвиля; P_1S_n — відповідно поперечна і поперечна пружні хвилі; P_{12} — прохідна хвиля; P_1S_2 — прихідна зсувна хвиля; β_m — кут розкриття діаграми спрямованості пружної хвилі; α_k — фронт поширення (кути падіння і відбиття) пружної хвилі

Fig. 3. The scheme of formation of reflected and transmitted waves in the study of two-layer building material or the presence of a bundle plane in monolithic concrete

з дослідження якості, потрібно вказати, що, на додаток до існування нерівності $(\rho_1 \cdot v_1 \neq \rho_2 \cdot v_2)$, яке фактично відбиває ступінь розбіжності у фізико-механічних властивостях шарів, потрібно аналізувати й характеристики межі розділу середовищ. Якщо величина нерівності $(\rho_1 \cdot v_1 \neq \rho_2 \cdot v_2)$ визначає, в основному, амплітудні характеристики пружних хвиль, то параметри межі розділу, як такою може виступати й дефект відповідного розміру, визначають частотний спектр — у розглядуваному випадку довжину хвилі зондувального сигналу [10, 13].

У цьому плані потрібно зазначити, що для забезпечення необхідного ступеня надійності результатів дослідження необхідно дотримуватися певного співвідношення між довжиною хвилі (λ) зондувального сигналу й розмірами контрольованої неоднорідності структури (l) , що фізично представляє межу розділу матеріалу чи матеріалів (рис. 2—5) [9].

На додаток до цього необхідно враховувати й ступінь шорсткості поверхні межі розділу середовищ. Так, якщо нерівності (шорсткість) на межі розділу середовищ чи неоднорідності структури матеріалу порівняні з довжиною хвилі зондувального сигналу, то вони будуть впливати на параметри інформаційного сигналу. Це зумовлено тим, що в процесі падіння хвилі будь-якого типу на шорсткуваті межі розділу середовищ виникають дифраговані хвилі. У результаті їхньої інтерференції

з хвилями, відбитими від шорсткуватостей, можуть утворюватися сумарнодифраговані (недзеркально-відбиті) хвилі.

Отже, виходячи зі співвідношення між довжиною хвилі й розмірами нерівностей (шорсткості), які спостерігаються на межі розділу середовищ, існує можливість вирішення й такого завдання, як визначення локальних радіусів кривизни поверхні розділу середовищ.

Досягаючи межі розділу середовищ з різними хвильовими опорами, пружні хвилі переломлюються й проходять з одного шару в другий. Коефіцієнт проходження (прозорості) B_{pp} визначається відношенням амплітуд прохідної $(A_{прох})$ і падаючої $(A_{пад})$ хвиль. За падіння фронту пружної хвилі по нормалі до межі розділу її коефіцієнт проходження (B_{pp}) визначають за формулою:

$$B_{pp} = \frac{A_{прох}}{A_{пад}} = \frac{2\rho_1 \cdot v_1}{\rho_1 \cdot v_1 + \rho_2 \cdot v_2} \quad (4)$$

де $\rho_1 \cdot v_1$ и $\rho_2 \cdot v_2$ — відповідно хвильові опори середовищ, у яких поширюються падаюча й прохідна хвилі.

Якщо швидкість поширення пружної хвилі в нижньому середовищі більша, ніж у верхньому, то за деякого значення кута падіння $\alpha = i$, кут переломлення β стає рівним 90° , і хвиля буде скочити уздовж межі розділу матеріалів, породжуючи вторинні хвилі, що повертаються до поверхні виробу чи конструкції, на якій виконують вимірювання. Такі хвилі називають переломленими, а кут падіння $\alpha = i$, за якого вони утворюються, — критичним кутом. Значення критичного кута α для конкретного типу

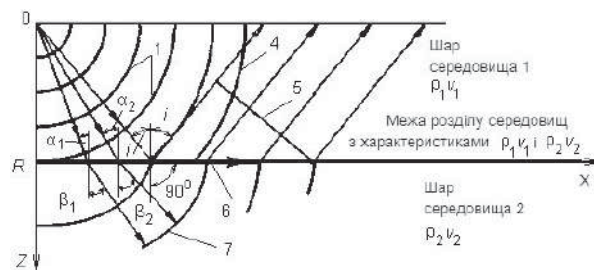


Рис. 4. Схема утворення переломлених хвиль за дослідження двошарового будівельного матеріалу чи наявності площини розшарування у монолітному бетоні: B — точка випромінювання (введення зондувального сигналу); 1 — пряма відбита хвиля; 2, 3 — прихідні переломлені хвилі; 4 — зсувні хвилі; $(\rho_1 \cdot v_1)$ і $(\rho_2 \cdot v_2)$ — відповідно хвильові опори першого й другого шарів середовища; β_m — кут розкриття діаграми спрямованості; α_k — фронт поширення пружної хвилі

Fig. 4. The scheme of formation of refracted waves in the study of two-layer building material or the presence of a bundle plane in monolithic concrete

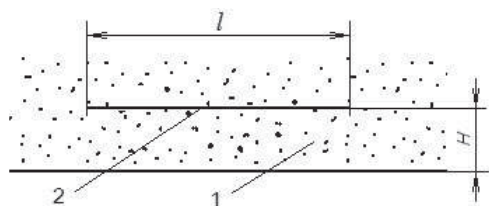


Рис. 5. Монолітний бетон з площиною розшарування: 1 — монолітний бетон; 2 — площина розшарування бетону; l — розмір площини розшарування бетону; H — глибина залягання площини розшарування бетону

Fig. 5. Monolithic concrete with a bundle plane

матеріалу може бути отримано за відомих швидкостей поширення пружної хвилі в першому та другому шарах матеріалу на основі закону переломлення:

$$\text{Sin}i = v_1/v_2.$$

За реальних умов, внаслідок порушень технологічного процесу, разом з випадками збіжної зміни фізико-механічних властивостей матеріалів у монолітній конструкції, інколи спостерігаються плавні зміни таких властивостей [10]. Такі ділянки називають градієнтними. Якщо в першому випадку зміна властивостей виражається у формуванні чіткої межі розділення середовищ, то в другому, через наявність градієнта швидкості, фронт пружної хвилі, що проходить через таке середовище, стає криволінійним. Це скривлення називають рефракцією, а хвилю, що поширюється за таким променем, — рефрагованою. Коли швидкість пружної хвилі лінійно зростає з глибиною, то промені являють собою дуги кіл, що виходять з точки (0) їх збудження (рис. 6).

Із викладеного вище випливає, що для вирішення завдань дослідження якості, виявлення структурних неоднорідностей матеріалів у будівельних конструкціях як з монолітного бетону, так і багат шарових матеріалів, необхідно розробляти відповідні методики та контрольно-вимірвальні прилади й системи, з урахуванням особливостей поширення пружних коливань та типів хвиль, що формуються під час цього процесу.

Використання викладених вище теоретичних засад дозволило розробити відповідні контрольно-вимірвальні прилади, результати випробувань яких підтвердили можливість вирішення поставленого завдання з необхідною точністю і достовірністю даних [14].

ВИСНОВКИ

Апробовані автором у натурних дослідженнях наявні методики й апаратура з метою вирішення завдання дослідження якості монолітного бетону і багат шарових матеріалів, що використовують у будівництві для виготовлення конструкцій і споруд, визначили необхідність їх удосконалення чи розробки

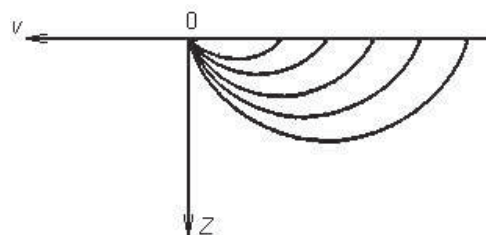


Рис. 6. Схема утворення рефрагованих хвиль за дослідження монолітного бетону з градієнтними змінами його міцності

Fig. 6. The scheme of formation of refracted waves in the study of monolithic concrete with gradient changes in its strength

нових. Це було визначено тим, що дослідження зазначених типів матеріалів виявили ряд характерних особливостей процесу поширення пружних хвиль, які необхідно враховувати як у процесі розроблення відповідного метрологічного й приладового інструментарію для вирішення поставленого завдання, так і під час проведення досліджень.

1. Поширення пружних хвиль, відбитих від границь шарів багат шарових матеріалів, які, як правило, відрізняються величиною $(\rho_i \cdot v_i)$ або від ділянки одношарового середовища, на якій параметр $(\rho_i \cdot v_i)$ має дискретну зміну порівняно з акустичним опором у масиві, супроводжується формуванням ряду типів хвиль, параметри яких дозволяють у кінцевому рахунку визначити надійність досліджуваної конструкції чи споруди.

2. Як основний інформативний параметр за застосування методу відбитих хвиль використовується час поширення хвилі у середовищі (матеріалі) (t_i) , за яким відбувається визначення відносного параметру — швидкості v_i . Для забезпечення необхідної достовірності результатів дослідження інформативність методу підвищується одночасним фіксуванням енергетичних та спектральних характеристик інформаційних сигналів.

3. Реєстрація часу поширення переломленої пружної хвилі виконується за першим вступом інформаційного сигналу. Для цього методу характерною є наявність стійкої кореляції між першим вступом і наступними гармонічними складовими інформаційного сигналу. Його застосування дозволяє вирішувати такі завдання дослідження:


- визначати глибину залягання та розміри переломлювальної границі (протяжного дефекту структури матеріалу) відносно поверхні виробу, на якій виконуються вимірювання, і завдяки цьому відтворювати розміри, конфігурацію дефекту;
- установлювати граничні швидкості (v_i) поширення пружної хвилі уздовж переломлювальних гра-

ниць, як за годографами переломлених і слабо рефрагованих хвиль, так і за годографами рефрагованих хвиль з уведенням поправки на рефракцію;

- установлювати залежність $v(H)$ за годографами рефрагованих хвиль і будувати розрізи в ізолініях швидкості, що дає можливість оцінювати зміну міцнісних характеристик матеріалу в конструкції чи споруді за глибиною.

Теорія й практика застосування цього методу для дослідження структури монолітних бетонів свідчать, що, виходячи з постановки завдання, за якою реалізуються й технічні характеристики контрольно-вимірювальних пристроїв, на основі цього методу можливе дослідження структури монолітних споруд практично будь-якого розміру та перетину з необхідним ступенем точності й надійності [9, 10, 14].

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Шутенко Л.Н., Серіков Я.О., Золотов С.М. Дослідження будівельних матеріалів та конструкційних елементів будинків і споруд ультразвуковими методами. Монограф. Київ: Техніка (Shutenko L.N., Serikov J.O., Zolotov S.M. Research of building materials and structural elements of buildings and constructions by ultrasonic methods. Monograph. Kyiv: Tehnika), 2005. — 210 с/р.
2. Серіков Я.А. Анализ методов неразрушающего контроля качества строительных материалов и изделий, основанных на упругих колебаниях / Труды VII Междунар. науч.-практ. конф. «Развитие жилищной сферы городов», МГАКХиС, Москва: (Serikov J.A. Analysis of methods of non-destructive quality control of building materials and products based on elastic vibrations / Proceedings of the VII Intern. scientific-practical conf. «Development of the housing sector of cities», Moscow State Academy of Arts and Culture, Moscow:), 2009. С/Р. 399—403.
3. Серіков Я.О. Проблеми розвитку і впровадження ультразвукового імпульсного методу в завданні вимірювання параметрів для визначення фізико-механічних характеристик бетону експлуатованих будинків і споруд / Метрологія та прилади (Serikov J.O. Problems of development and implementation of the ultrasonic pulse method in the task of measuring parameters for determining the physical and mechanical characteristics of concrete of operated buildings and structures / Metrology and instruments), 2019, — №5, — С/Р. 56—61.
4. Серіков Я.О. Економічні та технологічні аспекти використання ультразвукового імпульсного методу при визначенні мікро- та макроструктурних дефектів у бетоні мостових споруд / «Строительство, материаловедение, машиностроение» // Сб. научн. трудов. Вып. 40. — Дн-ск, ПГАСА (Serikov Ya. Economic and technological aspects of the ultrasonic impulse testing method for microstructural defects in concrete bridge construction / «Construction, materials science, mechanical engineering» // Collection of scientific papers. Issue 40. — Dn-sk; PGASA), 2007, — С/Р. 96—100.
5. Serikov J.A. Improvement of the Methods and Means Used in Nonlinear Acoustics for Diagnostics of Items, Constructions and Structures Made of Cast-in-Situ Concrete. / Nonlinear Acoustics at the beginning of the 21st Century / 16th International Symposium on Nonlinear Acoustics «ISNA-16», Москва: 2002. — v. 2., — P. 843—846.
6. C. Zhang, W-Jjin, H. Liu and H. Zhang. Study on Ultrasonic Evaluation of Cement Bond Quality in Oil Wells., Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences / 5th World Congress on Ultrasonics Institut Biomedical des Cordeliers Universite Pierre et Marie Curie Paris, France 7—10 September 2003. p. 86—90.
7. J. Serikov, S. Serikov, V. Morozov. Researches of function of concrete by glue by a ultrasonic impulse method «Science, Education and Society» 11th International Scientific Conference, Zilina, Slovac Republic, — 2003. — P. 315—318.
8. Серіков Я.О. Розробка технології метрологічного забезпечення процесу дослідження структури монолітного бетону на основі пружних хвиль / XIII Междунар. конф. «Стратегия качества в промышленности и образовании», 2017 // Междунар. научный журнал Acta Universitatis Pontika Euximus. Спец. вып. Технический университет г. Варна, Болгария (Serikov J.O. Development of technology of metrological support of process of research of structure of monolithic concrete on the basis of elastic waves / XIII International conference «Quality Strategy in Industry and Education» 2017 // International. scientific journal Acta Universitatis Pontika Euximus. Special. Issue Technical University of Varna, Bulgaria). — С/Р. 350—355.
9. Серіков Я.А., Серіков С.Я. Совершенствование акустических методов для исследования качества и надежности эксплуатации конструкций из монолитных бетонов в шахтных условиях / Сб. трудов XIII сессии Российского акустического общества. Т. 2 «Акустические измерения и стандартизация. Геоакустика. Ультразвук и ультразвуковые технологии». Москва: МГУ (Serikov J.A., Serikov S.J. Improvement of acoustic methods for studying the quality and reliability of the operation of cast-in-situ concrete structures in mine conditions / Coll. proceedings of the XIII session of the Russian Acoustic Society. Vol. 2 «Acoustic measurements and standardization. Geoacoustics. Ultrasound and Ultrasonic Technologies». Moscow: Moscow State University), 2003. — С/Р. 142—146.
10. Золотов М.С., Серіков С.Я., Серіков Я.А. Методика диагностики бетона массивных конструкций и сооружений акустическим методом // Научно-технический сборник «Коммунальное хозяйство городов», Київ: «Техніка» (Zolotov M.S., Serikov S.J., Serikov J.A. Methods for diagnosing concrete of massive structures and structures by the acoustic method // Scientific and technical collection «Utilities of cities», Kiev: «Technics»), No 19, 1999. С/Р. 82—84.
11. Иродов И. Е. Волновые процессы. Основные законы / Изд. 3-е. Москва: БИНОМ. Лаборатория знаний (Irodov I.E. Wave processes. Basic laws / Ed. 3rd. Moscow: BINOM. Knowledge Laboratory), 2006. — 263 с/р.
12. Гурвич И. И., Боганик В. Н. Сейсмическая разведка. — Москва: Недра (Gurvich I.I., Boganik V.N. Seismic exploration. — Moscow: Nedra), 1986. — 551 с/р.
13. Серіков Я.О. Виявлення структурних неоднорідностей в монолітному бетоні неруйнівним ультразвуковим імпульсним методом. Методологія / Матеріали II міжнар. конф «Інноваційні технології в науці та освіті. Європейський досвід» / Університет Аалто, Гельсінкі: (Serikov J.O. Detection of structural inhomogeneities in monolithic concrete by non-destructive ultrasonic pulse method. Methodology / Proceedings of the II International Conference «Innovative Technologies in Science and Education. European experience»/ Aalto University, Helsinki) 2018. С/Р. 409—413.
14. Серіков Я.О. Розроблення приладів для системи моніторингу міцнісних характеристик бетону в експлуатованих будинках і спорудах на основі ультразвукового імпульсного методу / Метрологія та прилади (Serikov J.O. Development of devices for the system of monitoring the strength characteristics of concrete in operated buildings and structures on the basis of the ultrasonic pulse method / Metrology and instruments), 2019. — С/Р. 22—27. 

Отримано / received: 20.10.2020.

Стаття рекомендована до публікації д.ф.-м.н., проф. В.Д. Ходусовим (Україна).
 Prof. V.D. Khodusov, D. Sc. (Phys.-mat.), Ukraine, recommended this article to be published.

DOI: 10.33955/2307-2180(5)2020.23-26

УДК 634.51 / 536.55 / 542.4

КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА ДЛЯ ВИРОЩУВАННЯ ОВОЧІВ З РЕГУЛЮВАННЯМ ТЕПЛО-ВОЛОГІСНО- ІНСОЛЯЦІЙНОГО РЕЖИМУ

A Cyber-Physical System of the Vegetables Production with the Heat-Moisture-Insolation Control

С. П. Яцишин, доктор технічних наук,
професор кафедри інформаційно-вимірвальних
технологій,
e-mail: slav.yat@gmail.com

А. В. Мідик, аспірант,
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5345-8686>,
Національний університет «Львівська політехніка», Україна,

О. В. Лиса, кандидат технічних наук,
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3623-2375>,
Львівський національний аграрний університет, Україна,
e-mail: yatsuk.vasyl@gmail.com

S. P. Yatsyshyn, doctor of technical sciences,
professor of the department of information
and measurement technologies,
e-mail: slav.yat@gmail.com

A. V. Midyk, postgraduate,
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5345-8686>,
Lviv Polytechnic National University, Ukraine,

O. V. Lisa, candidate of technical sciences,
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3623-2375>
Lviv National Agrarian University, Ukraine,
e-mail: yatsuk.vasyl@gmail.com

Обґрунтовано актуальність розроблен-
ня кіберфізичної системи вирощування овочів
з регулюванням тепло-вологісно-інсоляційного
режиму для підвищення ефективності вироб-
ництва у теплиці. Для ефективної роботи
в теплиці потрібно забезпечити оптималь-
ний мікроклімат для вирощування різних сор-
тів рослин з мінімальними енерговитратами.
Кіберфізична система вирощування ово-
чів — це система, що контролюється та від-
стежується комп'ютерними алгоритмами.
Основними інформаційними параметрами
мікроклімату тепличних приміщень є: тем-
пература повітря, вологість повітря, освіт-
леність тепличного приміщення, темпера-
тура ґрунту, вологість ґрунту, концентра-
ція вуглекислого газу в теплиці. Також необ-
хідно аналізувати зовнішні метеоумови та кон-
структивні параметри теплиці. Здійснено ва-
ріантний аналіз сучасних мікропроцесорних
контролерів та контрольно-вимірвальних
приладів. На основі аналізу технічних харак-
теристик мікроконтролерів та контрольно-
вимірвальних приладів проведено вибір еле-
ментної бази кіберфізичної системи вирощу-
вання овочів, зокрема мікропроцесора Arduino
Uno, який може здійснювати плавне регулюван-
ня температури і вологості зі збереженням до-
статньої точності підтримуваних парамет-
рів, є енергоефективним та дешевим. До його
складу входять 14 цифрових входів / виходів
(з них 6 виводів можуть використовуватися як
ШИМ-виходи), 6 аналогових входів, кварцовий ре-
зонатор на 16 МГц, роз'єм USB, роз'єм живлення,
роз'єм для внутрішньої схемного програмуван-
ня (ICSP) і кнопка скидання. Проаналізувавши
технічні характеристики датчиків, для кібер-
фізичної системи вирощування овочів рекомен-
дуємо цифрові датчики температури та воло-
гості повітря з підвищеною точністю DHT21/
AM2301 та DHT22. Похибка складатиме менше
10С. Для вимірювання освітленості теплично-

го приміщення рекомендуємо BH1750. Такі при-
лади забезпечать оптимальний мікроклімат
для вирощування різних сортів рослин з міні-
мальними енерговитратами.

The article substantiates the urgency of develop-
ing a cyber-physical system of vegetables produc-
tion with regulation of heat-moisture-insolation re-
gime to increase the greenhouse efficiency. To oper-
ate, it is necessary to provide an optimal microcli-
mate for different plant varieties with minimal ener-
gy costs. A cyber-physical vegetable production sys-
tem is a system controlled and monitored by compu-
ter algorithms. The main informational parameters of
the microclimate of greenhouses are: air temperature,
humidity, insolation of the greenhouse, soil tempera-
ture, soil moisture, carbon dioxide concentration. It is
also necessary to analyze the environment param-
eters of the greenhouse.

A variant analysis of modern microproces-
sor controllers and measuring instruments is car-
ried out. Based on the analysis of technical charac-
teristics of microcontrollers and control and mea-
suring devices, the element base of the cyber-phy-
sical vegetables production system was selected, in
particular the Arduino Uno microprocessor, which
can smoothly regulate temperature and humidity
while maintaining sufficient accuracy of control-
led parameters. It consists of 14 digital inputs / out-
puts (of which 6 pins can be used as PWM outputs),
6 analog inputs, 16 MHz quartz resonator, USB con-
nector, power connector, connector for internal cir-
cuit programming (ICSP) and reset button. After ana-
lyzing the technical characteristics of the sensors,
we recommend digital sensors of temperature and
humidity with increased accuracy DHT21 / AM2301
and DHT22 for the cyber-physical system of vegeta-
ble growing. The error will be less than 10C. We recom-
mend BH1750 to measure the illumination of the
greenhouse. Such devices will provide an optimal
microclimate for growing different varieties of plants
with minimal energy consumption.



С. П. Яцишин



А. В. Мідик



О. В. Лиса

Ключові слова: кібер-фізична система, мікроконтролер, давач, виконавчий елемент, температура, вологість, освітленість.
Keywords: cyber-physical system, microcontroller, encoder, actuator, temperature, humidity, light.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Для здорового харчування людей потрібно вирощувати значну кількість свіжих овочів незалежно від погоди у всі пори року. Для цього у світі й в Україні зокрема, використовують різноманітні теплиці. Щоби отримати високі врожаї рослинницької продукції, мінімізуючи при цьому витрати на утримання та експлуатацію теплиці, необхідно ефективно керувати мікрокліматом у теплицях. Проте у багатьох теплицях використовуються морально застарілі системи управління технологічними процесами. Це знижує ефективність та енергоємність теплиць, оскільки, по-перше, рослини достатньо вимогливі до кліматичних умов, і за межами температурного оптимуму їх ріст сповільнюється, а за подвійного відхилення від оптимуму взагалі припиняється [1]; а по-друге, підвищення температури в теплиці на 1°C вище необхідної призводить до додаткових витрат 100 тон умовного палива на рік на 1 га площі. Тобто для ефективно роботи в теплиці потрібно забезпечити оптимальний мікроклімат для вирощування різних сортів рослин з мінімальними енерговитратами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій свідчить, що активні дослідження для покращення роботи теплиць ведуться в напрямках аналізу мікрокліматичних умов теплиць [1], розроблення та вдосконалення елементної бази, зокрема давачів, за допомогою яких формується первинна інформація стосовно стану мікроклімату в теплиці [2, 3], виконавчих механізмів, мікроконтролерів [4], спрощення процесу розроблення програмного забезпечення для мікроконтролерів, за допомогою якого керують виконавчими механізмами. Із робіт [2, 3] можна зробити висновок, що сучасні давачі розвиваються в напрямку зменшення похибок вимірювань, збільшення діапазону вимірювань, зменшення розмірів, маси та енерговитрат, спрощення підключення до систем керування та підвищення надійності, функціональності та інтелектуалізації засобів. Тобто є напрацьована елементна база для створення інтелектуальних систем управління, які зможуть підвищити ефективність управління мікрокліматом у теплиці.

ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

Основне завдання — підвищення ефективності виробництва у теплиці шляхом розроблення системи керування мікрокліматом у теплиці із використанням сучасних мікропроцесорних контролерів та контрольно-вимірвальних приладів.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Будь-яка кіберфізична система — це система, що контролюється та відстежується комп'ютерними алгоритмами; це система, яка може приймати інформацію зі зовнішнього середовища за допомогою системи давачів, самостійно опрацьовувати її та відповідно до цієї інформації змінювати свої дії. Й ці всі операції відбуваються без участі людини. Тому, коли йдеться стосовно створення кіберфізичної системи для вирощування овочів, то зазначаємо, що вона має контролювати стан мікрокліматичних умов усередині теплиці та ззовні за допомогою системи давачів, опрацьовувати отриману з давачів інформацію за допомогою комп'ютерних алгоритмів, а також керувати виконавчими елементами відповідно до опрацьованої інформації.

Аналіз мікрокліматичних умов теплиць доцільно проводити за таким комплексом параметрів: температура повітря у теплиці; вологість повітря у теплиці; освітленість теплиці; температура ґрунту; вологість ґрунту; концентрація вуглекислого газу в теплиці. Окрім того, необхідно аналізувати зовнішні метеоумови та конструктивні параметри теплиці.

Центром кіберфізичної системи є мікроконтролер. Мікроконтролер зчитує дані з давачів і керує виконавчими елементами. Тому від вибору мікроконтролера значною мірою залежить робота всієї системи. Для побудови такої кіберфізичної системи необхідний мікроконтролер, який може здійснювати плавне регулювання таких параметрів, як температура і вологість зі збереженням достатньої точності підтримуваних параметрів, має необхідні технічні характеристики, є енергоефективним та, бажано, дешевим. Оптимальним, на думку авторів, є *Arduino Uno*.

Плата *Arduino Uno* — це пристрій на основі мікроконтролера *ATmega328* [4]. До його складу входить усе необхідне для зручної роботи з мікроконтролером: 14 цифрових входів/виходів (з них 6 виводів можуть використовуватися як ШІМ-виходи), 6 аналогових входів, кварцовий резонатор на 16 МГц, роз'єм USB, роз'єм живлення, роз'єм для внутрішнього схемного програмування (*ICSP*) і кнопка скидання.

Мікропроцесорна система на основі плати *Arduino UNO* дозволяє реалізувати вимірвальні прилади з мікропроцесорним управлінням, які можуть включати до свого складу електронні двигуни, датчики та сенсори. Узагалі всі компоненти кіберфізичної системи повинні бути енергоефективними та дешевими.

Технічні характеристики давачів температури та вологості

Technical characteristics of temperature and humidity sensors

Характеристики	DHT11	DHT21/AM2301	DHT22/AM2302	HTU21
Визначення вологості	(20—90) % RH \pm 5 % (макс.)	(0—100) % \pm 3 % RH	(0—100) % \pm 2 % RH	(0—80) % RH \pm 3 % RH (макс.)
Визначення температури	(0—50) °C \pm 2 % (макс.)	(-40 ~ 80) °C \pm 0,5 %	(-40...+80) °C \pm 0,5 °C	(-10 до 85) °C \pm 0,4 °C (макс)
Розміри	(15,5 x 12 x 5,5) мм	(59 x 26 x 14) мм	(15,1 x 25,1 x 7,7) мм	3x3 мм DFN корпус
Тип підключення	4 виводи 1. VCC ((3—5) В живлення) 2. Data Out — Вивід даних 3. NC — не використовується 4. Загальний	4 виводи 1. VCC — «+» живлення 2. OUT — цифровий вихід 3. NC — не використовується 4. GND — «Земля»	4 виводи 1. VDD ((3,3—5,3) В живлення) 2. SDA — Serial data, bidirectional port (Серійні дані, двонаправлений порт) 3. NC — не використовується 4. GND — «Земля»	4 виводи з відстанню між контактами 0.1 1. VCC (3,3 В живлення) 2. Земля-Земля 3. SDA — A4 4. SCL — A5 Одночасно на шині I2C можна розміщувати тільки один давач
Живлення	(3,5—5,5) В	(3,3—5,2) В	(3,5...5,0) В	(5—6) В

Проведемо варіантний аналіз сучасних засобів контролю температури і вологості, які можуть працювати з *Arduino*. Це давачі *DHT11*, *DHT21*, *DHT22* та *HTU21* [5].

Дачач *DHT11* — це цифровий давач температури і вологості, що дозволяє калібрувати цифровий сигнал на виході. Складається з емнісного давача вологості і термістора. Дачач містить АЦП для перетворення аналогових значень вологості та температури.

Дачач *DHT22/AM2302* — це цифровий давач температури і вологості з підвищеною точністю; для вимірювання використовується емнісний давач вологості й *NTC*-термістор; всі покази передаються за цифровою інформаційною шиною. Від давачів *DHT11* відрізняється більшою точністю, діапазоном вимірювань, схемою підключення і протоколом ідентичні.

Дачач температури і вологості *DHT21/AM2301* підвищеної точності — простий у підключенні, підключається за однопровідним інтерфейсом. Протокол і схема підключення — ідентичні давачу *DHT22*.

Дачач вологості та температури *HTU21* призначений для точного вимірювання вологості й температури. У давачі застосовано мікросхему *HTU21* з інтерфейсом *I2C*, що забезпечує високу точність вимірювань температури $\pm 0,05^\circ\text{C}$. На кристалі розміщено: аналого-цифровий модуль опрацювання сигналу, дані калібрування і *I2C* інтерфейс, сенсорний елемент у виді монолітного *CMOS* датчика. Модуль

має систему управління з низьким дрейфом і наднизьке споживання енергії.

Порівняємо технічні характеристики зазначених давачів температури та вологості у таблиці.


Проаналізувавши технічні характеристики давачів, для кіберфізичної системи вирощування овочів можна рекомендувати давачі *DHT21/AM2301* та *DHT22*. За використання в *Arduino* давача *DHT11* система досягає результатів меншої точності, ніж за використання давачів *DHT21/AM2301* та *DHT22*. Похибка перевищує більше 1 °C. Тому давачі *DHT21/AM2301* та *DHT22* доцільніше використовувати, як елементи системи кіберфізичної системи для вирощування овочів.

Для вимірювання освітленості доцільно вибрати цифровий давач *BH1750*, який може працювати з мікроконтролером за протоколом *I2C*.

ВИСНОВКИ

Розроблено кіберфізичну систему вирощування овочів з регулюванням тепло-вологісно-інсоляційного режиму. Встановлено, що основними інформаційними параметрами мікроклімату тепличних приміщень є: температура повітря, вологість повітря, освітленість тепличного приміщення, температура ґрунту, вологість ґрунту, концентрація вуглекислого газу в теплиці. Здійснено вибір основних елементів кіберфізичної системи вирощування овочів, зокрема мікропроцесора (*Arduino Uno*), давача температури та вологості повітря (*DHT21/AM2301* та *DHT22*) та освітлення тепличного приміщення (*BH1750*).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Агротехнічні вимоги до автоматизації технологічних процесів у закритому ґрунті (Agrotechnical requirements for automation of technological processes in the closed ground). URL: http://kyrator.com.ua/index.php?option=com_content&view=article&id=724:tituln3&catid=23&Itemid=130&limitstart=7
2. Вимірювальні перетворювачі (сенсори). — Підручник / Є.С. Поліщук, М.М. Дорожовець, В.О. Яцук, В.М. Ванько, Ю.В. Яцук. — Львів: Вид-во Львівської політехніки (Measuring converters (sensors). — Textbook / E.S. Polischuk, M.M. Dorozhovets, V.O. Yatsuk, V.M. Vanko, and Yu.V. Yatsuk. — Lviv: Edition of the Lviv Polytechnic), 2015. — 584 с.
3. Карвінен Теро, Карвінен Киммо, Валтокари Вилле. Делаем сенсоры: проекты сенсорных устройств на базе *Arduino* и *Raspberry Pi*. Пер. с англ. — М.: ООО «И.Д. Вильямс» (Karvinen Thero, Karvinen Kimmo, Valtokari Ville. Making sensors: projects of sensor devices based on *Arduino* and *Raspberry Pi*. Per. with eng. — М.: LLC «I.D. Williams»), 2015. — 432 с.
4. Основи мікропроцесорної техніки. — Лабораторний практикум / В.С. Баран, Г.Г. Власюк, Ю.О. Оникієнко, О.І. Смоленська (Basics of microprocessor technology. — Laboratory Workshop / V.S. Baran, G.G. Vlasjuk, Yu.O. Onikyenko, O.I. Smolenska) URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/27992/1/OMPT_laboratori.pdf
5. Датчик влажности и температуры (Humidity and temperature sensor). URL: <https://3d-diy.ru/wiki/arduino-datchiki/datchik-vlazhnosti-i-temperatury-dht11/> 

Отримано / received: 23.08.2020.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. Б.І. Стадником (Україна).
Prof. B.I. Stadnyk, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.

DOI: 10.33955/2307-2180(5)2020.27-32

УДК 621.314.224

АНІЗОТРОПНИЙ ЕЛЕКТРООМІЧНИЙ ТРАНСФОРМАТОР

**Anisotropic
Electroohmic
Transformer**

А. А. Ащеулов, доктор технічних наук, професор, головний науковий співробітник, Інститут термоелектричності НАНУ і МОН, Чернівці, Україна,
e-mail: ashcheulovaa@rambler.ru

М. Я. Дерев'янчук, заступник директора коледжу,
Д. А. Лавренюк, інженер, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, Україна,
e-mail: m.derevianchuk@ukr.net

О. С. Веренко, радіотехнік,
І. С. Романюк, кандидат технічних наук, заступник генерального директора, ТДВ «Завод «Кварц», Чернівці, Україна,
e-mail: ris2210@ukr.net

A. A. Ashcheulov, doctor of technical sciences, professor, chief researcher, Institute of thermoelectricity of NAS and MES, Chernivtsi, Ukraine,
e-mail: ashcheulovaa@rambler.ru

M. Ya. Derevianchuk, deputy director of college,
D. A. Lavreniuk, engineer, Uriy Fedkovych of Chernivtsi national university, Ukraine,
e-mail: m.derevianchuk@ukr.net

O. S. Verenko, radio technical,
I. S. Romanjuk, candidate of technical sciences, deputy general director, Factory «Quartz», Chernivtsi, Ukraine,
e-mail: ris2210@ukr.net

Розглянуто особливості розподілу електричного струму в анізотропному електропровідному середовищі, встановлено залежності поздовжньої та поперечної його складових від геометричних факторів.

У випадку пластини прямокутної форми довжиною a , висотою b і шириною c вибрані кристаліграфічні вісі розміщені в площині бічної грані ($a \times b$), причому одна з цих осей орієнтована під деяким кутом α до ребра a . Прикладання до верхньої і нижньої торцевих граней пластини деякої різниці потенціалів призводить до появи поздовжньої і поперечної складових електричного струму, що протікає. Це призводить до можливості трансформації величини електричного струму. Наведено методи оптимізації величини коефіцієнта трансформації, що визначається величиною, як анізотропії електропровідності матеріалу пластини, так і коефіцієнтом її форми $k = a/b$. Запропоновано варіанти конструкції анізотропних електропровідних трансформаторів, одна із яких, спіральної форми, характеризується високим значенням коефіцієнта трансформації.

Наведено інформацію стосовно наявних монокристалічних та штучних анізотропних матеріалів. Представлено залежність коефіцієнта перетворення m від величини анізотропії k матеріалу трансформуючого елемента.

Окреслено перспективні матеріали для реального створення анізотропних електропровідних трансформаторів із необхідними функціональними характеристиками, які залежно від ступеня структурної досконалості характеризуються як діелектричними, так і металічними властивостями. Як такий матеріал може бути використано кремній. Під час застосування планарної технології можна отримувати анізотропні електропровідні матеріали з необхідною величиною анізотропії k матеріалу пластини.

Використання цього ефекту трансформації дає можливість розширити практичне використання електроомічних явищ. Наведений принцип трансформації розширить сфери його використання в метрології та вимірвальній техніці.

Peculiarities of electric current distribution in anisotropic electrically conductive medium are considered and dependences of its longitudinal and transverse components on geometrical factors are established.

In the case of a rectangular plate of length a , height b and width c , the selected crystallographic axes are located in the plane of the side face ($a \times b$), and one of these axes is oriented at an angle α to the edge a . Application to the upper and lower end faces of the plate of some potential difference leads to the appearance of longitudinal and transverse components of the flowing electric current. This leads to the possibility of transforming the electric current magnitude. The methods of optimizing the transformation coefficient magnitude which is determined by both the magnitude of the anisotropy of the electrical conductivity of the plate material and the coefficient of its shape $k = a/b$. The design variants of anisotropic electrically conductive transformers are proposed, one of which is of the spiral shape is characterized by a high value of the transformation coefficient.

Information on existing monocrystalline and artificial anisotropic materials is given. The dependence of the coefficient transformation m on the magnitude of the anisotropy k of the transforming element material is presented.

The perspective materials for the real creation of anisotropic electrically conductive transformers with the necessary functional characteristics, which, depending on the degree of structural perfection, is characterized by both dielectric and metallic properties, are outlined. Silicon can be used in this case. Applying planar technology makes possible to obtain anisotropic electrically conductive materials with the required magnitude of the anisotropy k of the plate material.

The use of this transformation effect makes it possible to expand the practical use of electroohmic phenomena. This principle of transformation will expand the areas of its use in metrology and measurement technology.

Ключові слова: анізотропія, електропровідне середовище, тензор, вектор, складові електричного струму, електричний струм, трансформатор, трансформуючий елемент.

Keywords: anisotropy, electrically conductive medium, tensor, vector, electric current components, electric current, transformer, transforming element.

ВСТУП

Узгодження джерел і споживачів електричної енергії змінного струму здійснюється за допомогою різних трансформаторів, робота яких базується на явищах електромагнітної індукції та трансформації [1]. Ці пристрої отримали широке застосування у сучасній науці й техніці.

Разом із наведеним вище також відомий ефект трансформації внутрішньої електрики, що базується на використанні поперечної складової тензора термоЕРС [2] або фото-ЕРС [3], які спостерігаються в термоелементах Томсона і фотоелементах Дембера відповідно. Ефект трансформації, який використовує особливості анізотропних середовищ [4], також дозволив запропонувати нове покоління високоточкових термоелектричних перетворювачів теплової енергії, що характеризуються підвищеними значеннями коефіцієнта корисної дії [5].

У [5] представлено оригінальну конструкцію трансформатора для зовнішнього джерела постійного електричного струму. Його основою є прямокутна пластина з анізотропного електропровідного матеріалу, відповідні грані якої містять електрично підключені *p-n* переходи. Експериментальні дослідження цього пристрою засвідчили, що його коефіцієнт трансформації може приймати значення як більше, так і менше одиниці, однак при цьому спостерігається нелінійна залежність між вхідними і вихідними характеристиками, зумовлена впливом *p-n* переходів. Трансформація змінного електричного струму в цьому випадку неможлива.

У цій статті представлено фізичну модель оригінального принципу трансформації змінного електричного струму з лінійною залежністю вхідних і вихідних характеристик, що дозволяє значно розширити практичні можливості сучасної електроенергетики, електроніки, приладобудування, а також інших сфер науки і техніки.

1. РІВНЯННЯ ТРАНСФОРМАЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ В АНІЗОТРОПНИХ ЕЛЕКТРОПРОВІДНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

У загальному випадку тензор електропровідності $\hat{\sigma}$ анізотропного електропровідного середовища у випадку, коли його головні кристалографічні осі σ_{11} , σ_{22} і σ_{33} збігаються відповідно з осями *OX*, *OY* і *OZ* обраної лабораторної системи координат *OXYZ*, має такий вид [6]:

$$\hat{\sigma} = \begin{vmatrix} \sigma_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33} \end{vmatrix}. \tag{1}$$

Якщо вектор зовнішнього електричного поля \vec{E} , що прикладається до такого середовища, орієнтований вздовж однієї з її головних кристалографічних осей, наприклад σ_{22} , збігається з віссю *OY*, то в об'ємі середовища виникає електричний струм σ_{22} тільки в цьому напрямку:

$$\vec{j}_{yy} = \vec{E}_y \cdot \sigma_{22} \tag{2}$$

В інших кристалографічних напрямках середовища електричний струм не спостерігається.

Інша ситуація виникає у випадку, коли вектор електричного поля \vec{E}_y розміщений у площині, яка створена кристалографічними осями σ_{11} і σ_{22} , одна із яких, наприклад, σ_{11} орієнтована під кутом α до осі *OX* лабораторної системи координат (рис. 1а). Таке розміщення осей дозволяє представити тензор $\hat{\sigma}$ у такому виді:

$$\hat{\sigma} = \begin{vmatrix} \sigma_{11} \cos^2 \alpha + \sigma_{22} \sin^2 \alpha & (\sigma_{11} - \sigma_{22}) \sin \alpha \cdot \cos \alpha & 0 \\ (\sigma_{11} - \sigma_{22}) \sin \alpha \cdot \cos \alpha & \sigma_{11} \sin^2 \alpha + \sigma_{22} \cos^2 \alpha & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33} \end{vmatrix} \tag{3}$$

і характеризується наявністю як повздовжньої $\sigma_{||}$, так і поперечної σ_{\perp} складових тензора електропровідності $\hat{\sigma}$.

Створення за допомогою зовнішніх електродів напруги електричного поля \vec{E}_y в напрямку *OY* призводить до появи як повздовжньої \vec{j}_{yy} , так і поперечної \vec{j}_{xx} складових векторів електричного струму, що мають такий вид:

$$\vec{j}_{yy} = \vec{E}_y (\sigma_{11} \cos^2 \alpha + \sigma_{22} \sin^2 \alpha), \tag{4}$$

$$\vec{j}_{xx} = E_y (\sigma_{11} - \sigma_{22}) \sin \alpha \cdot \cos \alpha. \tag{5}$$

Оптимізація значень (4) і (5) за кутом α ($-\partial j / \partial \alpha = 0, \partial j / \partial \alpha^2 < 0$) — свідчить, що їх максимальне значення спостерігається за $\alpha_{\text{опт}} = 45^\circ$:

$$\vec{j}_{yy} = 0,5 \cdot \vec{E}_y (\sigma_{11} + \sigma_{22}), \tag{6}$$

$$\vec{j}_{xx} = 0,5 \cdot \vec{E}_y (\sigma_{11} - \sigma_{22}). \tag{7}$$

Розглянемо прямокутну пластину довжиною *a*, висотою *b*, шириною *c* (рис. 1а), виготовлену з матеріалу, що має певні характеристики анізотропії електропровідності $\hat{\sigma}$. А саме, кристалографічні осі σ_{11} і σ_{22} розміщені в площині її бокової грані (*a* × *b*), при цьому одна із цих осей, наприклад σ_{11} , орієнтована під кутом $\alpha_{\text{опт}} = 45^\circ$ до осі *X*. Прикладання до верхньої і нижньої граней (*a* × *c*) деякої різниці потенціалів *U_y*, зумовлює протікання

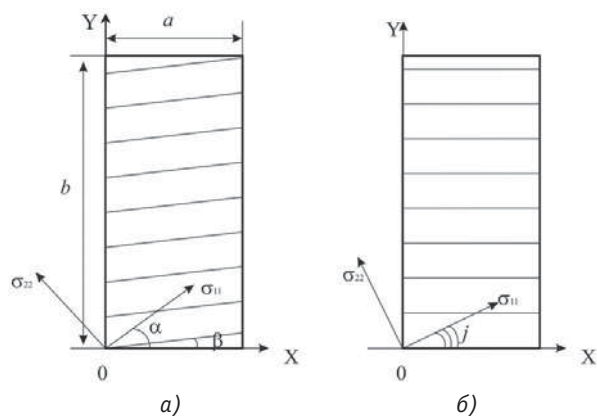


Рис. 1. Розподіл ліній щільності трансформованих електричних струмів в об'ємі пластини за:

а) $\alpha = \alpha_{\text{опт}} = 45^\circ$, б) $\gamma = 45^\circ - \beta$

Fig. 1. Distribution of density lines of transformed electric currents in the volume of the plate at: а) $\alpha = \alpha_{\text{опт}} = 45^\circ$, б) $\gamma = 45^\circ - \beta$

повздожнього I_y і поперечного I_x електричних струмів:

$$I_y = U_y \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22}}{\sigma_{11} \cdot \sigma_{22}} \cdot \frac{b}{ac}, \quad (8)$$

$$I_x = U_y \frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{\sigma_{11} \cdot \sigma_{22}} \cdot \frac{a}{bc}, \quad (9)$$

а коефіцієнт трансформації n такого пристрою виражений формулою

$$n = \frac{I_x}{I_y} = \frac{(\sigma_{11} - \sigma_{22})}{(\sigma_{11} + \sigma_{22})} \cdot \frac{b^2}{a^2}. \quad (10)$$

Потрібно зазначити, що у випадку, який розглядається, можлива трансформація як постійного, так і змінного електричних струмів, за якого значення n необхідно визначати у режимі короткого замикання. При цьому лінії трансформованого струму I_x розміщені під кутом β (рис. 1а), який визначається такою формулою:

$$\beta = \arctg \frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{\sigma_{11} + \sigma_{22}}, \quad (11)$$

де величина $m = \frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{\sigma_{11} + \sigma_{22}}$ є коефіцієнтом перетворення матеріалу анізотропної трансформуючої пластини, $p = b/a$ — коефіцієнт її форми.

На рис. 2 представлено залежність коефіцієнта перетворення m від величини анізотропії k матеріалу пластини, із якої випливає, що зі зростанням k величина m монотонно зростає, досягаючи насичення за $k = 50$ ($m = 89,1\%$).

Отже, застосування закону Ома в анізотропних електропровідних середовищах за певних умов дозволяє запропонувати новий підхід для трансформації електрики. Цей процес можна назвати електроомічним методом трансформації [5].

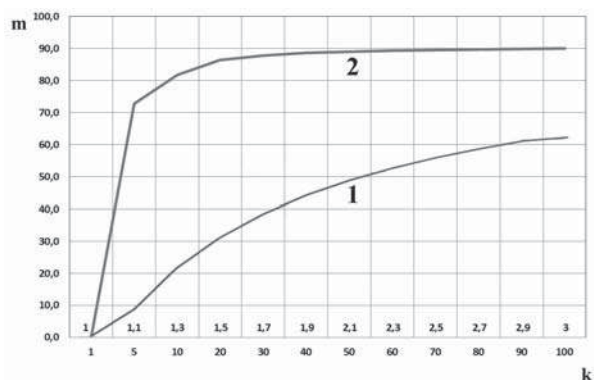


Рис. 2. Залежність коефіцієнта m від величини анізотропії k матеріалу анізотропної електропровідної пластини:

1 — для монокристалічних матеріалів,

2 — для штучних анізотропних матеріалів

Fig. 2. Dependence of the coefficient m on the value of anisotropy k of the material of the anisotropic electrically conductive plate: 1 — for single-crystal materials, 2 — for artificial anisotropic materials

II. КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ АНІЗОТРОПНИХ ЕЛЕКТРОПРОВІДНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ (АЕТ) ЗМІННОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ

У загальному випадку вибір конкретної конструкції трансформатора на основі анізотропного електропровідного матеріалу визначається як особливостями фізичних явищ, що відбуваються в ньому, так і умовами його експлуатації [7]. Один із можливих варіантів конструкції цього пристрою, призначеного для трансформації змінного електричного струму, наведено на рис. 3.

Основою такого пристрою є трансформуючий елемент у виді прямокутної пластини 1 — довжиною a , висотою b і шириною c (рис. 1а) із анізотропного електропровідного матеріалу. Вибрані кристалографічні осі σ_{11} зазначеної вище пластини і σ_{22} розміщені у площині її бокової грані ($a \times b$) (рис. 3), при цьому вісь σ_{11} розміщена під кутом $\alpha_{\text{опт}} = 45^\circ$. Ліва і права грані ($b \times c$) цієї пластини містять електроізоляційні шари 2 з діелектричною проникністю ϵ . Зовнішні сторони цих шарів, у свою чергу, містять електропровідні шари 3, до яких прикріплені вихідні електричні виводи 6 та 7. Вхідні електричні виводи 4 і 5 розміщені на верхній і нижній торцевих ($b \times c$) гранях пластини 1.

Така конструкція АЕТ забезпечує рівномірне поширення трансформуючого електричного струму в об'ємі пластини 1 і є його запобіжником від електричного шунтування електропровідними шарами 3.

Аналіз розподілу щільності трансформованого струму в об'ємі пластини 1 засвідчив, що орієнтація кристалографічної осі σ_{11} під кутом $\alpha_{\text{опт}} = 45^\circ$ веде до деякого викривлення його еквіпотенціальності,

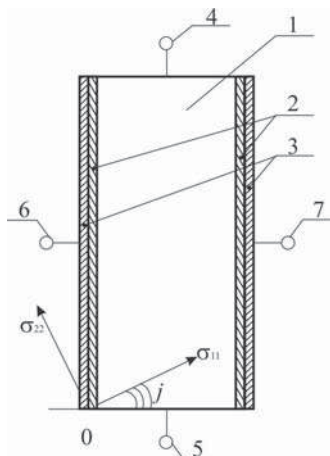


Рис. 3. Схематична конструкція АЕТ змінного електричного струму.

1 — трансформуючий елемент;
2 — електроізолюючі шари; 3 — електропровідні шари;
4, 5 — вхідні і 6, 7 — вихідні електричні контакти.

Fig. 3. Schematic design of AET AC.

1 — transforming element; 2 — electrically insulating layers; 3 — electrically conductive layers;
4, 5 — input and 6, 7 — output electrical contacts.

а відповідно, до зменшення величини коефіцієнта трансформації. Для усунення цього явища в деяких випадках орієнтацію осі σ_{11} необхідно проводити під кутом $\gamma = \alpha_{\text{опт}} - \beta$ (рис. 16). У такому випадку лінії щільностей струму, що трансформуються не викривляються, а величина коефіцієнта трансформації n_1 визначатиметься таким виразом:

$$n_1 = \frac{(\sigma_{11} - \sigma_{22}) \sin \gamma \cos \gamma \cdot a}{\sigma_{11} \cos^2 \gamma + \sigma_{22} \sin^2 \gamma \cdot b} \quad (12)$$

Такий конструктивний підхід дозволяє усунути викривлення розподілу електричних струмів в об'ємі пластини 1.

Електрична схема такого пристрою відносно вхідних електричних виводів 4 і 5 є активним за характером опором R_1 , величина якого дорівнює

$$R_1 = \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22}}{\sigma_{11} \cdot \sigma_{22}} \cdot \frac{b}{a \cdot c} \quad (13)$$

а його вихідний опір відносно виводів 6, 7 має активно-ємнісний характер, величина Z якого визначається таким виразом:

$$Z = \sqrt{R_2^2 + \frac{1}{\omega^2 c^2}} \quad (14)$$

де

$$R_2 = \frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{\sigma_{11} \cdot \sigma_{22}} \cdot \frac{a}{b \cdot c} \quad (15)$$

$$c = \epsilon \cdot \epsilon_c \cdot \frac{b \cdot c}{2\Delta} \quad (16)$$

де Δ — товщина електроізоляційного шару, $\omega = 2\pi f$, f — частота трансформуючого струму.

Отже, пристрій, що розглядається, має активний вхідний і активно-ємнісний вихідний опори і може бути використаний для трансформації тільки змінного електричного струму.

У випадку необхідності АЕТ з великим значенням коефіцієнта трансформації n , трансформуючий елемент 1 (рис. 3), що є його основою, характеризується великими лінійними розмірами. Ця особливість веде до деякого обмеження можливостей його практичного застосування. Це обмеження усувається такою конструкцією АЕТ, представленою на рис. 4.

Такий пристрій складається із трансформуючого елемента 1 у виді пластини довжиною a , висотою b і шириною c на основі анізотропного електропровідного матеріалу. Ця пластина згорнута у спіраль і є диском висотою b , зовнішнім r_1 і внутрішнім r_2 радіусами відповідно.

Верхня і нижня грані цього диска площею $S = \pi(r_1^2 - r_2^2)$ містять діелектричні шари товщиною Δ_1 , на зовнішніх сторонах якого, в свою чергу, розміщені електропровідні шари товщиною Δ_2 . Вхідні електроконтакти 4, 5 розміщені, відповідно, на внутрішній і зовнішній торцевих гранях ($b \times c$) диска. Вихідні електровиводи такого трансформатора розміщені на зовнішніх сторонах електропровідних шарів 3. Одна із бокових граней ($a \times b$) трансформуючого спірального елемента 1 містить електроізоляційний шар 8 товщиною Δ_3 із діелектричного матеріалу.

При цьому коефіцієнт трансформації n_3 , довжина трансформуючого елемента a , кількість витків N спіралі пов'язані між собою такими співвідношеннями:

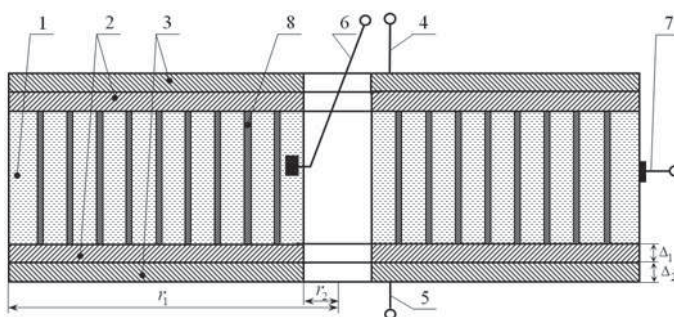


Рис. 4. Конструкція спірального АЕТ:

1 — трансформуючий елемент у виді пластини довжиною a , висотою b і шириною c , згорнутої у спіраль зі зовнішнім r_1 і внутрішнім r_2 радіусами; 2 — електроізоляційні шари; 3 — шари; 4, 5 і 6, 7 — вхідні і вихідні електроконтакти відповідно; 8 — міжвитковий електроізоляційний шар

Fig. 4. The design of the spiral AET:

1 — transforming element in the form of a plate of length a , height b and width with a coiled with outer r_1 and inner r_2 radii; 2 — electrical insulating layers; 3 — layers; 4, 5 and 6, 7 — input and output electrical contacts, respectively; 8 — interturn electrical insulating layer

$$a = \frac{\pi(r_1^2 - r_2^2)}{c + \Delta_3} \quad (17)$$

$$N = \frac{\pi(r_1 - r_2)}{c + \Delta_3} \quad (18)$$

$$n_3 = \frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{\sigma_{11} + \sigma_{22}} \cdot \frac{\pi(r_1^2 - r_2^2)}{b(c + \Delta_3)} \quad (19)$$

Порівняння геометричних розмірів пристроїв, наведених на рис. 3 і 4, свідчить, що $n = n_3 = 10^3$ у першому випадку довжина a трансформуючого елемента складає $a = 2,1 \times 10^3$ мм за висоти $b = 2,0$ мм і ширини $c = 0,2$ мм. У випадку спірального трансформуючого елемента його зовнішній радіус $r_1 = 12,5$ мм, а внутрішній $r_2 = 2,0$ мм за висоти диска $b = 2,0$ мм. При цьому товщина міжвиткового електроізоляційного шару $\Delta_3 = 10^{-2}$ мм. Як матеріал в обох випадках використовувалася анізотропна шарова композиція на основі таких металів, як срібло і хром.

Отже, спіральна конструкція АЕТ дозволяє зменшити його лінійні розміри за високих значень величини трансформації n_3 .

ІІІ. АНІЗОТРОПНІ ЕЛЕКТРОПРОВІДНІ МАТЕРІАЛИ ТА ЇХ ОПТИМІЗАЦІЯ

На сьогодні відомі як природні, так і штучні анізотропні електропровідні матеріали. До першого класу належать, наприклад, деякі елементи п'ятої групи періодичної системи елементів Менделєєва такі як бісмут (Bi) і стибій (Sb), для яких $k = 1,2 \dots 1,5$. До другого класу потрібно віднести штучні матеріали, які отримують послідовними методами синтезу і направленою кристалізацією, наприклад CdSb, Bi_2Te_3 , а також евтектичні голчасті композиції CdSb-CoSb [8], ZnAs-As [9], значення k для яких містяться в межах 1,6...3. Використання таких мате-

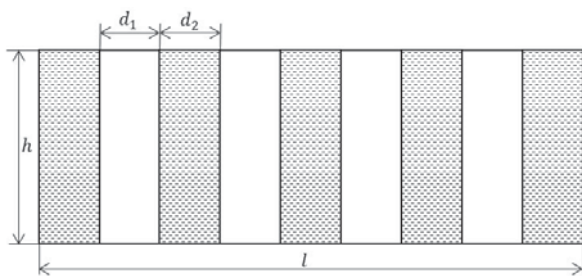


Рис. 5. Модель структури штучно-анізотропного електропровідного середовища:

- 1 — шар із матеріалу з електропровідністю s_1 і товщиною d_1 ; 2 — шар із матеріалу електропровідністю s_2 і товщиною d_2

Fig. 5. Model of structure of artificially anisotropic electrically conductive medium:

- 1 — layer of material with electrical conductivity s_1 and thickness d_1 ; 2 — layer of material with electrical conductivity s_2 and thickness d_2

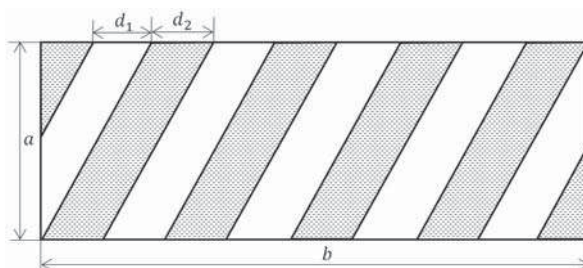


Рис. 6. Анізотропний трансформуючий елемент із штучного анізотропного матеріалу

Fig. 6. Anisotropic transforming element made of artificial anisotropic material

ріалів у трансформаторах дозволяє отримати значення коефіцієнта перетворення $m = (9 \dots 60,6) \%$, що явно недостатньо для розв'язання сучасних практичних задач. Подальше зростання величини коефіцієнта m можливе у випадку використання штучно-анізотропних матеріалів, методику розрахунку яких наведено у [10].

У випадку подання штучно-анізотропного електропровідного середовища у виді прямокутного паралелепіпеда довжиною l , висотою h і шириною s (рис. 5), виготовленого із вертикально розміщених за чергою шарів 1 і 2 з товщинами d_1 і d_2 відповідно, які характеризуються електропровідностями σ_1 і σ_2 ($\sigma_1 \gg \sigma_2$).

Величини повздовжньої σ_{\parallel} і поперечної σ_{\perp} складових тензора електропровідності $\hat{\sigma}$ середовища виражаються такими виразами:

$$\sigma_{\parallel} = \frac{\sigma_1 d_1 + \sigma_2 d_2}{d_1 + d_2}, \quad (20)$$

$$\sigma_{\perp} = \frac{\sigma_1 \sigma_2 (d_1 + d_2)}{\sigma_1 d_1 + \sigma_2 d_2}, \quad (21)$$

а значення товщин d_1 і d_2 пов'язані такими співвідношеннями:

$$d_1 = d_2 \sqrt{\sigma_2 / \sigma_1}. \quad (22)$$

У такий спосіб, підбираючи відповідні матеріали шарів 1 і 2, а також їх товщини, й отримуємо штучно-анізотропний електропровідний матеріал з потрібним коефіцієнтом перетворення m .

Для конструкції АЕТ із трансформуючим елементом на основі оптимізованого штучно-анізотропного матеріалу, представленої на рис. 6, коефіцієнт трансформації n_4 визначається таким виразом:

$$n_4 = \frac{(\sigma_1 d_1 + \sigma_2 d_2)(\sigma_1 d_2 + \sigma_2 d_1) - \sigma_1 \sigma_2 (d_1 + d_2)^2}{(\sigma_1 d_1 + \sigma_2 d_2)(\sigma_1 d_2 + \sigma_2 d_1) + \sigma_1 \sigma_2 (d_1 + d_2)^2} \cdot \frac{a}{b}. \quad (23)$$

Отже, можливість вільного вибору відповідних матеріалів веде до реального створення АЕТ із необхідними функціональними характеристиками.

Особливо перспективним у цьому відношенні є кремній (Si), який залежно від ступеня структурної

досконалості має як діелектричні, так і металічні властивості. Використання планарної технології дозволяє у цьому випадку отримувати анізотропні електропровідні матеріали з $k = 60 \dots 80$.


Пристрої на основі розглянутого вище явища трансформації можуть використовуватися як узгоджувальні елементи різних широкополосних систем, а також вузлів і блоків електроніки, приладобудування, метрології та обчислювальної техніки.

Використання розглянутого принципу трансформації дозволить розширити сфери його використання в метрології та вимірювальній техніці.

ВИСНОВОК

Показана можливість трансформації змінного електричного струму анізотропними електропровідними середовищами. Наведений принцип трансформації дозволить розширити його використання у різних сферах науки і техніки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. И.Е. Тамм, Основы теории электричества. ОГИЗ. М.–Л. (I.E. Tamm, Fundamentals of the Theory of Electricity. OGIZ. M.–L.) 1946, — 560 с/р.
2. Thomson W. On thermoelectric currents in linear conductors of crystalline substance. — Math. Phys. Pap., 1882, N1, p. 266—273.
3. Т.С. Гертович, Поперечный эффект Дембра в анизотропных диэлектрических среда, мат.конференции Молодых ученых. Черновцы (T.S. Gertovich, Transverse Dembr effect in anisotropic dielectric media, Mat.Conference of Young Scientists. Chernivtsi), 1967, с/р. 38—39.
4. Л.И. Анатычук. Термоэлементы и термоэлектрические устройства. Наукова думка, Киев (L.I. Anatychuk. Thermoelements and thermoelectric devices. Naukova Dumka, Kiev), 1979, 767 с/р.
5. А.С. СССР 1512457. Преобразователь величины постоянного тока. А.А. Ащеулов и др. Б.И. №12 от 01.06.1989 г (A.S. USSR 1512457. DC magnitude converter. A.A. Ashcheulov and others. No. 12 dated 01.06.1989).
6. Дж. Най, Физические свойства кристаллов. Мир. М. (J. Nye, Physical properties of crystals. Pease. M.) 1967, 286 с/р.
7. Патент UA №151258. Процесс трансформации электричества. Ащеулов А.А. и др. Бюл. №6 от 25.03.2020 (Patent UA No. 151258. The process of transformation of electricity. A.A. Ashcheulov et al. Bull. No. 6 dated 03/25/2020).
8. А.А. Ащеулов, И.С. Романюк. Анизотропные опτικο-термоэлементы на основе антимонида кадмия и их применение. Золотые литавры, Черновцы (A.A. Ashcheulov, I.S. Romanyuk. Anisotropic optical thermoelements based on cadmium antimonide and their application. Golden Timpani, Chernivtsi), 2012, 228 с/р.
9. С.Ф. Маренкин, В.М. Трухан. Фосириды, арсениды цинка и кадмия. НАН Беларуси, Минск (S.F. Marenkin, V.M. Trukhan. Fosirides, zinc and cadmium arsenides. NAS of Belarus, Minsk), 2010, 227 с/р.
10. О.А. Геращенко и др. Приемники теплового потока на основе искусственно-анизотропных термоэлектрических материалов. ИФЖ (O.A. Gerashchenko et al. Heat flow receivers based on artificially anisotropic thermoelectric materials. IFJ) 1978, №2, с/р. 228—233. 

Отримано / received: 21.09.2020.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. Ю.Г. Добровольським (Україна).
 Prof. Yu.G. Dobrovolskyi, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.

DOI: 10.33955/2307-2180(5)2020.33-41

УДК 536:6

ОЦІНЮВАННЯ СКЛАДОВОЇ ПОХИБКИ ВИМІРЮВАННЯ ТЕПЛООВОГО ПОТОКУ, ЗУМОВЛЕНОЇ НЕРІВНОМІРНОСТЮ ПРОСТОРОВОЇ ЧУТЛИВОСТІ ПЕРЕТВОРЮВАЧА

Estimation of the Component of the Heat Flux Measurement Error Due To the Non-Uniformity of the Spatial Sensitivity of the Transducer

Л. Й. Воробйов, доктор технічних наук,
провідний науковий співробітник,
e-mail: teplomer@ukr.net

О. Л. Декуша, кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник,
e-mail: odekusha@nas.gov.ua

С. Г. Кобзар, кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник,
e-mail: sergiykobzar@gmail.com

Л. В. Декуша, доктор технічних наук,
провідний науковий співробітник,
e-mail: teplomer@ukr.net

Інститут технічної теплофізики
НАН України, м. Київ, Україна

L. Y. Vorobiov, doctor of technical sciences,
leading researcher,
e-mail: teplomer@ukr.net

O. L. Dekusha, candidate of technical
sciences, senior researcher,
e-mail: odekusha@nas.gov.ua

S. G. Kobzar, candidate of technical
sciences, senior researcher,
e-mail: sergiykobzar@gmail.com

L. V. Dekusha, doctor of technical sciences,
leading researcher,
e-mail: teplomer@ukr.net

Institute of Engineering Thermophysics
of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine



Л. Й. Воробйов



О. Л. Декуша



С. Г. Кобзар



Л. В. Декуша

Розглянуто методику апріорного оцінювання складової похибки вимірювання теплового потоку, зумовленої нерівномірністю просторової (зональної) чутливості перетворювача. Така складова похибки вимірювання властива різним видам приладів, для яких вимірювана величина на вході приладу має нерівномірний просторовий розподіл, а первинний перетворювач — зональну неоднорідність чутливості. Зазначена складова похибки виникає у випадку, коли просторовий розподіл вимірюваної величини за умов експлуатації не збігається з розподілом цієї величини за калібрування приладу. Запропонована методика включає визначення характеристик розподілу просторової чутливості перетворювача; можливих просторових розподілів вимірюваної величини за калібрування та за робочих вимірювань; розрахунок складової похибки за різних варіантів досліджуваного процесу; вибір значень параметрів, які задовольняють установленим вимогам до складової похибки вимірювання. Розглянуто приклад розрахунків на основі моделювання розподілу теплового поля у спрощеній калориметричній структурі з розподіленими параметрами.

The technique of the apriority estimation of the error component in heat flux measuring, caused by the non-uniformity of the sensor spatial (zonal) sensitivity, is considered. This component of the measurement error is inherent to the various types of devices, for which the measured parameter has an uneven spatial distribution, and the primary transducer has a zonal non-uniformity of sensitivity.

The specified component of the error arises in the case when the spatial distribution of the measured quantity under operating conditions does not coincide with the distribution of this quantity during the device calibration. The technique, being suggested, includes determination of the characteristics of the sensor spatial sensitivity distribution; determination of possible spatial distributions of the measured quantity during calibration and working measurements; calculation of error components for different variants of the experiment being conducted; selection of parameter values that meet the established requirements for the measurement error. An example of calculations for a calorimetric structure, which is a simplified model of a flat thermal radiation receiver, is considered. The structure consists of a thermostatic base, a heat flux sensor layer, an electric heater layer and a receiving cell wall layer.

The modeling of the distribution of the thermal field in the calorimetric structure is carried out for various variants of the spatial distribution of the heat flux entering to the wall of the receiving cell and with varying the thickness of this wall.

Based on this information and statistical data on the unevenness of the sensitivity, the expected component of the measurement error is calculated. The results obtained make it possible to choose the required cell wall thickness. It is shown that the estimate of the component of the measurement error can be obtained on the basis of statistical data on the non-uniformity of the spatial sensitivity of the sensor and on the difference in the distribution of thermal fields during calibration and during measurements.

Ключові слова: вимірювання теплового потоку, просторова нерівномірність чутливості, похибка вимірювання, калориметричні прилади.
Key words: heat flux measurement, spatial non-uniformity of sensitivity, measurement error, calorimetric devices.

ВСТУП

Одним із джерел похибки вимірювання калориметричної системи є просторова (зональна) нерівномірність чутливості перетворювача теплового потоку. Просторова неоднорідність наявна практично у всіх типах перетворювачів, які не розглядаються як об'єкти із зосередженими параметрами [1]. Нерівномірність чутливості окремих елементів часто проявляється у матричних (багатоелементних) прийमाках випромінювання, як фотоелектричних, так і теплових. Для вирівнювання значень чутливості застосовують різноманітні методи: технологічні, конструкційні, алгоритмічні [2–4].

Зазвичай під час калібрування калориметричного приладу експериментально визначають його коефіцієнт перетворення, який залежить як від нерів-

номірності чутливості перетворювача, так і від просторового розподілу заданої за калібрування тестової енергії або потужності. Якщо у подальшій роботі (експлуатації) просторовий розподіл вимірюваної енергії або потужності збігається з тестовим, то складова похибки, зумовлена нерівномірністю чутливості, дорівнює нулю. Якщо ж у процесі експлуатації калориметричного приладу просторовий розподіл вимірюваної енергії або потужності не збігається з тестовим, то виникає додаткова складова похибки, яку необхідно оцінювати під час визначення метрологічних характеристик приладу.

Прикладом нерівномірного розподілу теплового потоку на приймальній поверхні перетворювача є комірка приладу для вимірювання коефіцієнта емісії, в якій за нагрівання знизу утворюється

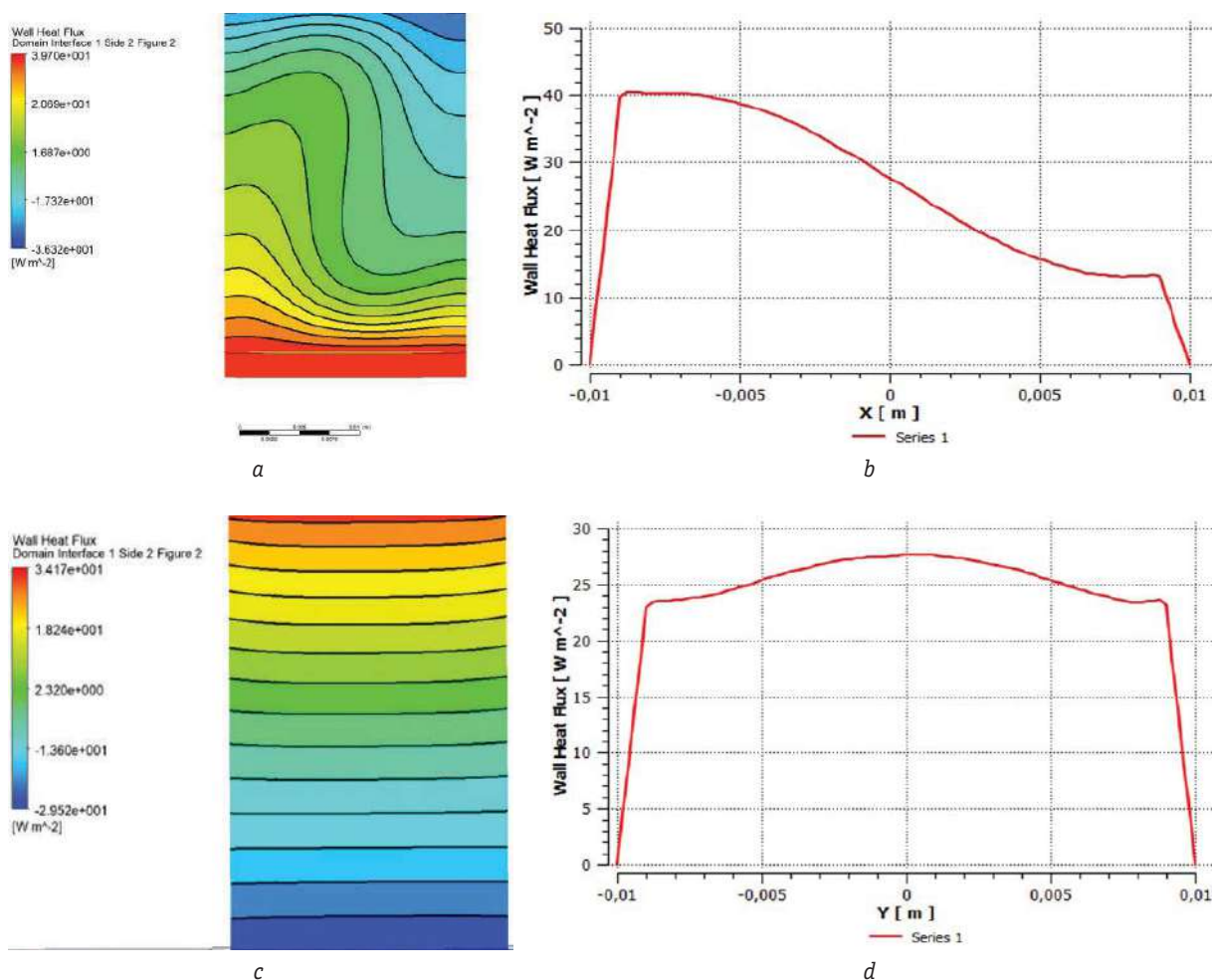


Рис. 1. Результати моделювання теплообміну в комірці приладу для вимірювання коефіцієнта емісії (а, б — нагрівання зверху; в, г — нагрівання знизу; а, в — розподіл температури в комірці; б, г — розподіл густини теплового потоку на перетворювачі)

Fig. 1. The results of modeling the heat transfer in the cell of the device for measuring the emission factor (a, b — heating from above; c, d — heating from below; a, c — temperature distribution in the cell; b, d — the distribution of heat flux density at the sensor)

повітряна конвективна циркуляція (вихор), а за нагрівання зверху конвективний теплообмін практично відсутній [5]. Зазначені варіанти експлуатації приладу призводять до суттєво різних розподілів вимірюваного теплового потоку на поверхні перетворювача. Проведено комп'ютерне моделювання теплообміну у комірці приладу для вимірювання коефіцієнта емісії, за результатами якого отримано розподіл температури за об'ємом комірки під час нагрівання знизу (рис. 1а) та зверху (рис. 1с), а також графіки (рис. 1b та 1d) розподілу сумарного (конвективно-радіаційного) теплового потоку на центральній лінії перетворювача, який у обох випадках розміщений зі сторони нагрівання. Різні просторові розподіли теплового потоку, за наявності зональної нерівномірності чутливості, зумовлюють появу додаткової похибки вимірювання.

Е. Кальве, для уникнення впливу просторової нерівномірності чутливості, особливо підкреслював необхідність рівномірного розміщення спайів зварних термоелементів на поверхні калориметричної комірки, в якій можливе тепловиділення з нерівномірним розподілом у просторі [6].

Вплив просторової нерівномірності теплового поля в калориметричній комірці може зумовлювати додаткову складову похибки навіть у випадках використання перетворювачів із зосередженими параметрами, наприклад, одиночних термопар. Під час калібрування калориметричних приладів часто застосовують метод електричного заміщення, за яким замість енергії, що виділяється у досліджуваному процесі, в калориметричну комірку вводять задану електричну енергію за допомогою вбудованого або тимчасово зануреного в комірку нагрівника. За вимірювань джерело енергії просторово не збігається з калібрувальним електричним нагрівником, відповідно можуть різнитися просторові розподіли температурних полів, що зумовлює складову похибки вимірювань. У роботах [7—9] розглянуто вплив розподілу температурних полів у абсолютному порожнинному радіометрі на його похибку вимірювання.

Метою роботи є розроблення методики апріорного оцінювання складової похибки вимірювання теплового потоку, зумовленої нерівномірністю просторової чутливості перетворювача, та перевірка методики методом імітаційного моделювання.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Нерівномірність чутливості приймачів радіаційного теплового випромінювання, побудованих на базі багатоелементних перетворювачів теплового потоку [10], значною мірою залежить від досконалості

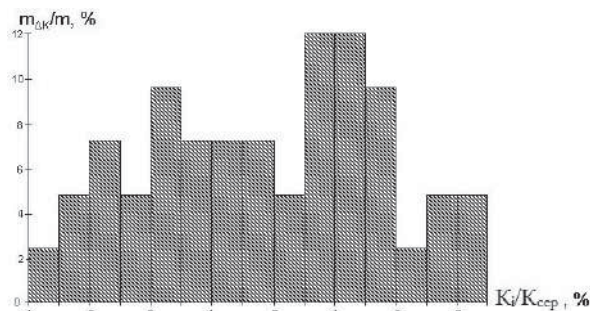


Рис. 2. Гістограма частотного розподілу відхилень відносних коефіцієнтів перетворення ділянок перетворювача від середнього значення.

Fig. 2. Histogram of frequency distribution of relative transformation coefficient deviations of the converter sections from average value.

технології виготовлення стрічкової батареї термоелементів, а також від конструкції самого приймача. Існує декілька причин такої нерівномірності: неоднакова просторова щільність термоелементів, неоднакова висота каркасної стрічки та нанесеного покриття, неоднаковість відношення площ перерізу термоелектородів і т. інш.

Проведено експериментальні дослідження відносного коефіцієнта перетворення (величини, зворотної до чутливості) окремих ділянок перетворювача теплового випромінювання. Всю поверхню перетворювача умовно розділено на $m = 42$ однакових за площею ділянок i , шляхом локального теплового впливу, визначено відносний коефіцієнт перетворення $K_i/K_{ср}$ кожної ділянки. Побудовано гістограму частотного розподілу числа ділянок оболонки $m_{\Delta K}/m$ від відносного відхилення приведенного коефіцієнта перетворення від середнього значення (рис. 2). Середньоквадратичне відхилення для вимірюваних значень $K_i/K_{ср}$ становить 2,7%.

Розкид значень чутливості (коефіцієнтів перетворення) окремих ділянок перетворювача калориметричної системи, так само як і коефіцієнтів перетворення окремих перетворювачів, визначається точністю дотримання розрахункових конструктивних параметрів: висоти спіралі, площі перетину гальванічного покриття, щільності укладання термоелементів. Значний вплив на розкид параметрів має якість нанесення захисного лаку на заготовку спіралі, оскільки неповне покриття лаком одного боку спіралі, або проникнення лаку на іншу сторону призводять до зменшення ефективної висоти спіралі i , відповідно, — зниження чутливості. Основний спосіб зменшення розкиду коефіцієнтів перетворення — удосконалення технології виробництва спіралі термоелементів. До найбільш ефективних напрямків удосконалення технології відносяться: поопераційний

контроль процесів намотування спіралі; нанесення лаку і гальванічного покриття; контроль і відбракування неякісних ділянок спіралі; стабілізація режимів нанесення гальванічного покриття.

Оцінимо вплив розкиду значень чутливості окремих ділянок перетворювача на похибку вимірювання нерівномірно розподіленого у просторі теплового потоку. Припустимо, що перетворювач умовно розділено на N_d однакових за площею ділянок. Чутливість до енергії, що проходить будь-якою i -тою ділянкою S_i , може бути представлена у виді:

$$S_i = S + \Delta S_i,$$

де S — середня чутливість ділянок;

ΔS_i — відхилення чутливості i -тої ділянки від середнього значення.

Відзначимо, що в силу адитивності вимірюваної енергії й сигналів, що генеруються ділянками перетворювача, повна чутливість усього перетворювача до енергії, що крізь нього проходить, також дорівнює S . Енергія, що проходить через i -ту ділянку Q_i , може бути представлена у виді: $Q_i = Q_\Sigma / N_d + \Delta Q_i$, де ΔQ_i — відхилення енергії, що проходить через i -ту ділянку, від середнього значення $Q_{\text{ср}} = Q_\Sigma / N_d$.

Повна енергія $Q_{\text{вим}}$, виміряна за допомогою перетворювача, дорівнює:

$$Q_{\text{вим}} = \frac{1}{S} \times \sum_{i=1}^{N_d} \left(\frac{Q_\Sigma}{N_d} + \Delta Q_i \right) \cdot (S + \Delta S_i) = \frac{1}{S} \left[\sum_{i=1}^{N_d} \frac{Q_\Sigma S}{N_d} + \frac{Q_\Sigma}{N_d} \sum_{i=1}^{N_d} \Delta S_i + S \sum_{i=1}^{N_d} \Delta Q_i + \sum_{i=1}^{N_d} \Delta Q_i \cdot \Delta S_i \right].$$

Унаслідок того, що за визначенням $\sum_{i=1}^{N_d} \Delta S_i = 0$ та $\sum_{i=1}^{N_d} \Delta Q_i = 0$,

$$\text{отримуємо: } Q_{\text{вим}} = \frac{1}{S} \left[Q_\Sigma S + \sum_{i=1}^{N_d} \Delta Q_i \cdot \Delta S_i \right]. \quad (1)$$

У виразі (1) перший доданок відповідає дійсному значенню вимірюваної енергії, а другий — абсолютному відхиленню, зумовленому просторовою нерівномірністю чутливості й розподілу енергії.

Припустимо, що в дослідах градування і за реальних вимірів виділяється однакова енергія, але за різного просторового розподілу енергії отримуватимуться різні результати:

- під час градування:

$$Q_{\text{вим,1}} = \frac{1}{S} \left[Q_\Sigma S + \sum_{i=1}^{N_d} \Delta Q_{i,1} \cdot \Delta S_i \right],$$

- за реальних вимірів:

$$Q_{\text{вим,2}} = \frac{1}{S} \left[Q_\Sigma S + \sum_{i=1}^{N_d} \Delta Q_{i,2} \cdot \Delta S_i \right].$$

У процесі експерименту градування визначають значення S (або зворотну величину — коефіцієнт

перетворення) і вважають, що $Q_{\text{вим,1}} = Q_\Sigma$. Зважаючи на те, що, $Q_\Sigma S \gg \sum_{i=1}^{N_d} \Delta Q_{i,1} \cdot \Delta S_i$, отримуємо вираз для складової відносної похибки вимірювання внаслідок просторової неоднорідності $\delta_{\text{ПН}}$:

$$\delta_{\text{ПН}} = \frac{Q_{\text{вим,2}} - Q_{\text{вим,1}}}{Q_{\text{вим,1}}} = \frac{1}{N_d} \sum_{i=1}^{N_d} \frac{\Delta Q_{i,2} - \Delta Q_{i,1}}{Q_{\text{ср}}} \cdot \frac{\Delta S_i}{S}. \quad (2)$$

Отже, відносна похибка вимірювання дорівнює середньому значенню добутків відносних відхилень чутливості елементів перетворювача на відносні відхилення у розподілі енергії за цими елементами.

Уважаючи значення незалежними випадковими величинами і скориставшись відомими співвідношеннями для лінійної функції випадкових величин [11], отримуємо:

$$D(\delta_{\text{ПН}}) = \frac{D(\Delta S/S)}{N_d^2} \times \sum_{i=1}^{N_d} \left[\frac{\Delta Q_{2,i}}{Q_{\text{ср}}} - \frac{\Delta Q_{1,i}}{Q_{\text{ср}}} \right]^2 \quad (3)$$

де: $D(\delta_{\text{ПН}})$ — дисперсія відносної похибки, зумовленої просторовою нерівномірністю чутливості;

$D(\Delta S/S)$ — дисперсія відносних відхилень чутливості ділянок поверхні перетворювача;

N_d — кількість ділянок поверхні перетворювача, для яких проводяться розрахунки;

$\frac{\Delta Q_{1,i}}{Q_{\text{ср}}}$, $\frac{\Delta Q_{2,i}}{Q_{\text{ср}}}$ — відносні відхилення розподілу енергії або теплового потоку на поверхні перетворювача в режимі калібрування та в режимі вимірювання.

Запропоновано узагальнену методику апріорного розрахункового оцінювання складової похибки, зумовленої нерівномірністю чутливості перетворювача. Ця методика включає таку послідовність дій та операцій:

I. Експериментальним або розрахунковим методом визначають характеристики розподілу просторової чутливості перетворювача теплового потоку калориметричного приладу: межі можливого розкиду значень чутливості, закон розподілу чутливості як випадкової величини та параметри цього розподілу. Ці характеристики суттєво залежать від застосованої технології виготовлення. Важливим параметром є лінійний розмір елементарної ділянки поверхні перетворювача, для якого визначаються параметри розподілу чутливості та який застосовуватиметься у подальших розрахунках. Цей розмір, з одного боку, повинен бути таким, щоби в різні елементарні ділянки поверхні перетворювача входила приблизно однакова кількість термоелементів, а з іншого боку цей розмір повинен бути достатньо малим, щоби відтворювати просторову нерівномірність

теплого поля. За умови виконання цих вимог, розмір елементарної ділянки повинен бути співставним з товщиною перетворювача.

II. На основі моделювання або/та експериментальних досліджень визначають можливі просторові розподіли температури та теплового потоку в калориметричній комірці за калібрування та за робочих вимірювань із різними можливими типами джерел енергії. Метою моделювання є не тільки оцінювання складової похибки, але й вибір таких параметрів конструкції приладу, які одночасно забезпечують необхідні значення похибки та інших параметрів, наприклад, сталої часу. Тому моделювання може проводитися за різних значень параметрів конструкції та застосованих матеріалів.

III. За результатами, отриманими на попередніх етапах, розраховують складову похибки, що виникає внаслідок просторової нерівномірності чутливості перетворювача та відмінностей у просторових розподілах температури та теплового потоку за різних варіантів досліджуваного процесу. Розрахунок може бути проведений різними методами, наприклад, за методом Монте-Карло або, якщо за результатами досліджень і моделювання можна оцінити чисельні значення дисперсії розкиду чутливості та розподілу теплового потоку на поверхні перетворювача, із застосуванням формули (3) розрахунку дисперсії відносної похибки.

Розраховують також інші значимі характеристики калориметра, наприклад, сталу часу для різних значень параметрів, які варіювалися під час моделювання.

IV. Вибирають такі значення параметрів, які задовольняють установленим вимогам до складової похибки вимірювання та до інших параметрів. Якщо за результатами обчислень неможливо обрати такі

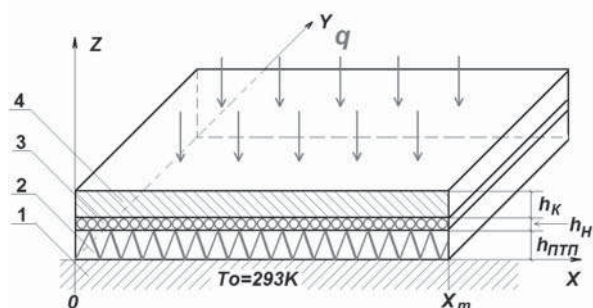


Рис.3. Модельна калориметрична структура (1 — термостатована основа; 2 — перетворювач теплового потоку; 3 — електричний нагрівник; 4 — стінка калориметричної комірки).

Fig.3. Model calorimetric structure (1 — thermostated base; 2 — heat flux converter; 3 — electric heater; 4 — calorimetric cell wall).

Таблиця 1. Значення теплофізичних параметрів шарів модельної структури

Table 1. The thermophysical parameters value of the model structure layers

Теплофізичні параметри	Перетворювач 2	Нагрівник 3	Стінка калориметричної комірки 4
Коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К)	0,5	1,0	120
Густина, кг/м ³	2600	3200	2770
Питома теплоємність C_p , Дж/(кг·К)	960	780	920

значення параметрів, що задовольняють усім вимогам, проводять аналіз причин цього та визначають шляхи подолання такої ситуації.

Розглянемо застосування цієї методики на прикладі розрахунку характеристик спрощеної модельної калориметричної структури (рис. 3).

На термостатованій основі 1, яка виконує функцію теплорозсіювального блоку калориметричної структури, розміщено плоский перетворювач теплового потоку 2. Над перетворювачем розміщено шар електронагрівника 3, за допомогою якого задається нормована потужність за калібрування. Над електричним нагрівником розміщено стінку калориметричної комірки 4 з дюралюмінію, на яку надходить вимірюваний тепловий потік з густиною q , яка може залежати від координат X та Y . Бокові поверхні цієї тришарової структури вважаємо адіабатичними.

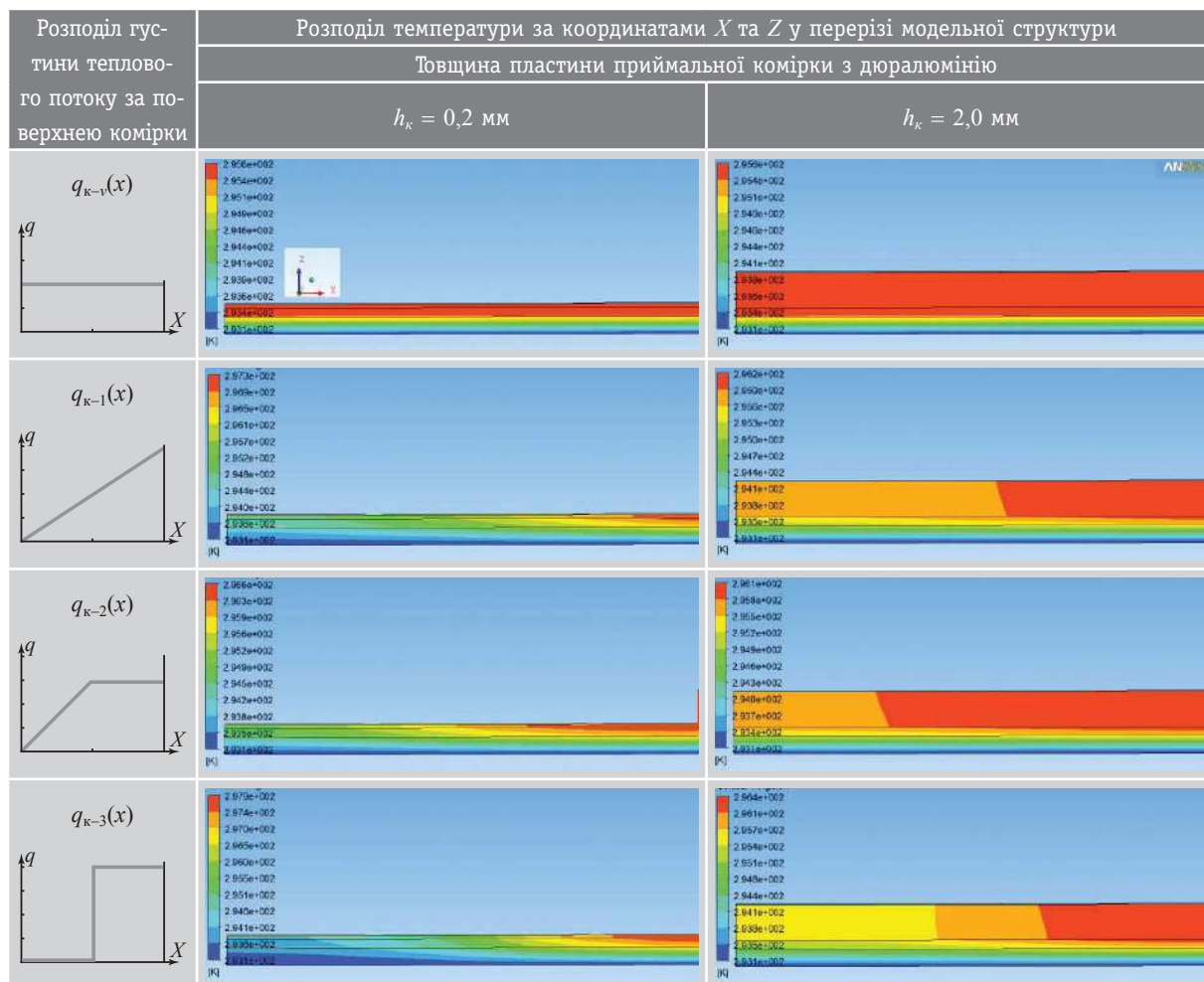
Така модельна калориметрична структура є дуже спрощеною, але може розглядатися як модель плоского приймача теплового випромінення, або як одна з двох граней моделі АЧТ у виді «клина», або як модель відкритої калориметричної комірки, тепловідлення в якій може залежати від координат.

Для моделювання розподілу теплових полів у калориметричній структурі встановлено такі розміри: у плані — (30×30) мм² ($X_m = Y_m = 0,03$ м); товщина шару перетворювача — 1,0 мм, товщина шару електричного нагрівника — 0,5 мм, товщина стінки калориметричної комірки з дюралюмінію 4 варіювалися з встановленням таких значень: 0,2; 0,5; 1,0; 2,0 мм.

Значення теплофізичних параметрів шарів модельної структури представлено у таблиці 1.

Під час моделювання розглядався стаціонарний тепловий режим, причому густина теплового потоку була змінювана за координатою X , але не залежала від координати Y . Розглянуто такі варіанти надходження енергії:

Таблиця 2. Результати моделювання розподілу температури у площині $X-Z$
 Table 2. The results of modeling the temperature distribution in the $X-Z$ plane



1. Рівномірне об'ємне тепловиділення у шарі електронагрівника, що відповідає режиму калібрування:

$$q_v = 2\,222\,222 \text{ Вт/м}^3.$$

2. Густина теплового потоку на поверхні шару 4 лінійно збільшується за координатою X :

$$q_{k-1} = 74074 \times X \text{ [Вт/м}^2\text{]}, (X \text{ — у метрах}).$$

3. Густина теплового потоку змінюється лінійно на половині поверхні шару 4, а на іншій половині є сталою:

$$q_{k-2} = 98667 \times X \text{ [Вт/м}^2\text{]}, 0 \leq X \leq 0,015 \text{ м};$$

$$q_{k-2} = 1480 \text{ [Вт/м}^2\text{]}, X > 0,015 \text{ м}.$$

4. Густина теплового потоку на поверхні шару 4 ступеневе змінюється за $X = 0,015$ м:

$$q_{k-3} = 0 \text{ [Вт/м}^2\text{]}, 0 \leq X \leq 0,015 \text{ м};$$

$$q_{k-3} = 2222 \text{ [Вт/м}^2\text{]}, X > 0,015 \text{ м}.$$

У всіх розглянутих варіантах загальна потужність, що надходить на модельну структуру, однакова і складає 1,0 Вт.

Моделювання розподілу теплових полів у калориметричній структурі виконано за допомогою

програмного пакету *ANSYS*. Результати моделювання розподілу температури у площині $X-Z$, для двох значень товщини стінки калориметричної комірки h_k — 0,2 та 2,0 мм, наведено у таблиці 2.

У процесі моделювання визначено також розподіл густини теплового потоку на поверхні перетворювача. Результати розрахунків у виді графіків представлено у таблиці 3.

Оцінювання розподілу просторової чутливості перетворювача проведено на основі аналізу експериментальних даних із визначення коефіцієнтів перетворення (величин, зворотних до чутливості) кількох партій перетворювачів теплового потоку у виді дисків та прямокутників із загальною площею, яка приблизно відповідає площі перетворювача модельної структури. За суворого дотримання технології виготовлення та використання для виготовлення партії перетворювачів однієї спіральної стрічки термоелементів, розкид значень коефіцієнта перетворення для декількох десятків перетворювачів не перевищує $\pm 10\%$ від середнього

Таблиця 3. Розподіл густини теплового потоку на поверхні перетворювача при різній товщині h_k і різних розподілах енергії, що надходить

Table 3. Distribution of heat flux density on the surface of the transducer at different thicknesses h_k and different distributions of incoming energy

Товщина h_k	Розподіл густини теплового потоку на поверхні перетворювача $q(x)$
$h_k = 0,2$ мм	
$h_k = 0,5$ мм	
$h_k = 1,0$ мм	
$h_k = 2,0$ мм	
0 — розподіл густини теплового потоку на поверхні перетворювача за калібрування $q_{k-1}(x)$; 1 — $q_{k-1}(x)$; 2 — $q_{k-2}(x)$; 3 — $q_{k-3}(x)$	

за середньоквадратичного (СКВ) значення 3 %. Для оцінювання розподілу просторової чутливості перетворювача необхідно визначити параметри розкиду характеристик для елементів поверхні, співрозмірних з товщиною перетворювача, тобто 1 мм за координатою X ; а оскільки за координатою Y значення

потужності, що надходить є незмінним, вважаємо, що у цьому напрямку довжина елемента поверхні дорівнює ширині перетворювача — 30 мм. Отже, вважаємо, що площа елемента поверхні складає 30 мм², що відповідає кількості елементів (ділянок) поверхні $N_d = 30$ для всього перетворювача. Виходячи з того, що СКВ суми значень випадкової величини менша СКВ випадкової величини у $\sqrt{N_d}$ разів, вважаємо, що СКВ чутливості ділянки площею 30 мм² складає 16,4 %. Таке значення СКВ приблизно відповідає рівномірному розподілу випадкового значення чутливості в діапазоні ± 30 % від середнього. Отже вважаємо, що розподіл випадкового значення чутливості елемента поверхні перетворювача, який має площу 30 мм², є рівномірним у межах від 70 до 130 % від середнього значення.

Розрахунок складової похибки, що виникає внаслідок просторової нерівномірності чутливості перетворювача та відмінностей у просторових розподілах температури та теплового потоку, проведено паралельно із застосуванням формули (3) та за методом Монте-Карло [12].

Розрахунки за методом Монте-Карло проводять, виходячи з таких співвідношень:

- у режимі калібрування:

$$E_{\text{вих-к}} = \frac{Q_k}{K_k} = \sum_{i=1}^{N_d} [q_{k-v}(X_i) \cdot \bar{S} \cdot \Psi_i], \quad i = 1 \dots N_d;$$

- у режимі вимірювання за j -го розподілу теплового потоку:

$$E_{\text{вих-j}} = \frac{Q_j}{K_k} = \sum_{i=1}^{N_d} [q_{k-j}(X_i) \cdot \bar{S} \cdot \Psi_i], \quad i = 1 \dots N_d, \\ j = 1, 2, 3;$$

- відносна похибка визначення Q_j для певного набору $Y_i, i = 1 \dots N_d$, тобто деякої реалізації U :

$$\delta Q_j(U) = \frac{Q_j - Q_k}{Q_k} =$$

$$= \frac{\sum_{i=1}^{N_d} [q_{k-j}(X_i) - q_{k-v}(X_i)] \cdot \Psi_i}{\sum_{i=1}^{N_d} [q_{k-v}(X_i)]}, \quad (4)$$

де $E_{\text{вих-к}}, E_{\text{вих-j}}$ — вихідний сигнал перетворювача в режимі калібрування та визначений за вимірювань за розподілу $j = 1, 2, 3$;

Q_k, Q_j — повна енергія в режимі калібрування та визначена за вимірювань за розподілу $j = 1, 2, 3$;

K_k — коефіцієнт перетворення, визначений у режимі калібрування;

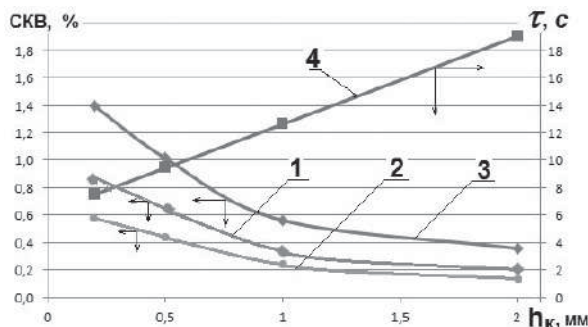


Рис.4. Графіки залежності СКВ складової похибки та сталої часу від товщини стінки комірки (1 — розподіл $q_{k-1}(X)$; 2 — розподіл $q_{k-2}(X)$; 3 — розподіл $q_{k-3}(X)$; 4 — стала часу τ)
Fig.4. Graphs of RMS component error and time constant dependence on the wall thickness of the cell (1 — distribution $q_{k-1}(X)$; 2 — distribution $q_{k-2}(X)$; 3 — distribution $q_{k-3}(X)$; 4 — time constant τ)

$q_{k-j}(X_i)$, $q_{k-j}(X_i)$ — густина теплового потоку на ділянці X_i у режимі калібрування та за розподілу $j = 1, 2, 3$;

\bar{S} — середня чутливість перетворювача;

Y_i — значення випадкової величини, рівномірно розподіленої у межах від 0,7 до 1,3. Набір Y_i за $i = 1 \dots N_d$ утворює реалізацію U .

За формулою (4) проводять розрахунки для значної кількості реалізацій, одночасно визначаючи дисперсію або СКВ похибки для всіх реалізацій. Адаптивний алгоритм методу Монте-Карло передбачає проведення розрахунків зі збільшенням кількості реалізацій до стабілізації отриманих значень СКВ у деяких межах.

Результати розрахунків двома методами (за формулами (3) та (4)) практично збігаються за використання для розрахунку за методом Монте-Карло не менше 200 реалізацій. Як і можна було очікувати, найменші значення СКВ похибки отримані за найбільшої із змодельованих товщин комірки — 2,0 мм. Але зі збільшенням товщини і теплоємності комірки підвищується стала часу приладу. Проведено оцінку сталої часу модельної структури шляхом розрахунку за формулою:

$$\tau = \left(R_{\text{ППП}} + R_{\text{Н}} + \frac{R_{\text{К}}}{2} \right) \times \left(C_{\text{К}} + C_{\text{Н}} + \frac{C_{\text{ППП}}}{2} \right), \quad (5)$$

де $R_{\text{ППП}}$, $R_{\text{Н}}$, $R_{\text{К}}$ — теплові опори перетворювача, нагрівника, комірки;

$C_{\text{ППП}}$, $C_{\text{Н}}$, $C_{\text{К}}$ — теплоємності перетворювача, нагрівника, комірки.

Отримані результати дозволяють вибрати необхідну товщину стінки комірки h_k залежно від заданих характеристик калориметричного приладу (рис. 4). Необхідно пам'ятати, що границі похибки або невизначеності вимірювань визначають як добуток знайденого значення СКВ на коефіцієнт охоплення, який для довірчої ймовірності $P = 0,95$ має значення $K_0 = 2$, а для $P = 0,99$ — значення $K_0 = 3$ [13, 14].

У випадку неможливості обрати за результатами обчислень значення параметрів, що задовольняють усі вимоги, визначають шляхи подолання такої ситуації, наприклад:

- удосконалення технології для зменшення нерівномірності чутливості;
- попередній відбір батареї термоелементів [15];
- удосконалення конструкції приладу;
- уведення сегментації чутливого елемента перетворювача та калібрувального нагрівника і застосування структурно-алгоритмічних методів корекції результатів вимірювання тощо.


ВИСНОВКИ

Запропоновано методику оцінювання складової похибки вимірювання теплового потоку, зумовленої нерівномірністю просторової чутливості перетворювача. Показано, що оцінка зазначеної складової похибки вимірювання може бути отримана на основі статистичних даних стосовно нерівномірності просторової чутливості перетворювача та відмінності розподілу теплових полів у процесах калібрування та вимірювань. Розглянуто приклад розрахунку на основі моделювання розподілу теплового поля.

Стаття підготовлена у рамках виконання теми «Створення та впровадження приладів для експрес-контролю коефіцієнта емісії поверхонь матеріалів та покриттів з використанням високочутливих сенсорів інфрачервоного випромінювання», договір № ТД.15/1.7.1.885 за цільовою програмою наукових досліджень НАН України «Напівпровідникові матеріали, технології і датчики для технічних систем діагностики, контролю та управління».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Васильченко Н.В., Борисов В.А., Кременчугский Л.С., Левин Г.Э. (1983). Измерение параметров приемников оптического излучения / под ред. Л.Н. Курбатова, Н.В. Васильченко. Москва: Радио и связь. (Vasilchenko N.V., Borisov V.A., Kremenchugsky L.S., Levin G.E. (1983). Measurement of parameters of optical radiation detectors / ed. L.N. Kurbatova, N.V. Vasilchenko. Moscow: Radio and communication). 320 с/р.
2. Сергунов А.А. (2009). Методы коррекции неравномерности чувствительности инфракрасных матричных приемников. Известия ВУЗов. Приборостроение. (Sergunov A.A. (2009). Methods for correcting the

- irregularity of the sensitivity of infrared matrix receivers. *Izvestiya VUZov. Instrumentation.*) т./vol. 52, № 8. С/Р. 38—42.
3. Соловьёв В.И., Анисимов И.Ю. (2005). Оценка качества выравнивания каналов тепловизионных приемников при использовании метода микросканирования. *Оптический журнал.* (Soloviev V.I., Anisimov I.Yu. (2005). Evaluation of the quality of channel alignment of thermal imaging receivers using the microscanning method. *Optical magazine.*) № 6. С. 47—50.
 4. Torres S.N., Hayat M.M. Kalman filtering for adaptive nonuniformity correction in infrared focal-plane arrays. *Journal of the Optical Society of America A.* 2003. Vol. 20, No. 3.
 5. Dekusha O., Vorobiov L., Dekusha L., Ivanov S., Kobzar S., Kovtun S. Heat Exchange Simulation Of The Method And Portable Device For Measuring The Emissivity. 2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). 22-24 April 2020. DOI: 10.1109/ELNANO50318.2020.9088837.
 6. Кальве Э., Прат А. (1963). Микрокалориметрия: Применение в физической химии и биологии / ред. Л.А. Николаев, К.П. Мищенко; пер. с франц. Москва: Издво иностранной литературы. (Calve E., Prat A. (1963). *Microcalorimetry: Application in Physical Chemistry and Biology* / ed. L.A. Nikolaev, K.P. Mishchenko; translation from french. Moscow: Foreign Literature Publishing House). 477 с/р.
 7. Polevoi V.I., Nazarenko L.A., Guzei V.M. Optimizing the electrical substitution procedure for a cavity radiometer having radiative and convective-radiative heat transfer. *Engineering Physics and Thermophysics.* Vol. 60. Issue 2. P. 255—261.
 8. Полевой В.И., Назаренко Л.А., Вершинина Л.П. (1991). Тепловой режим и методическая погрешность полостного радиометра для кусочно-однородной аппроксимации поглощения излучения внутренней стенкой. *Теплофизика высоких температур.* (Polevoy V.I., Nazarenko L.A., Vershinina L.P. (1991). Thermal regime and methodical error of a cavity radiometer for piecewise-uniform approximation of radiation absorption by the inner wall. *Thermal physics of high temperatures.*) Т./Vol. 29. Вып./Is 4. С./Р 788—797.
 9. Назаренко Л.А., Полевой В.И. (1988). Расчет температурного поля и погрешности абсолютного полостного приемника излучения с учетом локального характера теплоотдачи. *Теплофизика высоких температур.* (Nazarenko L.A., Polevoy V.I. (1988). Calculation of the temperature field and the error of an absolute cavity radiation detector taking into account the local nature of heat transfer. *Thermal physics of high temperatures.*) Т./Vol. 26. Вып./Is 5. С./Р 978—984.
 10. Грищенко Т.Г., Декуша Л.В., Воробьев Л.И., Бузова З.А., Декуша О.Л., Ковтун С.И. (2017). *Теплометрия: теория, метрология, практика. Книга 1: Методы и средства измерения теплового потока: монография.* К.: Институт технической теплофизики НАН Украины. (Gryshchenko T.G., Dekusha L.V., Vorobiov L.Y., Burova Z.A., Dekusha O.L., Kovtun S.I. (2017). *Thermal measurements: theory, metrology, practice. Book 1: Methods and means of measuring heat flux: monograph.* K.: Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine) 438 с./р.
 11. Корн Г., Корн Т. (1977). *Справочник по математике для научных работников и инженеров.* М.: Наука. (Korn G., Korn T. (1977). *A guide to mathematics for scientists and engineers.* M.: Science.) 832 с./р.
 12. Новиков В.В. (2008). Численные методы в вычислении неопределенности. Системы обработки информации. Харьков. (Novikov V.V. (2008). *Numerical methods in calculating uncertainty. Information processing systems.* Kharkiv). Вып./Is 4(71). С./Р. 126—128.
 13. Захаров И.П. (2013). Неопределенность измерений для чайников и ... начальников: учеб. пособ. Харьков. (Zakharov I.P. (2013). *Uncertainty of measurements for dummies and ... bosses: textbook.* Kharkov). 36 с./р.
 14. РМГ 43-2001 ГСИ. Применение «Руководства по выражению неопределенности измерений». (RMG 43-2001 GSI. Application of the «Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement»).
 15. Бузова З.А., Шмаров Е.В., Декуша Л.В., Воробьев Л.И., Шаповалов В.И. (2009). Установка для предварительного тестирования батареи термоэлементов преобразователей теплового потока. *Промышленная теплотехника.* (Burova Z.A., Shmarov E.V., Dekusha L.V., Vorobiov L.Y., Shapovalov V.I. (2009). Installation for preliminary testing of a battery of thermoelements of heat flux converters. *Industrial Heat Engineering.*) Т./Vol. 31, № 7. с./р. 105—108. 

Отримано / received: 06.10.2020.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. О.Г. Мазуренком (Україна).
Prof. O.G. Mazurenko, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.

DOI: 10.33955/2307-2180(5)2020.42-54

УДК 621.1.002.56

ПОДАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ КОНТРОЛЮ НЕМЕТРИЧНИМИ ШКАЛАМИ ПРОЦЕСІВ В ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЇ ВУГІЛЬНИХ ЕНЕРГОБЛОКІВ ТЕС

Presentation of Control Results By Non-Metric Scales of Processes In Energy Technology of Coal-Fired Power Units

В. І. Промоскаль, кандидат технічних наук, доцент,
В. К. Заруба, кандидат технічних наук, доцент,
О. М. Близниченко, кандидат технічних наук,
В. В. Будко, доктор філософських наук, професор,
Т. І. Бикова, старший викладач,
Українська інженерно-педагогічна академія, м. Харків,
e-mail: art-studio_diana_@ukr.net

V. I. Promoskal, candidate of technical sciences, docent,
V. K. Zaruba, candidate of technical sciences, docent,
O. M. Blyznychenko, candidate of technical sciences,
V. V. Budko, doctor of philosophy, professor,
T. I. Bykova, senior lecturer,
Ukrainian Engineering Pedagogics Academy, Kharkiv,
e-mail: art-studio_diana_@ukr.net

Наведено результати аналізу процесів на вугільних енергоблоках. Вони засвідчили, що на них використовуються об'єкти із якісними властивостями. Це дисперсні матеріали: вугільні дробленка та пил (результат подрібнення вугілля дробаркою та його помел млином), а також вогнищеві залишки (результат термічних перетворень негорючих домішок вугілля в процесі його факельного спалювання тощо).

Відносні чисельності (частоти) еквівалентних класів таких матеріалів є важливими техніко-економічними, режимно-технологічними та екологічними показниками енерговиробництва, як-от:

- * залишок на ситі $R_{90} = (7-10) \%$ — частість крупності вугільного пилу;
- * частоті шлаку та летючої золи, які визначаються за результатами прийнятно-здавальних випробувань котельної установки;
- * ефективність золоочищення димових газів, яка визначається за результатами вимірювань середніх масових витрат летючої золи;
- * шкала помелоздатності вугілля, яка характеризується коефіцієнтом помелоздатності;
- * скруглені частинки зоолошлакового матеріалу оцінені відповідної шкалою в балах.

Загалом тематика статтей щодо використання неметричних шкал цікава як для енерготехнологів, так і для метрологів. Ними уніфікується на більш загальному рівні напрям робіт з подальшого розвитку метрології, за яким використовуються шкали вимірювання як кількісних, так і якісних властивостей на протиставу діючому напрямку, що базується виключно на одиницях вимірювання, але лише кількісних властивостей.

The article is the second in a series of articles (Article 1 in the journal MP №3. 2017), which consider non-metric scales for measuring the quality properties of objects in the energy technology of coal-fired power units (to date they are not used, but not at the regular metrological level). The results of the analysis of processes of coal power units are given in the article. They have shown that blocks use objects with quality properties. These are dispersed materials: coal crusher and dust (the result of grinding coal with a crusher and grinding it with a mill), as well as focal residues (the result of thermal transformations of non-combustible coal impurities in the process of its flare combustion, etc.).

The relative numbers (frequencies) of equivalent classes of such materials are important technical and economic, regime-technological and environmental indicators of energy production, such as:

- * the residue on the sieve $R_{90} = (7-10) \%$ — the frequency of the size of coal dust;
- * frequencies of slag and fly ash, which are determined by the results of acceptance tests of the boiler installation;
- * flue gas ash cleaning efficiency, which is determined by measuring the average mass flow of fly ash;
- * scale of grinding capacity of coal, which is characterized by the coefficient of grinding capacity;
- * rounded particles of zoological material are evaluated by the appropriate scale in points.

In general, the topics of articles on the use of non-metric scales are interesting for both energy technologists and metrologists. They unify at a more general level the direction of work on the further development of metrology, which uses scales for measuring both quantitative and qualitative properties as opposed to the current direction, based solely on units of measurement, but only quantitative properties.

Ключові слова: шкали вимірювання (метричні, неметричні); властивість об'єкта (якісна, кількісна); класи еквівалентності вугільних дробленки і пилу, летючої золи, відпрацьованої пари; потужності парової турбіни; частість і проба (точкова, відібрана, скорочена, об'єднана).

Keywords: measurement scales (metric, non-metric), property of an object (qualitative, quantitative); equivalence classes of coal grinders and dust, fly ash, exhaust steam; power of a steam turbine; frequency and sample (point, selected, abbreviated, united).

Рекомендаціями з міжнародної стандартизації РМГ83-2007 [1] єдність вимірювань визначено як їх стан, за яким результати виражені у законних

одиницях вимірювань (величин) або шкалах вимірювань і оцінені невизначеність або межі похибок результатів вимірювань. Таке визначення поняття

єдності вимірювань поширюється на шкали усіх типів, включаючи неметричні шкали назв та порядку.

У [2] наголошується, що в шкалах назв, для яких відсутні інструментальні засоби визначення (віднесення до того чи іншого класу еквівалентності) об'єктів з вимірюваною якісною властивістю, найбільш адекватним є результат вимірювання, з яким згодна «конституційна більшість» експертів. Це свідчить стосовно того, що в метрології подання *результатів вимірювання за неметричними шкалами* перебуває в стадії обмірковування. Недарма в тій же роботі автори оговорюють, що вирішальне значення має правильний вибір градації або класів еквівалентності шкали. Вони мають надійно розрізняватися безпосередньо «нормальним спостерігачем». У протилежному разі шкала втрачає значення через неприйнятну невизначеність результату вимірювання або неможливість однозначного віднесення об'єкта до відповідного класу. Саме тому в Рекомендаціях [1] результат вимірювання за шкалою назв виражається еквівалентністю конкретного виявлення властивості точки чи класу еквівалентності відповідної шкали.

Як показано у [3], об'єктами енерготехнологій вугільних енергоблоків є основне та допоміжне обладнання, матеріали, речовини та процеси, за допомогою яких реалізується термодинамічний цикл Ренкіна перетворення хімічної енергії органічного палива в механічну та електричну енергію.

Наприклад, основним обладнанням енергоблоку є котельна установка (КУ) та турбінна установка (ТУ). Шкалу назв (енергоблоків) утворюють її два класи еквівалентності — результат класифікації енергоблоків за альтернативною якісною ознакою (одна чи дві КУ в складі енергоблоку): клас моноблоків (одна КУ в блоці) та клас дубль-блоків (дві КУ в блоці). Такі об'єкти за своїми зовнішніми органолептичними властивостями є добре розрізнявальними та розпізнавальними. Віднесення енергоблоку до того чи іншого класу цілком адекватне, оскільки якісна властивість об'єкта виявляється візуально людиною, яка володіє елементарними знаннями енерготехнологій вугільних енергоблоків. Числовою характеристикою енергоблоків кожного класу є їх чисельність як визначеність у межах певної якості (за Гегелем) [4], що визначається лічбою. За результатами лічби об'єктів складається балансове рівняння енергоблоків:

$$\text{в абсолютній формі } A = A_T + A_H, \quad (1)$$

$$\text{у відносній формі } 1 = a_T + a_H,$$

де $A, A_T, A_H, a_T = A_T/A, a_H = A_H/A$ — загальна чисельність енергоблоків та їх чисельність у класах еквівалентності з антонімічними назвами «так» — мо-

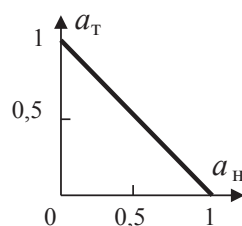


Рис. 1. Графічне подання шкали енергоблоків
Fig. 1. Graphical representation of the scale of power units

ноблок і «ні» — дубль-блок в абсолютній та відносній формах. У психології [5] не обґрунтовано a_T, a_H , вони названі «частотами зустрічаємості» (рос.). Така назва, певно, запозичена із російського частотного словника [6], в якому наводяться числові характеристики уживаності слів (словосполук, словоформ) якої-небудь мови (мови письменника, мови виробництва тощо). Натомість тлумачний словник з метрології [7] визначає частоту як фізичну величину, яка дорівнює числу ідентичних подій за одиницю часу (s^{-1}); тобто метрологічне поняття частоти в метрології ніякого відношення до частоти російського частотного словника не має (втім і до теорії ймовірностей). Разом із тим у тому ж словнику величину, яка дорівнює відношенню числа спостережень певної події до загального числа спостережених подій, названо *частістю* (від прислівника «часто» — вельми вдала назва саме для якісних характеристик певної події). Об'єднавши в антонімічну пару «часто-рідко», отримуємо назви еквівалентних класів неметричних шкал: клас частих та клас рідких подій¹.

Графічне подання шкали назв (енергоблоків) представлено на рис. 1. Числові подання результатів оцінок якісних властивостей визначаються лічбою об'єктів кожного класу (A_H і A_T). Оскільки лічба добре розпізнавальних і розрізнявальних енергоблоків є безпомилковою процедурою, а віднесення об'єктів до відповідного класу еквівалентності проводиться з дотриманням їх ідентичності [8], то числові значення частостей a_T та a_H подаються з нульовою невизначеністю (безпомилково). Порушення ідентичності під час класифікації об'єктів виникає в процесі помилкового віднесення, наприклад, моноблоку до класу дубль-блоку. В такому випадку графічне подання шкали не змінюється, змінюється лише числове подання результату: частість класу дубль-блоку зростає, а класу моноблоку зменшується або навпаки, оскільки $a_T + a_H = 1$.

¹ Далі використовується термін «частість» як назва відносних чисельностей еквівалентних класів шкал вимірювання.

Таблиця 1. Неметричні шкали в технологічних трактах вугільного енергоблоку[3]

Table 1. Nonmetric scales in the technological paths of the coal power unit

№	Технологічний тракт	Назва шкали	Антонімічні назви еквівалентних класів
1.	Тракт підготовки вугілля	Шкала вугільної дробленки Шкала вугільного пилу	Груба-тонка вугільна дробленка Грубий-тонкий вугільний пил
2.	Тракт видалення вогнищевих залишків (золи спаленого палива ЗСП)	Шкала ЗСП Шкала летючої золи (ЛЗ) Шкала скругленості ЗШМ Шкала температури плавкості золи	Донна зола (шлак) — зола вносу (ЛЗ) Зловлені-незловлені частинки ЛЗ Нескруглені-скруглені частинки ЗШМ Легкоплавка-тугоплавка зола
3.	Тракт робочого тіла (теплоти спаленого палива ТСП)	Шкала ТСП Шкала транспортованої ТСП Шкала перетвореної ТСП Шкала теплоти відпрацьованої пари	Корисна-збиткова ТСП Корисна-збиткова транспортована ТСП Корисна-збиткова перетворена ТСП Корисна-збиткова теплота конденсації

У [3] наведено інші класифікації (шкали назв) основного і допоміжного обладнання вугільних енергоблоків, інформація стосовно яких використовується під час проектування, документування та в інших випадках, не пов'язаних з експлуатацією енергоблоків. Але найбільш важливими для вугільних енерготехнологій є неметричні шкали, без яких неможливо оцінити режимно-технологічні, техніко-економічні чи екологічні показники роботи енергоблоків. Такі шкали у [3] подаються у відповідності з технологічними трактами об'єктів енерготехнологій. Назви шкал та їх класів еквівалентності наведено у табл. 1.

Як видно із табл. 1, в технологічних трактах підготовки вугілля до спалювання та видалення із топки утвореної золи об'єктами енерготехнології є дискретні (сипучі) матеріали (куски вугілля, частинки вугільного пилу, летючої золи, шлаку та золошлакового матеріалу (ЗШМ)). Це потоки злічених неупорядкованих за розміром множин кусків, частинок. Використання таких матеріалів зумовлено організацією факельного (камерного) спалювання вугілля — найбільш поширеного методу спалювання вугілля у великій теплоенергетиці.

Факельне спалювання вугілля уможливує механізацію, технологічний контроль та автоматизацію процесу спалювання, але зумовлює наявність складної системи підготовки вугілля до спалювання. На жаль, такі розмірні характеристики дискретних та сипких матеріалів, як грубість/тонкість кусків/частинок вугілля/пилу, які безпосередньо впливають на економічну ефективність процесів подрібнення, помелу та спалювання вугілля, не вимірюються в темпі виробництва метричними шкалами (не виділені фізичні величини як величини, взаємопов'язані формулами фізики, не визначені одиниці їх виміру) [2]. Тому для таких випадків застосовуються періодичні лабораторні вимірювання, зокрема, і за неметричними шкалами.

Неметричні шкали в цих трактах використовуються для оптимізації режимів роботи дробарок, вугільних млинів, котельних установок та золоуловлювачів (ЗУ) за трьома критеріями: *мінімум* витрат електроенергії відносно власних потреб на привід дробарки та вугільного млина — найбільшого споживача електроенергії енергоблоку, а також *мінімум* частоти еквівалентного класу незловної ЛЗ як викиду її до атмосфери. Оптимізація роботи вугільного млина ускладнюється у разі перевищення частоти еквівалентного класу грубого помелу вугілля, що зумовлює зростання його механічного *недопалу*.

Специфіка застосування неметричних шкал у названих трактах полягає в тому, що вимірювання та контроль характеристик дискретних (сипких) матеріалів проводиться за лабораторних умов за результатами аналізу таких властивостей у відібраних пробах матеріалу. Тому відбір проб вугілля, вугільного пилу, летючої золи, шлаку та ЗШМ мають проводитися за визначеними правилами, виконання яких забезпечує представницькість матеріалу проби, коли властивості матеріалу, із якого відібрано пробу, і матеріалу відібраної проби мають бути однаковими. Це настільки важлива вимога, що її невиконання робить неприйнятним результат навіть бездоганно проведеного аналізу характеристик непередставницької проби матеріалу, тобто неправильно відібрана проба матеріалу знецінює результат його аналізу.

Операції відбору проби вугілля базуються на суворому дотриманні принципу випадковості — основного закону статистичної вибірки: забезпеченості попадання до відібраної проби будь-якої частки вугілля за умов нездатності до виборчої здібності прийомів і механізмів відбору проб. Теоретичною основою відбору проб є математична статистика, згідно з якою будь-яка маса чи партія вугілля розглядається як генеральна сукупність, що складається із окремих

її одиниць (кусків чи порцій) з різними значеннями якісних властивостей (показників). При цьому допускається, що розподіл значень таких показників за всією сукупністю одиниць має випадковий характер, а точність методу вибірки із сукупності та її похибка визначаються випадковими похибками, які розподіляються у відповідності зі законом нормального розподілу. Це дозволяє встановити залежність між значенням максимальної похибки відбору проби вугілля та ймовірністю її з'явлення у виді [9]:

$$\Delta = t \left(\frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right), \quad (2)$$

де n — число порцій (точкових проб), тобто кількість невеликої маси вугілля чи шлаку, відібраної із одного місця однократним рухом пристрою — відбирального елемента механічного відбірника під час механічного відбору, чи совка, ковша, черпака, лопати в процесі ручного відбору. Із практичних міркувань міжнародним стандартам ISO 1952 — 72(A) [10] рекомендується найбільш оптимальний варіант числа порцій $n = 40$. Він зумовлюється виникаючими похибками в процесі підготовки (ділення чи скорочення) проби, які негативно впливають на підвищення точності відбору в разі зростання маси відібраної проби. З цієї причини державними стандартами рекомендується кількість порцій у скороченій пробі не менше $n = 32$. Саме такою кількістю порцій забезпечується представницькість відібраної проби. Методи відбору та підготовки проб вугілля для лабораторних випробувань регламентовані стандартом ДСТУ 4096-2002 [11], ситовий метод визначення гранулометричного складу вугілля проводиться згідно зі стандартом ДСТУ 4082-2002 [12];

σ — неоднорідність вугілля, що визначається шляхом відбору визначеної кількості ($n = 50$ — 60) порцій з подальшим розрахунком середнього арифметичного (математичного очікування \bar{x}) та оцінку середнього квадратичного відхилення від нього якісного показника в i -й порції (пробі) x_i у виді:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}; \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}}; \quad (3)$$

$t = (x_i - \bar{x}) / \sigma$ — нормоване відхилення (коефіцієнт надійності), яким виражається довірча ймовірність максимальної похибки відібраної проби (P) за таблицею функцій Лапласа (інтеграл імовірності). Нижче надано значення ймовірностей і відповідних їм коефіцієнтів t :

t	1	2	3	4
P	0,683	0,954	0,997	0,999

Рис. 2 ілюструє залежність максимальної похибки відбору проб вугілля (Δ) від числа відповідних порцій (коли $t = 2$, а $P = 0,95$). Із нього вид-

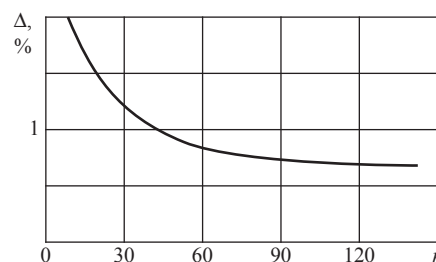


Рис. 2. Залежність похибок відбору проби вугілля від числа відібраних порцій n (точкових проб)
Fig. 2. Dependence of coal sampling errors on the number of selected portions n (spot samples)

но, що зростання числа порцій, більших за $n > 50$, ускладнює процес відбору проб, але майже не впливає на похибку результату.

У відповідності з правилами технічної експлуатації ТЕС вугілля, що потрапляє до бункерів котельної установки, не повинно мати кусків розміром, більшим за 25 мм. Тому воно подрібнюється у 2 стадії, якщо куски крупні (перша ступінь грубого дроблення до розмірів дробленки ≤ 250 мм, а друга ступінь тонкого дроблення до розміру дробленки ≤ 25 мм). На сучасних вугільних енергоблоках для відбору проб вугільної дробленки вугілля використовуються механічні пробовідбірники з відбиральним елементом ковшового типу ВТІ. Вони розміщені у вузлах пересипки вугілля із похилого на горизонтальний конвеєр (падаючий потік) кожної нитки паливоподачі. За таких умов реалізується найбільша представницькість відібраної проби вугілля [9]. Відібрані ними одиночні порції потрапляють до бункера первинної проби вугілля, яка після підготовки використовується для аналізу з визначенням необхідних показників вугілля (зольності, вологості, теплоти згоряння). Перед бункером первинної проби відбираються одиночні порції для випробування пробовідбірника, а також для контролю ситовим методом аналізу крупності дробленки.

У тракці підготовки вугілля використовуються дві неметричні шкали назв, які реалізуються ситовим аналізом дробленки вугілля та вугільного пилу. Обидві шкали визначаються балансовим рівнянням чисельності еквівалентних класів дробленки/пилу — результатів просіювання:

$$\begin{aligned} &\text{в абсолютній формі } M_n = M_R + M_D, \\ &\text{у відносній формі } 1 = R + D, \end{aligned} \quad (4)$$

де M_n — маса проби дробленки/вугільного пилу, відібраної для просіювання:

M_R, R, M_D, D — маси проби залишку на ситі (грубій фракції) та в проході через сито (тонкій фракції) дробленки/вугільного пилу в абсолютній та відносній формах (у [13] названі «масовими частостями»).

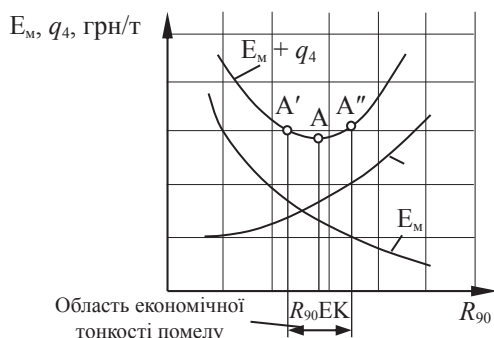


Рис. 3. Визначення оптимальної тонкості помелу
Fig. 3. Determination of the optimal fineness of grinding

На основі досвіду роботи дробильних установок рекомендуються такі визначення еквівалентних класів неметричної шкали дробленки вугілля: залишки просіювання проб дробленки вугілля на двох ситах з розмірами чарунків (5 x 5) мм та (10 x 10) мм містяться на рівні $R_5 = 20\%$ та $R_{10} = 5\%$ [14]. Похибки їх визначення складають 2,7 та 0,8 % відповідно [9].

Тонкість помелу вугільного пилу грає важливу роль в економіці пилоприготування. У разі стоншення помелу (зменшення залишку на ситі R_{90}) зростають витрати на помел та ремонт обладнання (дробарок, млинів) E_m , але знижуються витрати на механічний недопал q_4 у процесі факельного спалювання вугілля. Як видно із рис. 3, оптимальна тонкість пилу R_{90}^{opt} відповідає мінімуму сумарних річних витрат ($E_m + q_4$) у грошовому еквіваленті (грн). Економічна область тонкості помелу вугілля встановлюється за результатами випробувань обладнання разом з КУ та системою пилоприготування [14]. Окрім того, важливим фактором для вибору тонкості помелу вугілля є реакційна здатність вугілля, яка характеризується, в основному, виходом його летких частинок та режимно-технологічними показниками факельного спалювання. Рекомендована тонкість пилу антрациту АШ Донбасу визначається залишком на ситі з чарунками 90 мкм і становить $R_{90} = 7\text{—}10\%$ [14], похибка його визначення 1,8 % [9].

Гранулометричний (фракційний) склад вугільного пилу вможливує побудову зернових характеристик пилу — залежностей його повних залишків на ситах з розмірами чарунків та визначення їх аналітичного виду. Останні використовуються для переведення результатів розсіву пилу із одних сит на інші.

Разом із тим фракційний склад вугільного пилу дозволяє оцінювати механічну міцність вугілля — важливу характеристику для розрахунку кулькових млинів. У результаті руйнування матеріалу в процесі помелу створюються нові вільні поверхні частинок матеріалу. Енергія, витрачена на помел ву-

гілья, пропорційна поверхні утворених частинок пилу і обернено пропорційна їх розмірам (закон Ретінгера) [14]. Точне визначення площі поверхні утворених частинок є трудною і тривалою задачею. Істинна загальна величина поверхні частинок пилу не піддається прямому вимірюванню. Тому можливі лише відносні вимірювання методами, результати вимірювання яких залежать від площі поверхні частинок пилу, тобто еквівалентні їй. Широко поширено два способи вимірювання площі поверхні частинок пилу (спосіб адсорбції газу та спосіб газопроникності проби пилу). За нормативом VDI 2013 [13] загальна поверхня пилу складається із зовнішньої й внутрішньої поверхонь окремих частинок. Зовнішня поверхня визначається геометричною формою частинок, а внутрішня — поверхнею їх шпар. Це може стати основою неметричної шкали поверхні вугільного пилу у виді балансового рівняння:

$$\begin{aligned} \text{в абсолютній формі } \Pi &= \Pi_3 + \Pi_B, \\ \text{у відносній формі } 1 &= a_3 + a_B, \end{aligned} \quad (5)$$

де Π_3 , a_3 та Π_B , a_B — зовнішня та внутрішня поверхні пилу в абсолютній та відносній формах. Але через складності реалізації шкали на такій основі оголена поверхня частинок вугільного пилу оцінюється за результатами його ситового аналізу, зокрема, за повним залишком матеріалу на ситі R_{90} . Останній, після розсіву матеріалу через комплект із 5 сит з такими, що постійно убувають, розмірами чарунків 200, 140, 125, 90, 71 мкм, визначається як:

$$R_{90} = F_{200} + F_{140} + F_{125} + F_{90}, \quad (6)$$

де $\sum F_i$ — сума надграткових фракційних залишків на ситах із заданими розмірами чарунків.

Твердість і опірність здрибнювання вугілля характеризується коефіцієнтом помелоздатності, який практично не залежить від способу помелу. У розрахунках пилопідготовчих установок він є основною характеристикою вугілля, за допомогою якої уможливується оцінювання продуктивності прийнятого типорозміру млинів за питомою витратою електроенергії на помел вугілля. Він визначається як відношення питомої витрати електроенергії на помел еталонного вугілля E_e , кВт/год, до питомої витрати енергії на помел випробовуваного вугілля E_e , кВт/год. При цьому обидва сорти вугілля розмелюються в лабораторній стандартній установці ВТІ (ГОСТ 15489.1-93), що спричинило коефіцієнт помелоздатності назвати лабораторним і відносним, який позначається та визначається за такою залежністю [9]:

$$K_{\text{лв}} = \frac{E_e}{E_B} \approx \frac{R_{90e}}{R_{90B}} = 1,96 \left(\ln \frac{100}{R_{90}} \right)^{2/3}. \quad (7)$$

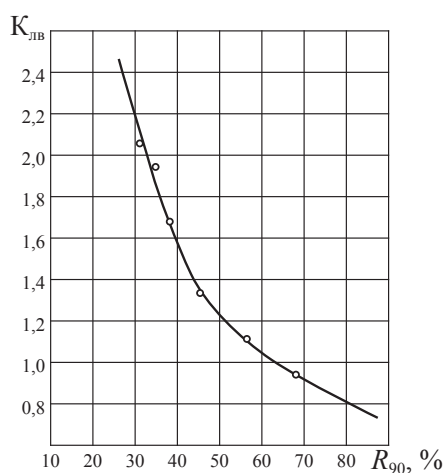


Рис. 4. Тарувальний графік визначення $K_{лв}$
 Fig. 4. Calibration of graphic arts of determination $K_{лв}$

За еталонне паливо прийнято антрацит АШ, для якого за уточненими даними $K_{лв} = 0,95$.

Отже, за ідеальної умови, коли відношення однакової тонкості помелу пилу дорівнює відношенню однакових оголених поверхонь частинок пилу, отримуємо умовну абсолютну неметричну шкалу. За такою шкалою результат вимірювання коефіцієнта $K_{лв}$ визначається за формулою (7) і свідчить, у скільки разів за інших рівних умов продуктивність млина на конкретному вугіллі більша ніж на еталонному. Але точніше $K_{лв}$ отримується за графіком (рис. 4), побудованим за результатами тарування установки ВТІ за допомогою набору із 6 стандартних зразків вугілля з відомими значеннями $K_{лв}$. Як видно із графіка, умовна абсолютна неметрична шкала обмежена діапазоном $K_{лв} = (0,8—2,4)$.

Допустимі розбіжності результатів двох паралельних визначень $K_{лв}$ із однієї проби вугілля не має перевищувати 4 % їх середнього значення. У протилежному випадку проводиться третє визначення коефіцієнта, і за результат приймається середнє арифметичне двох найбільш близьких визначень.

За точкову пробу шлаку прийнято лопату шлаку. На сучасних крупних вугільних енергоблоках застосовується методика відбору проби шлаку під час випробувань, яка зводиться до такого [15]: через кожні (25—30) хвилин прикривається приймальний лоток каналів гідрозолошлаковидалення. У результаті шлак протягом (1—2) хвилин скидається на підлогу золотого приміщення. Потім із нього відбираються (5—10) лопат із розрахунку на кожен шлакоприймальну ванну. Маса об'єднаної проби повинна бути не меншою від 200 кг.

Приймально-здавальними випробуваннями КУ передбачається безпосереднє зважування кількості вогнищевих залишків, зокрема, маси шлаку —

складової неметричної шкали «Зола спаленого палива» (ЗСП):

$$\text{в абсолютній формі } M_{зсп} = \frac{BA^r}{100} = M_{шл} + M_{лз} \quad (8)$$

$$\text{у відносній формі } 1 = a_{шл} + a_{лз},$$

де $M_{зсп}$ і B, A^r — маса ЗСП і масова витрата палива та його зольність, %;

$M_{шл}, a_{шл}, M_{лз}, a_{лз}$ — масова витрата донної золи (шлаку) та золи виносу (ЛЗ) в абсолютній та відносній формах [15].

Тривалість випробувань з обліком вогнищевих залишків складає 72 години з підтриманням номінальної паропроductивності $D_{ном}$ КУ (не нижче від $0,85 D_{ном}$). Заздалегідь КУ має безперервно працювати не менше 72 годин та характеризуватися нормальним топковим режимом задля того, щоб запобігти штучному зростанню чи погіршенню виходу шлаку. Шлак, вивантажений на виділеній ділянці підлоги золотого приміщення, перевантажують у вагон чи на вантажну машину і перевозять для зважування на вагонних чи автомобільних вагах. Масу шлаку визначають за різницею мас завантаженого і порожнього вагонів. Похибка визначення $M_{шл}$ не має виходити за $\pm 1\%$ [15].

Зважаючи на трудомісткість і тривалість робіт з вимірювань мас вогнищевих залишків сучасних енергоблоків, регламентовано метод розрахунку невідомої маси одного члена рівняння шкали (8) через визначені маси інших членів. У практиці ряду зарубіжних держав-членів ISO прийняття рішень щодо обов'язкового визначення кожної складової вогнищевих залишків зумовлюється угодою. Разом із тим також допускається визначення лише одного із компонентів золошлаковидалення за результатами визначення інших компонентів [15].

Отже, отримуються масові частоти класів еквівалентності шкали ЗСП: $a_{шл} = 0,8, a_{лз} = 0,2$, які є проектними (паспортними) технологічними характеристиками факельного спалювання вугілля в топковій камері певної КУ.

Відбір проб тонко розмеленого вугілля після млина чи золи, яка видаляється із топкової камери, здійснюється або із рухомого шару (вугільного пилу), або із аеропотоку (вугільного пилу, летючої золи) з обов'язковим забезпеченням представницькості відбору відібраних проб [15]. Вугільний пил краще відбирається із шару, оскільки через нерівномірності розподілу пилу в пилопроводах проби із аеропотоку менш представницькі. Однак за умов ТЕС з міркувань техніки безпеки віддається перевага відбору пилу із аеропотоку.

Відбір проб вугільного пилу чи летючої золи є складною методичною задачею. Адже суміш газу

з твердими частинками дуже нестійка, а самі частинки розподіляються у газовому потоці дуже нерівномірно як за розміром, так і за масою. Це суттєво ускладнює відбір представницьких проб для визначення якісних і кількісних характеристик суспендованих частинок.

Процес відбору проби вугільного пилу чи летючої золи із аеропотоку організується шляхом відгалуження невеличкого об'єму аеропотоку за допомогою зануреного в нього пробовідбірника (зонда у виді трубки визначеної форми та розміру). Стінка зонда на вході в його отвір має бути достатньо тонкою, щоби можна було знехтувати осіданнями частинок пилу на торці зонда, а його вхідний отвір завжди установлюється назустріч аеропотоку. В такий спосіб виготовлений та встановлений в аеропотоці зонд виконує роль вимірювального масштабного перетворювача об'ємної витрати відібраної проби газу, що зменшує її об'єм порівняно з об'ємною витратою аеропотоку за умов ТЕС у сотні — тисячі разів.

Ознакою представницькості відібраної проби суспендованих частинок вугільного пилу чи золи є ідентичність їх усереднених масових концентрацій (C) і дисперсних (гранулометричних) складів у газоході відбору проби та в аеропотоці, з якого проба відбирається. Аналітично це виражається рівнянням [16]:

$$C = m/fw_b = M/Fw_n, \quad (9)$$

де M , t , w_n , w_b — середня масова витрата вугільного пилу (летючої золи) та швидкість аеропотоку в поперечному перетині газоходу та зонда відповідно;

F , f — площі поперечного перетину газоходу та зонда відповідно.

Дотримання умови представницькості відібраної проби спрощується у разі, коли $w_b = w_n$ (ізокінетичного відбору проби). У такому випадку умова представницькості проби призводиться до виду:

$$m/f = M/F. \quad (10)$$

У разі, коли $w_b \neq w_n$ аеропотік перед зондом деформується і, внаслідок виникаючих енергійних сил, змінюється концентрація суспендованих частинок у відібраній пробі через її збагачення крупними (коли $w_b < w_n$) чи дрібними (коли $w_b > w_n$) частинками.

У процесі випробування золоуловлювачів (ЗУ) переважно використовуються ізокінетичні пилозбірні трубки (зонди) нульового типу [15]. У них ізокінетичний відбір проб забезпечується шляхом підтримання нульової різниці статичних напорів у потоці газу в газоході (у точці установки зонда) і усередині зонда шляхом регулювання витрати відібраної проби газу. Конструкцією зондів передбачається

внутрішня фільтрація через рукавний фільтр відібраної проби запиленого газу. Вимірюваною різницею мас фільтра після і до фільтрації визначається маса ЛЗ в об'єднаній відібраній пробі, яка складається із суми мас точкових проб $\sum_i^n m_i$, де n — число

i -тих елементарних рівновеликих площадок, на які поділено площу тарированого поперечного перерізу газоходу. Як показано у [16], число n залежить від заданої величини похибки відбору проби та вимірювання масової витрати ЛЗ, що видаляється до атмосфери. Похибка на рівні (4—6) % досягається шляхом поділу поперечного перерізу газоходу площею 2 м^2 на 20 елементарних площин; 4 м^2 — на 40; 8 м^2 — на 80 і т.д. елементарних площин.

Отже, за умов ізокінетичності відібраних точкових проб масою m_i середня масова витрата летючої золи перед ЗУ $M_{лз}$ та незловленої золи M_n після ЗУ у відповідності з (10) визначається як

$$M_{лз} = \sum_i^n m_i \frac{F_{zy}}{nt'f}, \quad (11)$$

$$M_n = \sum_i^n m_i \frac{F'_{zy}}{nt'f'}, \quad (12)$$

де F_{zy} та F'_{zy} — площі поперечних перерізів газоходу перед та після ЗУ;

t та t' — тривалості часу відбору точкових проб всередині кожної елементарної площадки поперечного перерізу газоходу перед та після ЗУ.

Вимірювані за формулами (11, 12) середні витрати летючої золи перед та після ЗУ входять до складу базового рівняння неметричної шкали летючої золи: в абсолютній формі $M_{лз} = M_3 + M_n$; (13)

у відносній формі $l = \eta_{zy} + \varepsilon_{zy}$

та уможливають визначити таку важливу екологічну характеристику енергоблока, як ефективність золоочищення його димових газів. Вона із (13) визначається як

$$\eta_{zy} = M_3/M_{лз} \quad (14)$$

і за проектними даними перебуває на рівні $\eta_{zy} = 0,95$. Після модернізації електрофільтра енергоблока Зміївської ТЕС значення цієї характеристики досягло сучасного рівня, що відповідає екологічним вимогам: $\eta_{zy} = 0,993$. Похибка її вимірювання залежить від похибок відбору проб та вимірювання масових витрат M_3 та $M_{лз}$; значення таких похибок на рівні (5—30) % зумовлюють абсолютну похибку вимірювання $\Delta\eta_{zy} = (0,001—0,006)$ відповідно [16].

Неметричною шкалою, якою завершується технологічний контроль золошлакових матеріалів (ЗШМ), є шкала скругленості їх частинок. Результати такого контролю використовуються для планування

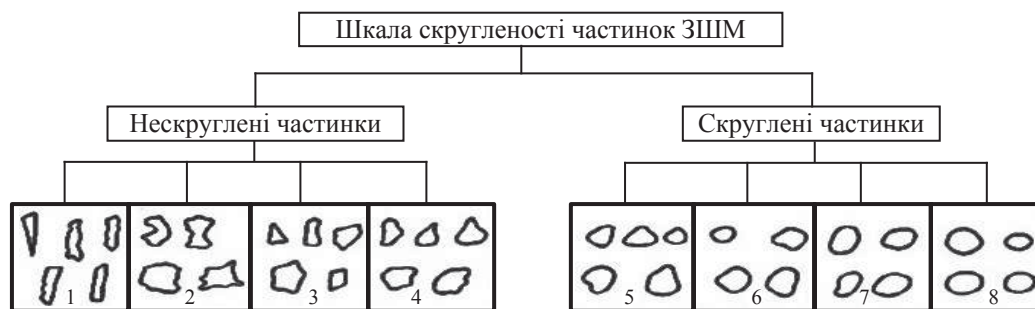


Рис.5 Візуальна шкала скругленості частинок ЗШМ

1 — скибковидні частинки зі рваними краями (відношення довжини до ширини більше трьох); 2 — цілком нескруглені частинки з виступаючими гранями та кавернами; 3 — нескруглені частинки з гострими ребрами; 4 — нескруглені частинки зі згладженими ребрами; 5 — скруглені частинки зі згладженими ребрами; 6 — добре скруглені частинки; 7 — ідеально скруглені частинки з гладкою поверхнею; 8 — кулясті частинки.

Fig. 5. Visual scale of roundness of particles of ash-slag materials

капітальних ремонтів з урахуванням прогнозу стирання каналів та трубопроводів, якими ЗШМ транспортується до золошлаковідвалу. Окрім того, така інформація є важливою для використання ЗШМ в інших галузях.

На рис. 5 наведено 8-бальну шкалу скругленості частинок ЗШМ, яка включає їх класифікацію за неметричною шкалою назв (еквівалентні класи нескруглених і скруглених частинок) та за неметричною шкалою еквівалентності й порядку (кожний еквівалентний клас упорядковує властивість за чотирма ступенями зростання скругленості частинок) [17].

Оцінка скругленості частинок золи і шлаку проводиться візуально шляхом порівняння зовнішніх форм частинок відібраної проби ЗШМ з формами частинок стандартних зразків матеріалу (золи і шлаку) за допомогою мікроскопічного аналізу.

Такий аналіз уможливорює визначити кількість частинок ЗШМ, їх форми і характеристики поверхонь. Для дослідження матеріалу під мікроскопом із вибраної проби готується препарат масою, меншою від 1 мг. Така незначна маса проби не завжди може вважатися представницькою. У відповідності зі статистичними даними число вимірюваних частинок у препараті має бути не меншим від (300—500) [13]. Разом із тим у [17] визначається, що в 1 г зерен золи і шлаку за середньої густини $2,2 \text{ г/см}^3$, середня крупність яких дорівнює відповідно 20 і 200 мкм, міститься декілька мільйонів частинок золи і декілька десятків тисяч частинок шлаку. Отже, виготовлений із відібраної проби ЗШМ препарат за кількістю частинок буде представницьким, якщо його маса складатиме навіть 1 мг.

Оскільки стандартний зразок скругленості частинок ЗШМ за умов ТЕС не відповідає вимогам щодо однорідності й стабільності визначеної властивості [8], на практиці використовується атлас мікрофотографій скругленості ЗШМ. Отже, крупні частинки шла-

ку оцінюються за результатами візуального огляду, частинки фракцій (40—250) мкм — за мікрофотографіями, а частинки фракцій, менші від 40 мкм, — за електронними мікрофотографіями.

Середні бали скругленості певної фракції B_{ϕ} , а також усієї проби B_{cp} , за визначеного гранулометричного складу, розраховуються за формулами:

$$B_{\phi} = (n_1 + 2n_2 + \dots + 8n_8) / \sum_{i=1}^8 n_i ; \quad (15)$$

$$B_{cp} = B_{\phi 1} P_1 + B_{\phi 2} P_2 + \dots + B_{\phi k} P_k , \quad (16)$$

де n_1, n_2, \dots, n_8 , — кількості частинок певної фракції досліджуваного матеріалу, бал скругленості яких дорівнює 1, 2, ..., 8 відповідно;

P_1, P_2, \dots, P_k — частоти відповідної фракції $\left(\sum_{i=1}^k P_i = 1 \right)$, бали скругленості яких відповідно дорівнюють $B_{\phi 1}, B_{\phi 2}, \dots, B_{\phi k}$ (тут k — число фракцій).

Дослідження форм (50—150) окремих частинок кожної фракції ЗШМ різних палив дають такі значення середніх балів скругленості [17]:

- для шлакових частинок $B_{cp} = (2—3)$ бали,
- для золених частинок $B_{cp} = (3—6)$ балів.

Із наведених даних видно, що всі зразки золи складаються із більш скруглених частинок ніж зразки шлакових фракцій.

Завершуючи контроль неметричними шкалами властивостей сипких матеріалів в енерготехнології, потрібно зауважити щодо способів обчислення складових елементів еквівалентних класів шкал. Для добре розпізнавальних і розрізнявальних об'єктів, подібних енергоблокам, наведеним у прикладі, та частинкам у шкалі скругленості частинок ЗШМ, кількість визначається прямою лічбою. Але визначення багаточисельних дрібних кусків вугільної дробленки чи частинок вугільного пилу та летючої золи — задача практично нездійсненна за своєю трудомісткістю. Тому, замість лічби таких об'єктів, вимірюється їх маса метричною адитивною шкалою мас.

Метричні шкали мають властивості неметричних шкал, що уможливує користування результатами вимірювання за метричною шкалою так, якби вони були отримані за неметричною шкалою [5]. Це збігається з позначенням широко поширеним феноменом у монографії І. Пфанцагла [18]: властивості, які вимірюються в шкалах інтервалів метричної шкали, приймаються як показники для інших властивостей, монотонно пов'язаних з даними. А застосовані для виміру пов'язаних властивостей первинні шкали інтервалів стають тільки й усього як шкали порядку неметричної шкали. Тому, поділяючи за допомогою одиниці вимірювання величину (в нашому випадку масу) на послідовність індивідуалізованих й однакових за розміром елементів, можемо як вторинну процедуру застосувати лічбу і до такого специфічного виду дискретних об'єктів [19]. У такому разі чисельність еквівалентного класу неметричної шкали дорівнюватиме числовому значенню вимірювальної маси, а його відносне значення — масовій частоті [13] еквівалентного класу неметричної шкали.

На відміну від трактів підготовки вугілля та видалення вогнищевих залишків, для об'єктів, у яких є дискретні матеріали, що мають зовнішні якісні властивості (крупна — дрібна вугільна дробленка; тонкий — грубий вугільний пил; донна зола (шлак) — зола виносу (летюча зола)), енергія робочого тіла (водяної пари) тракту спаленого палива є мірою інтенсивності руху матерії й ніяких видів, або, як кажуть, «форм» не має — вона має кількість, але не має якості (в розумінні видової ознаки) [20]. Якісна властивість (нерозмірна властивість явищ, тіл чи речовин) має значення, яке можна виражати словами, літерно-числовим кодом чи іншим способом [8]. Для виявлення значення якісних властивостей теплоти робочого тіла розглянемо складові процеси та відповідне обладнання циклу Ренкіна, спрощену теплову схему якого наведено на рис. 6. До схеми входять [21]:

- котельна установка (КУ) для виробництва робочого тіла (водяної пари) шляхом ізобарного нагрівання, випаровування води та перегріву її пари внаслідок підведеної ззовні теплоти спаленого палива (ТСП) та відведеної у довікля теплоти через теплообмін. Теплота спаленого палива визначається за формулою:

$$Q_{\text{теп}} = BQ_i', \quad (17)$$

де Q_i' — питома теплота згоряння палива, МДж/кг;

- головний паропровід (ПП), за яким робоче тіло (перегріта пара) транспортується до турбінної установки (ТУ) (паропровід ізольований, але нормований вплив на довікля має місце);

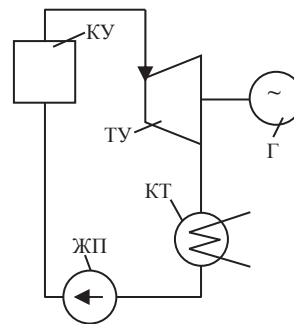


Рис. 6. Принципова теплова схема енергоблоку
Fig. 6. Basic thermal diagram of the power unit

- турбінна установка, в якій внаслідок адіабатного розширення пари здійснюється корисна робота для зрівноваження зовнішньої роботи обертання валу турбіни та електричного генератора (Г) з подальшим перетворенням її в електричну енергію;

- конденсатор турбіни (КТ), в якому відпрацьована в ТУ пара конденсується внаслідок ізобарного охолодження циркуляційною водою зі става-охолоджувача з відведенням до нього теплоти конденсації;

- живильна помпа (ЖП), яка адіабатно (з використанням зовнішньої роботи) стиснує отриманий у КТ конденсат до первинного тиску в КУ, замикаючи у такий спосіб цикл Ренкіна.

Як бачимо, теплові процеси циклу Ренкіна проходять під впливом довікля, чим зумовлені принципові відмінності трактування поняття теплоти. З точки зору термодинамічних уявлень, теплота — це спосіб взаємодії системи з довіклям, а не лише енергія теплового руху складових мікроелементів робочого тіла, як це визначено в молекулярній фізиці. Тому кожний процес термодинамічного циклу Ренкіна визначається не лише кількістю теплоти, яка виробляється в КУ, транспортується ПП чи перетворюється в механічну — електричну енергію в ТУ-Г. Не менш суттєвим для термодинаміки є визначення для кожного процесу циклу кількості теплоти, яка має бути видалена у довікля задля того, щоби система перебувала в термодинамічній рівновазі. Остання настає, коли зустрічні впливи довікля (теплотою чи роботою) на систему чи системи на довікля взаємозрівноважуються. За таких умов внутрішня рівновага системи (робочого тіла) є необхідним атрибутом рівноваги термодинамічної [22]. Отже, під зовнішнім впливом теплота системи (робочого тіла) виявляється у відношенні еквівалентності та класифікується двома еквівалентними класами. Якісні властивості теплоти таких класів мають значення, що виражаються словами (антонімічними назвами), об'єднаними в атрибутивні

конструкції²: клас корисно зуживаної теплоти та клас безкорисно втраченої теплоти, які є базовими поняттями шкал вимірювання. Але теплота (кількість теплоти) проявляється не лише у відношеннях еквівалентності й порядку, а й адитивності, що характерна для кількісної властивості, яка вимірюється адитивною шкалою відношень.

Зуживана та втрачена теплоти класів еквівалентності такої шкали вимірюються широко вживаними в теплоенергетиці балансовими рівняннями теплоти в процесах та обладнаннях, за якими реалізується термодинамічний цикл Ренкіна:

■ так рівняння теплового балансу КУ (теплоти класів еквівалентності неметричної шкали назв), складеного для 1 кг спаленого палива за умов усталеного режиму роботи КУ, має вид [14]:

$$\text{в абсолютній формі } Q_i^r = Q_1 + Q_{\text{кв}} = Q_1 + \sum_2^6 Q_i; \quad (18)$$

$$\text{у відносній формі } l = \eta_{\text{ку}} + q_{\text{кв}} = \eta_{\text{ку}} + \sum_2^6 q_i,$$

в якому Q_1 — теплота корисно зуживана, яка сприймається поверхнями нагріву в топковій камері та в конвективних газоходах КУ, передається робочому тілу і витрачається на підігрів конденсату (живильної води) до температури фазового переходу (випаровування) та перегріву отриманої пари;

$\sum_2^6 Q_i$ та $\sum_2^6 q_i$ — суми втрат теплоти з відхідними газами (Q_2, q_2), від хімічного (Q_3, q_3) та механічного (Q_4, q_4) недопалу палива, через зовнішнє охолодження (Q_5, q_5) та з фізичною теплоотою шлаку (Q_6, q_6) в абсолютній та відносній формах. Вони визначаються за результатами теплотехнічних випробувань КУ за методиками [15].

Основними втратами є: $q_2 = (8—10) \%$ та $q_4 = 2 \%$, решта $q_3 \sim 0 \%$, $q_5 \leq 0,2 \%$, $q_6 \leq 0,2 \%$. Сума основних втрат теплоти ($q_2 + q_3 + q_4$) за різними значеннями коефіцієнта надлишку повітря у топковій камері a_T (рис. 7) відповідає мінімуму основних втрат теплоти, що дорівнює ($q_2 + q_3 + q_4 \sim (10—12) \%$); за таких умов коефіцієнт корисної дії (ККД) КУ $\eta_{\text{ку}} = (88—90) \%$;

■ шкала транспортованої теплоти ПП до ТУ (балансове рівняння теплоти) має вид:

$$\text{в абсолютній формі } Q_1 = Q_{\text{пк}} + Q_{\text{пв}}; \quad (19)$$

$$\text{у відносній формі } l = \eta_{\text{пк}} q_{\text{пв}},$$

де $Q_{\text{пк}}$, $\eta_{\text{пк}}$ та $Q_{\text{пв}}$, $q_{\text{пв}}$ — теплота корисно зуживана (транспортована) до ТУ та безкорисно втрачена в ньому в абсолютній та відносній формах, які роз-

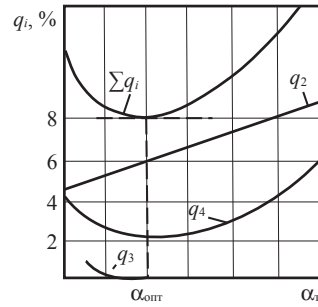


Рис. 7. Оптимальне значення коефіцієнта надлишку повітря у топковій камері КУ

Fig. 7. The optimal value of the coefficient of excess air in the combustion chamber of the boiler

раховуються через масові витрати палива та перегрітої пари перед ТУ з урахуванням термодинамічних параметрів останньої (ентальпії, тиску, температури). За умов номінального навантаження КУ середнє значення $\eta_{\text{пк}} = 0,985$; воно визначається за відомої Q_1 через $Q_{\text{пк}}$. Остання проявляється через зниження параметрів транспортованої ПП перегрітої пари, які сягають величин $\Delta p = (1—1,5)$ МПа, $\Delta t = 5^\circ\text{C}$ (нормовані значення їх: $\Delta p = 240$ МПа, $\Delta t = 540^\circ\text{C}$). Розраховується вона як різниця ентальпій пари після КУ та перед ТУ, яка визначається за допомогою $h—S—$ діаграми чи таблиць теплофізичних властивостей води і водяної пари.

■ шкали перетворення теплоти в роботу ТУ. Електрична енергія як результат перетворення енергії водяної пари в ряді послідовних етапів обладнання, кожний з яких характеризується своєю потужністю і шкалою вимірювання [23], як от:

♦ *внутрішня потужність турбіни*, підведеної до ТУ, пов'язана з потужністю свіжої пари таким рівнянням:

$$\text{в абсолютній формі } N_o = N_{\text{ік}} + N_{\text{ів}},$$

$$\eta_{\text{oi}} = N_{\text{ік}} / N_o = H_i / H_o \quad (20)$$

$$\text{у відносній формі } l = \eta_{\text{oi}} \varepsilon_{\text{oi}},$$

де N_i та N_o — *внутрішні потужності*, які розвиваються усередині корпусу (циліндра) турбіни на наявному (H_i) та ідеальному (адіабатичному) H_o теплоперепадах ентальпії свіжої пари;

η_{oi} — відносний внутрішній ККД, який характеризує ефективність власне проточної частини турбіни. Він може бути розрахований за даними досліду з повністю відкритими регульовальними клапанами турбіни або побудовою процесу водяної пари в $h-s$ -діаграмі;

♦ *ефективна механічна потужність турбіни*, пов'язана з її внутрішньою потужністю:

$$\text{в абсолютній формі } N_{\text{ік}} = N_{\text{ефк}} + N_{\text{ефв}},$$

$$\text{у відносній формі } l = \eta_m + \varepsilon_m, \quad \eta_m = N_{\text{ефк}} / N_{\text{ік}}, \quad (21)$$

де η_m — механічний ККД турбіни, яким враховується втрата енергії через тертя в опорних і упорних

² Атрибутивна конструкція — конструкція, яка складається із визначення атрибута і визначуваного [6].

підшипниках, а також у системах регулювання та змащування турбіни;

♦ *електрична потужність на затискачах генератора*, пов'язана із механічною ефективною потужністю на муфті між турбіною і генератором:

$$\text{в абсолютній формі } N_{\text{ефк}} = N_{\text{ек}} + N_{\text{ефк}},$$

$$\text{у відносній формі } 1 = \eta_{\text{г}} + \varepsilon_{\text{г}}, \eta_{\text{г}} = N_{\text{ек}}/N_{\text{г}}, \quad (22)$$

де $\eta_{\text{г}}$ — ККД електричного генератора.

На ступінь досконалості процесу перетворення теплоти в електричну енергію разом із ККД η_{oi} , $\eta_{\text{м}}$ та $\eta_{\text{г}}$ впливає також термічний ККД з циклу Ренкіна, який розраховується за формулою [23]:

$$\eta_{\text{т}} = H_{\text{o}} / (h_{\text{o}} - h_{\text{жв}}), \quad (23)$$

де $H_{\text{o}} = h_{\text{o}} - h_{\text{к}}$ — наявний теплоперепад турбіни як різниця ентальпій свіжої пари (h_{o}) і пари в конденсаторі після ізентропного його розширення ($h_{\text{к}}$);

$h_{\text{o}} - h_{\text{жв}}$ — питома теплота, підведена до 1 кг робочого тіла в КУ, що дорівнює різниці ентальпій свіжої пари і живильної води.

Отже, абсолютний електричний ККД ТУ можна подати в такому виді: $\eta_{\text{ту}} = \eta_{\text{т}} \eta_{\text{oi}} \eta_{\text{м}} \eta_{\text{г}}$. (24)

Тоді, з урахуванням (18), (19), ККД енергоблоку виражається як $\eta_{\text{обл}} = \eta_{\text{мк}} \eta_{\text{пк}} \eta_{\text{ту}}$. (25)

Приблизний підрахунок за результатами випробувань КУ та ТУ [14, 23] дає відносні оцінки ефективності на рівні: $\eta_{\text{т}} = 0,55$, $\eta_{\text{oi}} = 0,85$, $\eta_{\text{м}} = 0,99$, $\eta_{\text{г}} = 0,985$, $\eta_{\text{ку}} = 0,89$, $\eta_{\text{пк}} = 0,985$; тоді ККД ТУ складає $\eta_{\text{ту}} = 0,537$, а енергоблоку — $\eta_{\text{обл}} = 0,4$.

▪ шкала теплоти відпрацьованої пари (для конденсатора КТ):

оскільки втрати теплоти конденсатором турбіни у довілля відносно малі, то можна вважати, що в процесі конденсації відпрацьованої пари в КТ її скрита теплота пароутворення повністю сприймається циркуляційною водою із холодного джерела (става-охолоджувача). Отже, теплота відпрацьованої пари на виході із КТ технологічно класифікується двома класами еквівалентності: класом корисно зуживаної теплоти конденсату ($Q_{\text{к}}$) та класом безкорисно втраченої теплоти з циркуляційною водою ($Q_{\text{цв}}$):

$$\text{в абсолютній формі } Q_{\text{вп}} = Q_{\text{к}} + Q_{\text{цв}},$$

$$\text{у відносній формі } 1 = \eta_{\text{к}} + \varepsilon_{\text{цв}}, \eta_{\text{к}} = Q_{\text{к}}/Q_{\text{вп}}, \quad (26)$$

Найбільший вплив на ККД енергоблоку має ККД ТУ, який ураховує основну втрату теплоти в циклі Ренкіна — втрату в холодному джерелі, яка сягає величини $\varepsilon_{\text{цв}} = (45 \div 50) \%$ від загальної втрати.

Відносні оцінки фактичної ефективності ТУ проводяться згідно з [24] шляхом порівняння експериментально визначених показників з даними нормативно-технічної документації (гарантії заводу-виготовлювача і ДСТУ, а також теплові ха-

рактеристики та результати окремих випробувань однотипових ТУ).

ВИСНОВКИ

1. Залежно від особливостей ідентифікації та класифікації якісних властивостей об'єктів енерготехнології ТЕС на класи еквівалентності, а також за способом визначення кількісного складу таких класів розглянуті шкали вимірювання можна систематизувати такими групами шкал:

► *I група шкал* складається із *неметричних шкал* назв енергоблоків (моно та дубль-блоки). Такою ж шкалою може бути шкала для будь-якого допоміжного чи основного обладнання енергоблоку, які класифікуються за альтернативними ознаками: шкали КУ (з природньою та примусовою циркуляцією робочого тіла), шкали ТУ (аксіальні та радіальні), шкали ЗУ (мокрі та сухі) тощо. Їхні якісні властивості проявляються у відношенні еквівалентності й виявляються візуально, оскільки вони є добре розрізнявальними та розпізнавальними для теплоенергетика. Результати вимірювання за такими шкалами визначаються лічбою об'єктів і подаються у виді відносної чисельності — *частотями* (частість — рідкість) класів зуживальних об'єктів. Лічбою частинок закінчується вимірювання неметричною шкалою порядку скругленості частинок ЗШМ, яке проводиться шляхом порівняння їх зовнішніх форм з формами частинок стандартних зразків (фотоатласів) за допомогою мікроскопічного аналізу. Це єдина неметрична шкала в енерготехнології, результати вимірювання якої надаються в бальній системі.

► *II група шкал* утворюється *неметричними шкалами назв*, у якій виявлення якісних властивостей дискретних (сипких) матеріалів проводиться за допомогою технічних засобів (грохот, сит). Ними проби матеріалу просіваються та класифікуються за двома класами еквівалентності (класами грубої та тонкої вугільних дробленки та пилу). Функції технічних засобів виконує деяке основне (топкова камера КУ) та допоміжне (ЗУ) обладнання енергоблоку. Конструкції такого обладнання в технології факельного спалювання вугільного пилу (КУ) чи технології золоочищення димових газів (ЗУ) зумовлюють технологічну класифікацію вогнищевих залишків в КУ чи летючої золи в ЗУ. Але чисельності еквівалентних класів на виході із такого обладнання визначаються метричними адитивними шкалами вимірювання мас відібраних за певними правилами проб матеріалу (дробленки чи пилу вугілля, шлаку чи летючої золи, зловлених чи незловлених частинок ЛЗ). За чисельність об'єктів

класів приймаються числові значення результатів вимірювань мас матеріалу, які виражаються у відносній формі як *масові частоти*.

► *III група шкал*, в яких якісні властивості об'єктів (робочого тіла — водяної пари в циклі Ренкіна) визначаються в результаті його взаємодії з довкіллям, що уможливорює класифікацію теплоти водяної пари двома класами еквівалентності: класом корисно зуживаної та класом безкорисно втраченої теплоти. Так класифікуються вироблена в КУ теплота, транспортована паропроводом ПП теплота та теплота, що перетворюється у ТУ в механічну (електричну) енергію. Теплота (кількість теплоти) — це фізична величина, яка проявляється у відношеннях еквівалентності, порядку і адитивності, що притаманно *метричній шкалі відношень*. Відносні чисельності еквівалентних класів вимірюються за метричною абсолютною шкалою, результати якої виражаються не лише в арифметичних одиницях, а й у відсотках. Одним із найважливіших із них є усталений тривалою практикою коефіцієнт корисної дії ($\eta_{\text{ку}}$, $\eta_{\text{пп}}$, $\eta_{\text{ту}}$, $\eta_{\text{бл}}$).

► Відрізняється від розглянутих шкал умовна абсолютна неметрична шкала помелоздатності вугілля, яка характеризується коефіцієнтом його помелоздатності. Останній визначається за формулою (7) чи за тарировальним графіком (рис. 4), побудованим за результатами досліджень шести *стандартних зразків вугілля*.

2. Результати вимірювань за неметричними шкалами в енерготехнології вугільних енергоблоків у статті надаються кількостями об'єктів (індивідуальних чи індивідуалізованих, у абсолютній чи відносній формах) еквівалентних класів, назви яких відповідають назвам вимірюваних якісних. Порівнюючи такі результати з результатами вимірювань за метричними шкалами, можна зробити такий висновок: результати вимірювань властивостей об'єктів за будь-якою шкалою вимірювання завершуються лічбою:

▲ об'єктів еквівалентного класу з відповідною вимірюваною якісною властивістю неметричної шкали;

▲ одиниць вимірювання, з якими порівнюється кількісна властивість об'єкта (величина) відповідного еквівалентного класу метричної шкали.

3. Термінологічно неметричні шкали в енерготехнології, як загалом і в законодавчій метрології, за рід-


ким винятком, майже не вживаються. Але методологічні основи таких шкал, а саме, способи виявлення якісних властивостей у відношеннях еквівалентності, еквівалентності й порядку, уможливаючи складання балансових рівнянь об'єктів з якісними властивостями, широко вживаються, але не на закономірному метрологічному рівні. У термінах метрології такі рівняння — це результат класифікації двома класами еквівалентності об'єктів, назви яких — антоніми властивостей об'єктів відповідних класів (класів крупних та дрібних, зловлених та незловлених частинок; класів використаної та втраченої теплоти робочого тіла тощо). Відносна чисельність таких класів — це частоти, які вживаються лише в деяких вітчизняних та іноземних публікаціях. Натомість у стандарті ДСТУ 4082-2002 замість «частоти» вживається вираз «вихід класу крупності» — результат ситового аналізу (до речі, термін «вихід» за С.І. Ожеговим — це кількість виробленої продукції), оскільки сито продукції не виробляє, сито її класифікує, то назва не відповідає теорії шкал вимірювання). Зауважимо, що термін частість є універсальним для будь-яких не лише фізичних, а й нефізичних об'єктів.

4. Розглянуто неметричні шкали двох технологічних трактів енерготехнології (тракт підготовки вугілля і тракт видалення із топкової камери вогнищевих залишків) та метричні шкали тракту теплоти спаленого палива. Показано, що і неметричні шкали, і метричні шкали вимірювання базуються на балансових рівняннях об'єктів у абсолютній та відносній формах (обладнання, матеріали, робоче тіло), властивості яких виявляються у відношеннях еквівалентності, порядку та адитивності. Така уніфікація виявлення властивостей у різних відношеннях уможливорює розглядати на більш загальному рівні напрям розвитку метрології, який базується на шкалах вимірювання як кількісних, так і якісних властивостей об'єктів, усупереч діючому напрямку, заснованому лише на одиницях вимірювання і лише кількісних властивостей (якісні властивості об'єктів вимірювання до прийняття Рекомендацій РМГ 83-2007 перебували за межами інтересів метрології). Тому, з метою формування сучасного понятійно-термінологічного апарату галузевої (теплоенергетичної) метрології, персонал, залучений до енерговиробництва, має проходити через дедуктивний підхід до опанування її основами, виходячи із поняття шкали вимірювання на протиставу наявній традиції з опорою виключно на одиницю вимірювання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. РМГ 83-2007 (Рекомендации по межгосударственной стандартизации). Шкалы измерений. Термины

и определения. — М.: Стандартинформ (RMG 83-2007 (Recommendations on interstate standardization). Scales

- of measurements. Terms and Definitions. — Moscow: Standartinform, 2008. — 49 с/р.
2. Брянский Л.Н., Дойников А.С., Крупин Б.Н. Метрология. Шкалы, эталоны, практика. — М.: ВНИИФТРИ (Bryanskiy L.N., Doinikov A.S., Krupin B.N. Metrology. Scales, standards, practice. — М.: VNIIFTRI). — 2004 г. — 222 с/р.
 3. Промоскаль В.І., Заруба В.К., Близначенко О.М., Будко В.А. Прикладні аспекти неметричних шкал вимірювання в енерготехнології вугільних енергоблоків ТЭС. Метрологія та прилади (Promoskal V.I., Zaruba V.K., Bliznichenko O.M., Budko V.V. Applied aspects of non-metric measurement scales in power technology of coal power units of thermal power stations. — Kh.: Metrology and instruments). — 2017, — №3.
 4. Губерський Л.В., Надольний І.Ф., Андрущенко В.П. та інші; за ред. Надольного І.Ф. — Філософія: навч. посіб. — 4-те вид., стор., — К.: Вікар (Hubersky L.V., Nadolny I.F., Andrushchenko V.P. and other; ed. I.F. Nadolny — Philosophy: navch.posib. — 4 th ed., Pp. — K.: Vikar, 2004. — 516 с/р.
 5. Тюменева Ю.А. Психологическое измерение: Учеб. пособие для студентов вузов / Ю.А. Тюменева. — М.: Аспект Пресс (Tyumeneva Yu.A. Psychological Measurement: Proc. Allowance for students / Yu.A. Tyumeneva. — Moscow: Aspect Press), 2007. — 192 с/р.
 6. Советский энциклопедический словарь / Гл.ред. А.М. Прохоров. — 4-е изд. — М.: Сов.энциклопедия (The Soviet encyclopaedic dictionary / Ch. Ed. A.M. Prokhorov 4th ed. — М.: Sov.entsiklopediya), 1988. — 1600 с/р., ил./ill.
 7. Корнеева Т.В. Толковый словарь по метрологии, измерительной технике и управлению качеством. Основные термины: около 7000 терминов (Korneeva T.V. Explanatory dictionary on metrology, measuring technology and quality management. Basic terms: about 7000 terms. — Moscow: Rus. Yaz). — М.: Рус. яз. 1990. — 464 с/р.
 8. Международный словарь по метрологии: основные и общие понятия и соответствующие термины: пер. с англ. и фр./Всерос. науч.-исслед. ин-т метрологии им. Д.И. Менделеева, Беларус. гос. ин-т метрологи. Изд. 2-е, испр. — СПб.: НПО «Профессионал» (International Dictionary of Metrology: basic and community concepts and relevant terms: trans. English. and Fr./Vsegor. Scientific-issled. Institute of Metrology. DI. Mendeleyev, Belarus. State. In-t metrologists. Ed. 2 nd, Rev.-SPb.: NPO «Professional»), 2010. — 82 с/р.
 9. Белосельский Б.С., Вдовченко В.С. Контроль твердого топлива на электростанциях. — М.: Энергоатомиздат (Belosel'skii B.S., Vdovchenko V.S. Control of solid fuels in power plants. — Moscow: Energoatomizdat), 1987. — 176 с/р., ил./ill.
 10. ISO 1953-72 (A). Антрацит. Методы ситового анализа (ISO 1953-72 (A). Anthracite. sieve analysis methods).
 11. ДСТУ 4096-2002 Вугілля буре, кам'яне, антрацит, горючі сланці та вугільні брикети. Методи відбору та підготовки проб до лабораторних випробувань (ISO 4096-2002 Brown coal, anthracite, shale oil and coal briquettes. Methods of selection and preparation of samples for laboratory testing).
 12. ДСТУ 4082-2002 Паливо тверде. Ситовий метод визначення гранулометричного складу (ISO 4082-2002 Solid fuel. Sieve method for determining particle size distribution).
 13. Измерения в промышленности: Справ. изд. в 3-х кн. Кн.3. способы измерения и аппаратура: пер. с нем. / Под ред. Профоса П. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Металлургия (Measurements in the industry: Ref. ed. 3-book. Kn.3. methods of measurement and equipment: lane. with it. / Ed. Warder P. — 2nd ed. and ext. — М.: Metallurgy), 1990, 334 с/р.
 14. Ковалев А.П. и др. Парогенераторы: Учебник для вузов / А.П. Ковалев, Н.С. Лелеев, Т.В. Виленский; Под общ. ред. А.П. Ковалева. — М.: Энергоатомиздат (Kovalev A.P. et al. Steam generators: A Textbook for Universities / A.P. Kovalev, N.S. Leleev, T.V. Vilensky; Under the Society. Ed. A.P. Kovalev. — Moscow: Energoatomizdat), 1985. — 376 с/р., ил./ill.
 15. Трёмбовля В.И. и др. Теплотехнические испытания котельных установок / В.И. Трёмбовля, Е.Д. Фингер, А.А. Авдеева. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат (Trembovlya V.I. et al. Thermal testing units boiler. V.I. Trembovlya, E.D. Finger, A.A. Avdeeva. — 2nd bridges., Revised. and ext. — М.: Energoatomisdat), 1991, — 416 с/р.: ил./ill.
 16. Лозинский Р.П., Доманский С.Г., Шелингер М.Ф. и др. Методические указания по испытанию золоулавливающих установок ТЭС. СПО Союзтехэнерго (Lozinski R.P., Domanski S.G., Shelinger M.F. etc. Guidelines for the Testing of dust extraction CHP plants. АСТ Soyuztehenergo), 1982, — 160 с/р.
 17. Ларина Э.А., Мелентьев В.А. Состав и свойства золы и шлака ТЭС: под. ред.. В.А. Мелентьева. Спр. пособие. — Л.: Энергоатомиздат (Larin E.A., Melent'ev V.A. Structure and properties of ash and slag TPP: a. red..V.A. Melentyeva. Ref. allowance. — L.: Energoatomisdat), 1985. — 288 с/р., ил./ill.
 18. Пфанцагль И. Теория измерений / Пер. с англ. — М.: Мир (Pfanzagl I. Theory of Measurement / Trans. With the English. — Moscow: The World), 1976.
 19. Карел Берка. Измерения. Понятия, теоремы, проблемы: Пер. с чешск. — М.: Прогресс (Karel Berka. Measurements. Concepts, theorems, problems: Per. With Czech. — Moscow: Progress), 1987. — 320 с/р.
 20. Янтовский Е.И. Потoki энергии и эксергии. — (серия «Наука и технический прогресс»). ISBN 5-02-006620-6. — М.: Наука (Yantovsky E.I. Energy flows and exergy. — (series «Science and technical progress»). ISBN 5-02-006620-6. — М.: Science), 1988. — 144 с/р., ил./ill.
 21. Быстрицкий Г.Ф. Основы энергетики: Учебник. — М.: ИНФРА-М (Bystrytsky G.F. Energy Basics: Tutorial. — М.: INFRA-M), 2006. — 278 с/р. — (Высшее образование (Higher education)).
 22. Жуковский В.С. Термодинамика/ Под ред.. А.А. Гухмана. М.: Энергоатомиздат (Zhukovsky, V. S., Thermodynamics, Ed. A.A. Gukhman. Moscow: Energoatomizdat), 1983, 304 с/р. ил./ill.
 23. Рыжкин В.Я. Тепловые электрические станции: Учебник для вузов / Под ред. В.Я. Гиришфельда. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат (Ryzhkin V.Ya. Thermal power plants: Textbook for universities / Ed. V.Ya. Hirschfeld. — 3rd ed., Pererab. And additional. — Moscow: Energoatomizdat), 1987. — 328 с/р.: ил./ill.
 24. Сахаров А.М. Тепловые испытания паровых турбин — М.: Энергоатомиздат (Sakharov A.M. Thermal testing of steam turbines — М.: Energoatomizdat), 1991. — 238с/р.: ил./ill. 

Отримано / received: 03.09.2020.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. О.С. Гордеевим (Україна).
Prof. O.S. Gordeyev, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.

DOI: 10.33955/2307-2180(5)2020.55-58

УДК 006.83

СТАТИСТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТІ ПРОЦЕСІВ У ХОДІ ЗДІЙСНЕННЯ АУДИТУ ЯКОСТІ

Statistical Study of Process Efficiency During Quality Audit

Л. І. Аксьонова, кандидат технічних наук,
консультант з систем управління,
Компанія «CERTICON», м. Запоріжжя, Україна,
e-mail: aksenova.amz@gmail.com

L. I. Aksionova, candidate of technical sciences,
consultant on management systems,
Company «CERTICON», Zaporizhia, Ukraine,
e-mail: aksenova.amz@gmail.com

Розглянуто вирішення науково-практичної задачі визначення достатнього числа доказів аудиту, які застосовують для дослідження результативності процесів системи управління якістю. Статистичний метод розрахунку числа доказів аудиту якості ґрунтується на визначенні мінімально необхідного обсягу вибірки залежно від вимог до точності результатів оцінювання.

methods, unlike probabilistic, are less difficult for practical use during quality audit.

The article considers the solution of the scientific and practical problem of determining a sufficient number of audit evidence, which is used to study the effectiveness of the quality management system. For statistical research of processes the analysis of methods of formation of sampling is carried out and it is defined that improbable

It is concluded that the most correct for the analysis of the effectiveness of quality system processes is the statistical method of calculating the sample size, based on determining the minimum (sufficient) number of audit evidence depending on the requirements for the accuracy of evaluation results. This makes it possible to ensure the statistical reliability of the audit conclusions, which are taken from the results of a sample survey, while avoiding unnecessary time for its implementation.

A practical example of calculating a sufficient number of audit evidence to assess the effectiveness of the quality system process is given.

Ключові слова: аудит якості, дослідження процесів, система управління якістю, статистичні методи.
Keywords: quality audit, process research, quality management system, statistical methods.

Аудит якості — це аналітична за своїм характером робота, суть якої полягає у збиранні доказів, порівнянні їх із критеріями аудиту та аналізі отриманих даних для формування висновків [1]. Застосування статистичних методів дає можливість більш ефективно і достовірно досліджувати процеси системи управління якістю та здійснювати кількісне оцінювання їх результативності, створюючи підґрунтя для правильного формування висновків аудиту. Під час статистичного аналізу даних, як правило, вивчається не вся генеральна сукупність, а її вибірка. За практичних умов будь-якої організації, особливо складних промислових підприємств, під час планування вибіркового обстеження постає важливе питання: як забезпечити необхідну точність результатів оцінювання, уникаючи при цьому зайвих витрат часу на здійснення аудиту. Потрібно відзначити, що точність отриманих результатів статистичного аналізу даних залежить як від обсягу вибірки, так і від методу її формування, які мають відповідати цілям дослідження [2]. Отже, вирішення питання полягає у застосуванні відповідних методів формування вибірки, використовуючи мінімальне (достатнє) за обсягом число доказів аудиту.

Використання статистичних методів в управлінні якістю регулюється вимогами міжнародного стандарту [3], який надає загальні рекомендації, спрямовані на розроблення, впровадження, підтримування та поліпшення системи управління якістю. Аудит якості здійснюється на основі методичних рекомендацій міжнародного



стандарту ISO 19011 [4], який визначає лише його загальні методи збирання даних (інтерв'ю, спостереження тощо) для дослідження системи управління якістю.

Більшість наукових робіт, які пов'язані з методами формування та визначення обсягу вибірки, присвячені аудиторам, що здійснюють у фінансовій сфері [5, 6]. Однак, фінансовий аудит відрізняється від аудиту якості цілями та завданням. Наприклад, у фінансовій сфері визначення необхідного числа доказів аудиту, рівня надійності, максимально допустимого ступеня спотворень інформації аудитор здійснює за грошовою одиницею.

Мета роботи — проаналізувати методи формування вибірки та запропонувати метод визначення достатнього числа доказів аудиту за статистичного дослідження процесів системи управління якістю.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Найбільш ефективним, з точки зору вивчення статистичних даних, є використання ймовірнісних методів формування вибірки, які дозволяють за результатами її аналізу характеризувати всю генеральну сукупність з відомим ступенем достовірності. До таких методів відносяться простий випадковий відбір, систематичний відбір, кластерний відбір [7]. Проте, основним недоліком цих методів є необхідність припущення стосовно симетричного закону розподілу генеральної сукупності, що практично зустрічається дуже рідко. Якщо розподіл не є симетричним, використовується стратифікований відбір. Кожна страта виконує роль генеральної сукупності, з якої формується вибірка. Але, при цьому необхідно враховувати пропорційність стратифікування. Якщо ця умова не виконується, то потрібно застосовувати вагові коефіцієнти для урівноваження розміру страт, що, у свою чергу, значно ускладнює процедуру аудиту та може збільшувати час її здійснення.

Використання неймовірнісних методів формування вибірки, а саме, відбору за критерієм, квотами, принципом зручності та відбору згідно зі спостереженням, має суттєві організаційні переваги перед імовірнісним. Ці методи менш складні для використання у процесі здійснення аудиту якості. Але у цьому випадку збільшується ризик отримання менш точних результатів оцінювання. Окрім того, докази аудиту, отримані шляхом вибіркового дослідження, допускають певну ступінь ризику для підготування висновків стосовно результативності процесів. Для зменшення такого ризику у фінансовому аудиті [6] збільшують число його доказів, що має підвищити точність результатів дослідження. Проте, збільшен-

ня, без обґрунтування, обсягу вибірки збільшує також час здійснення аудиту. Отже, існує протиріччя між визначенням мінімального (достатнього) числа доказів аудиту, що забезпечують надійність висновку, та часом його проведення.

Існують такі методи визначення обсягу вибірки [2]:

- *довільний метод* — обсяг вибірки визначається на рівні (5—10) % від генеральної сукупності;
- *із використанням номограм* — розмір вибірки визначається за допомогою спеціально розроблених графіків;
- *емпіричний метод* — вибірка вважається достатньою, коли до вже зібраних результатів дослідження вносять лише незначні зміни (якими можна знехтувати);
- *витратний* — розмір вибірки визначається відповідно до суми витрат, які плануються на проведення дослідження;
- *статистичний* — обсяг вибірки визначається на основі статистичних залежностей.

Вибір методу визначення обсягу вибірки здійснюватимемо, виходячи із цілей дослідження та необхідності отримання достатньо точних результатів аналізу наявних даних. При цьому враховуватимемо, що обсяг вибірки суттєво залежить від розміру сукупності, яка досліджується [7]. Під час аудиту, як раніше було зазначено, досліджують результати процесів системи якості. Під час оцінювання результатів процесу за альтернативною ознакою існує два варіанти для порівняння доказів: «віповідають критеріям аудиту» або «не відповідають критеріям аудиту». При цьому результат порівняння буде виражений у відсотках, тобто використовується процентна міра. Отже, є можливість застосовувати статистичний метод, який дозволяє, виходячи з необхідної/заданої точності, встановити мінімальний обсяг вибірки для дослідження. Застосування статистичного методу забезпечує взаємозв'язок між точністю оцінювання та обсягом вибірки, на відміну від *довільного методу*, який базується на досвіді або інтуїції і не гарантує точності/достовірності аудиту.

Виходячи із наведеного вище, можна зробити висновки, що найбільш коректним для дослідження процесів системи якості є статистичний метод розрахунку обсягу вибірки, заснований на визначенні мінімального (достатнього) числа доказів аудиту залежно від вимог до точності результатів оцінювання.

Під доказами аудиту розумітимемо множину однорідних елементів, яким властиві ознаки результатів процесу, виражені числами, — число випадків

отримання несвоєчасних та/або неякісних результатів процесу. Відповідно до статистичної теорії [7], основними параметрами результату процесу виступають середнє значення (\bar{X}_j), що характеризує можливість процесу, та стандартне відхилення (σ), яке показує степінь його варіабельності. Можливості процесу або рівень його результативності оцінюють шляхом порівняння доказів аудиту із його критеріями.

Кількість доказів аудиту (спостережень) називається обсягом вибірки та позначається n . Позначимо часову появу події за j -ого дослідження процесів через x_j , де $j = 1, \bar{n}$. Усі величини x_j представляють собою n однаково розподілених випадкових величин, кожна з яких приймає значення «0» або «1» з імовірністю відповідно $q = (1 - p)$ та p . Математичне сподівання події щодо відповідності критеріям аудиту, тобто $x_j = 1$, $M[E_x] = p$ та дисперсія $D(E_x) = pq$. Полігон біноміального розподілу асимптотично наближається до нормального (починаючи з $n \geq 10$) [8]. Найкращою оцінкою показника є середнє значення $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{x=1}^n E_x$ з генеральною дисперсією $D(E_x) = \sigma^2 = pq$.

Для визначення мінімального обсягу вибірки (n), яка забезпечує задану точність (ε) оцінювання показника результативності, будемо виходити зі співвідношення:

$$P\{[\bar{X} - Mx] < \varepsilon\} = 1 - \alpha, \quad (1)$$

де ε — допустиме (задане) відхилення оцінки від математичного сподівання, α — рівень статистичної значимості.

Після перетворення (1) матимемо нерівність:

$$P\{[\bar{X} - \varepsilon] < Mx < [\bar{X} + \varepsilon]\} = 1 - \alpha.$$

Переходимо до нормованої випадкової величини. Поділимо нерівність, що стоїть у дужках виразу (1), на $\sigma(\bar{X})$ — середнє квадратичне відхилення середнього значення і введемо позначення:

$$z = \frac{\bar{X} - M_x}{\sigma(\bar{X})}, \quad (2)$$

Тоді маємо $P\{[z] < \varepsilon/\sigma[\bar{X}]\} = 1 - \alpha$ або $z = \varepsilon/\sigma(\bar{X})$ — квантіль нормованого розподілу, значення яких наведено у відповідних таблицях.

Прийmemo до уваги, що $\sigma(\bar{X}) = \sigma/\sqrt{n}$ та $\sigma = \sqrt{pq}$, отримаємо

$$\varepsilon = z_{1-\alpha} \sqrt{pq/n}. \quad (3)$$

Звідси мінімальний обсяг вибірки визначається як

$$n = (z^2 pq)/\varepsilon^2, \quad (4)$$

де $z_{1-\alpha}$ — квантіль розподілу Лапласа, який обирається залежно від рівня значимості; p — варіація вибірки.

Зазвичай рівень значимості становить $\alpha = 0,05$, тоді $z_{1-\alpha} = 1,96$; ε — допустима помилка за визначення показника процесу, яку вибирає аудитор залежно від потрібної точності та статистичної надійності розрахунків. Якщо вимоги точності дуже високі, то для довірчої ймовірності вибирають значення 0,999; якщо звичайні — 0,95; знижені — 0,9. Якщо варіація невідома, то приймається $p = 50$, тобто така варіація відповідає найгіршому випадку. Наведена розрахункова формула (4) для визначення достатнього числа доказів аудиту використовується у випадку, коли вибірка становить менше 5 % від генеральної сукупності й вважається великою.

Розглянемо практичний приклад оцінювання результативності процесу «Управління технологічним устаткуванням» за показниками часу. Ці показники оцінюють, використовуючи число випадків нечасного усунення несправностей устаткування, згідно із заявками на ремонт від виробничого цеху. Необхідно визначити достатнє число доказів аудиту, якщо відомо, що за визначений період дослідження процесу було оформлено 500 заявок на ремонт. Приймаємо варіацію вибірки $p = 50$. Рівень значимості $\alpha = 0,05$, тоді $z = 1,96$, припустима помилка 10 %. За формулою (4) маємо:

$$n = \frac{1,96^2 \times 50 \times 50}{10^2} = 96 \text{ доказів аудиту.}$$

У цьому випадку обсяг вибірки становить 19 % від генеральної сукупності (загальна кількість заявок на ремонт — 500 од.), тобто перевищує 5 %. Якщо обсяг вибірки не більше 5 % генеральної сукупності, то вибірка вважається маленькою. У цьому випадку доцільним є використання робастних процедур, де в процесі статистичного опрацювання використовуються всі наявні дані [9]. Під робастністю розуміється нечутливість до різних відхилень і неоднорідностей у вибірці, які пов'язані з тими чи іншими, у загальному випадку невідомими, причинами. Використання такої моделі дозволяє, з одного боку, зберегти зручний розподіл усіх допущень стосовно однорідності гіпотетичної генеральної сукупності, й, з іншого боку, — не відкидаються дані, які за традиційного підходу визнавалися б викидами. Тим самим підвищується статистична надійність висновків, які приймають за результатами вибіркового дослідження.


ВИСНОВКИ

Проведено аналіз методів формування вибірки для статистичного дослідження процесів системи управління якістю та визначено, що неймовірнісні методи, на відміну від імовірнісних, є менш складними для практичного використання у процесі здійснення аудиту якості.

Для використання неімовірнісних методів формування вибірки запропоновано статистичний метод розрахунку обсягу вибірки, заснований на визначенні мінімального (достатнього) числа доказів аудиту якості залежно від вимог до точності резуль-

татів оцінювання. Це дає можливість забезпечити статистичну надійність висновків аудиту якості, які приймають за результатами вибіркового дослідження, уникаючи при цьому зайвих витрат часу на його здійснення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. ДСТУ ISO 9001–2015. Системи управління якістю. Вимоги. — Київ: Мінекономрозвитку України (DSTU ISO 9001–2015. Systemy upravlinnia yakistiu. Vymohy. — Kyiv: Minekonomrozvytku Ukrainy), 2016. — 22с/р.
2. Шимко П.Д. Статистика / П.Д. Шимко, М.П. Власов. — Ростов н/Д: Феникс (Shymko P.D. Statystyka / P.D. Shymko, M.P. Vlasov. — Rostov n/D: Fenyks), 2003. — 448 с/р.
3. ДСТУ ISO/TR 10017:2011. Настанови щодо застосування статистичних методів. — Київ: Держспоживстандарт України (DSTU ISO/TR 10017:2011. Nastanovy shchodo zastosuvannya statystychnykh metodiv. — Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy), 2011. — 26 с/р.
4. ДСТУ ISO 19011:2013. Настанови щодо здійснення аудитів систем управління. — Київ: Мінекономрозвитку України (DSTU ISO 19011:2013. Nastanovy shchodo zdiisnennia audytiv system upravlinnia. — Kyiv: Minekonomrozvytku Ukrainy), 2012. — 25 с/р.
5. Кузьминский А. Аудит: практическое пособие / А. Кузьминский, Н. Кужельный, Е. Петрик и др. — Київ (Kuzmynskiy A. Audyt: praktycheskoe posobyе / A. Kuzmynskiy, N. Kuzhelnyy, E. Petryk y dr. — Kyiv), 1996. — 283 с/р.
6. Шеремет А.Д. Аудит: Учебник. 5-е изд., перераб. и доп. / А.Д. Шеремет, В.П. Суйц. — Москва: ИНФРА-М (Sheremet A.D. Audyt: Uchebnyk. 5-e yzd., pererab. y dop. / A.D. Sheremet, V.P. Suits. — Moskva: YNFRA-M), 2007. — 448 с/р.
7. Василенко О.А. Математично-статистичні методи аналізу у прикладних дослідженнях: навч посіб. / О.А. Василенко, І.А. Сенча. — Одеса: ОНАЗ ім. О.С. Попова (Vasylenko O.A. Matematychno-statystychni metody analizu u prykladnykh doslidzhenniakh: navch posib. / O.A. Vasylenko, I.A. Sencha. — Odesa: ONAZ im. O.S. Popova), 2011. — 166 с/р.
8. Володарський Е.Т. Статистична обробка даних: навч. посібник / Е.Т. Володарський, Л.О. Кошева. — Київ: НАУ (Volodarskyi E.T. Statystychna obrobka danykh: navch. posibnyk / E.T. Volodarskyi, L.O. Kosheva. — Kyiv: NAU), 2008. — 308 с/р.
9. Володарский Е.Т. Применение робастных методов при оценивании результатов экспериментальных исследований / Е.Т. Володарский, Л.А. Кошева // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. ВНТУ (Volodarskyi E.T. Prymenenye robastnykh metodov pry otsenyvanny rezultatov eksperymentalnykh yssledovanyi / E.T. Volodarskyi, L.A. Kosheva // Informatsiini tekhnolohii ta kompiuterna inzheneriia. VNTU) — 2014. — № 3(25). — С/Р. 34—38. 

Отримано / received: 04.09.2020.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. Є.Т. Володарським (Україна).
Prof. Ye.T. Volodarskyi, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.

DOI: 10.33955/2307-2180(5)2020.59-63

УДК 530.145+678.9

DEEP SUBMICRON PARTICLES IN A SOLID MATRIX ENVIRONMENT

Глибоко субмікронні частинки у твердотільному матричному оточенні

V. V. Kovalchuk, doctor of physical and mathematical sciences, professor, director of the college, Odessa State Ecological University, Ukraine, e-mail: lslvvas@ukr.net

В. В. Ковальчук, доктор фізико-математичних наук, професор, директор коледжу, Одеський державний екологічний університет, Україна, e-mail: lslvvas@ukr.net

In this article the results of the experimental and theoretical investigation of polyhedral deep submicron particles (DSP), in particular, Si-nanoclusters (Si-NC) are surrounded by solid state matrix. The article presents optical spectra of Si_nY_m — DSP. We have discussed in detail the theoretical calculations on the band gap of quantum-dimensional systems. One of the main conclusions is that the comparison between theory and experiments shows the possibility of different radiative channels for the recombination in porous silicon.

У статті наведено результати експериментального та теоретичного досліджень поліедричних глибоко субмікронних частинок, зокрема, нанокластерів кремнію, що містяться у матричному оточенні. Показано, що багатогранні (поліедричні) нанокластерні сполуки, що складаються лише з трьох атомних кілець, легко піддаються розтягуванню або розриву міжатомних хімічних зв'язків. Нанокластери, які мають вісім атомів кремнію (позначені — Si_8X_8 , де символ X — означає пасиватори обірваних хімічних зв'язків різних розмірів), були розраховані шляхом використання теоретичних методів МІЕНТ- [1] та PDFT [4]. Для порівняння з експерименту були взяті рентгенівські спектри аналогічних нанокластерних структур у середовищі $2,6-Et_2C_6H_3$, CMe_2CHMe_2 та t-Bu [8, 9].

Розрахункові та рентгенівські дані виокремлюють майже ідеальні кубічні нанокластерні утворення (скелети). Теоретичні результати доводять, що симетрія нанокластерів типу Si_8H_8 знижується в міру того, як замісники обірваних зв'язків стають більш громіздкими (органічними). Але всі розраховані структури все ж таки зберігають відносно високу симетрію на відміну від тих, що ідентифіковані в експериментах з кристалами.

Зауважимо, що сили, які відповідають за щільність геометричної конфігурації Si-нанокластера (наприклад, кубічної симетрії), суттєво впливають на сприятливі конформації

об'ємних заступників навколо скелета. Можливо це виникає тому, що втрати енергії внаслідок конформаційних перетворень є надзвичайно невеликими.

Нанокластери з призматичною симетрією атомного скелета (Si та Ge) добре випромінюють хвилі жовтого до помаранчевого кольорів. Такі наночастинки виявляють поглинання у видимій області спектра. Так, нанокластер типу Si_6H_6 має смугу поглинання з максимумом за 241 нм з «хвостом» приблизно до 500 нм. Смуга поглинання германізового нанокластера (Ge_6Y_6) відповідає максимуму за 261 нм та зміщується у червону область порівняно з таким нанокластером, як Ge_6Y_6 (символ Y означає пасиватори «обірваних» хімічних зв'язків германію більш об'ємних за розміром) [5]. Потрібно зазначити, що саме гексасилапризман Si_6Y_6 є надзвичайно світлочутливим. За опромінення в розчині за низької температури світлом, що має довжину хвилі 340-380 нм, з'являються нові смуги поглинання: за 335, 455 і 500 нм, які можна визначити як смуги поглинання Дьюара. Після збудження цих смуг випромінюванням з довжинами хвиль, більшими за 460 нм, хімічні зв'язки нанокластера Si_6Y_6 негайно регенерується.

Проведені нами теоретичні розрахунки свідчать, що форма спектра в області низьких енергій надзвичайно сильно залежить від заступників обірваних хімічних зв'язків. Кінетична стабільність таких сполук, як Si_4H_4 , Si_6H_6 та Si_8H_8 , залежить від стеричної об'ємності замісників, тобто від оточення — матриці. Заміщений силілом нанокластер типу Si_nY_m (Y — органічний замісник) стабільний в інертній атмосфері, але окислюється на повітрі, отримуючи безбарвну тверду речовину. 1,1,2-триметилпропілзаміщений Si_nY_m є дуже стійким, навіть у повітрі й існує протягом двох тижнів у твердому стані.

Одним із головних висновків є те, що порівняння між теорією та експериментами свідчить стосовно можливості різних радіаційних каналів для рекомбінації у пористому кремнії.

Keywords: polyhedral, deep submicron, particle, Si-nanoclusters.

Ключові слова: поліедр, глибоко субмікронний, частинка, Si-нанокластери.

MOTIVATION OF THE STUDY

The smaller electronegativity of silicon will affect the bond polarity and ionicity, which will in turn have a major influence on the bond lengths involving silicon. Steric effects caused by bulky substituents will, on the one hand be less important than in the carbon analogues because of the longer bond lengths, but, on the other hand, will have a greater effect because of the lower barrier to distortion. One of the



striking differences between silicon and carbon atoms is the ease of formation of hypervalent species with silicon. Five- and six-coordinate silicon compounds are stable and the role of d orbitals in the bonding of silicon in these compounds is a subject of continuing debate [1]. On the other hand, synthesis of the polyhedral silicon compounds such as tetrahedrane, prismane, and cubane due to their high symmetry is a great challenge since it could lead to novel physical and chemical properties unexpected from the carbon compounds. And such synthesis is possible until recently [2–4]. In the last two decade we have been witnessing an explosion of information on the geometry of deep submicron particles (DSP) (nanoclusters) extracted from photoluminescence spectra [5–7]. These results shows the growth in the number of silicon compounds whose structures have been determined experimentally. In this article the results of the investigation of polyhedral DSP (PDSP) such as tetrasilatetrahedrane, hexasilaprismane and octasilacubane are summarized together with our DFT theoretical calculations [1]. These are also compared with those for the germanium and tin analogues [8–10].

APPROACH

In this paper a new approach to the study of Si-PSP consists small and intermediate-size Si-ACs is proposed. Comparison of the experimental geometry with optimized calculated geometry is given. The article covers Si_nY_m structural chemistry and adsorption spectra, where Y are substituents. Silicon may be either tri-, tetra-, penta- or hexacoordinate and Y may have different coordination numbers [1, 10]. For each type of Si-Y bond, typical and exceptional compounds are shown and the relevant geometric parameters are listed below.

Our simulation package contains the tools which are necessary for the investigation and visualization of the results generated by the calculation program-packages (CPP) such as a) PDFT, b) POTENTIAL, c) GEOMETRY.

PDFT-package. The theoretical method used in the present work is the parametrized density functional scheme of that allows for full relaxation of covalent systems with no symmetry constraints. To study the dynamics of the clusters we offer the approximate calculation scheme. This is the density-functional theory (DFT) in the realisation of Kohn and Sham (KS), using a few empirical parameters [1]. This method, which named parameterised DFT- PDFT, is based on the Hartree-Fock scheme plus a proper treatment of the electron correlation. The use of only a few parame-

ters minimizes the effort for the determination of the parameters, it yields a close relation to full ab initio DFT schemes (for example, GAMESS). This is guarantee of the good «transferability» of the parameters, going from one system to another.

The use of some approximations in connection with a few empirical parameters makes the scheme computation extremely fast. PDFT allows also the study of dynamical processes through the coupling with molecular dynamics (MD). The method of simulation of the inter-PSP interaction is based on the MD description. The main idea our description leads to the estimation of the energetically characteristics of the cage-like PSP which contain some atoms.

The closely (cage) packed PSP were tested and investigated in [1]. The MD is particularly suitable for finding minimum configurations for small PSP. When applied to the bulk phases of Si, MD-PDFT has reproduced binding energy differences between the high-pressure metallic phases and the diamond phase in excellent agreement with the schemes based on the local density approximation (LDA) [4, 5].

GEOMETRY-package (GP) is a geometrical program based on 3D-representation of the investigation of PSP-structures. The GP generates detailed and easily interpretable and aesthetically appealing graphics representing models of molecular structures and related properties. The package offers a high level of interactivity through the use of the mouse and via a large set of menus and submenus, organized in such a way so as to enable users to learn rapidly the basic operations leading to efficient visualization. For all the menu items, a help facility has been implemented. Various representation options and attributes may be selected for adapting the visual output to personal needs and preferences: the molecular structures may be represented as discrete dots, and the global appearance may be modified via attributes such as background appearance, perspective or orthogonal projection and others. The purpose of the GP is the interactive visual representation of three-dimensional (3D) models of molecular structures and properties for research. Due to the flexibility of the data- and program-structure, various chemical systems ranging from small compounds (clusters) to large macromolecules may be investigated, additional interfaces and tools can easily be implemented.

Our results shows the calculated optimized PSP of tetrasilatetrahedrane (Si_4H_4), hexasilaprismane (Si_6H_6) and octasilacubane (Si_8H_8) at the PDFT level. The Si-Si bond lengths in Si_4H_4 are shorter than the single bond length of 2,352 Å calculated

for $\text{H}_3\text{Si-SiH}_3$, and it increases in the order Si_4H_4 (2,314 Å) < Si_6H_6 (2,359 Å and 2.375 Å) < Si_8H_8 (2,396 Å). It is interesting that the Si-Si bond lengths are shorter in the three-membered rings than in the four-membered rings, as is also calculated for the monocyclic rings: cyclotrisilane (2,341 Å) vs cyclotetrasilane (2,373 Å). This trend is enhanced in the heavier compounds.

However, bond lengths are not necessarily correlated with bond strengths; the bonds in three-membered rings are weaker than those in four-membered rings. This is because the heavier atoms are forced to hybridize to a considerable extent in order to achieve and maintain the three-membered skeletons of a given symmetry a large energy loss. To compensate for this energy loss, the bond lengths between skeletal atoms shorten in order to form bonds as effectively as possible. However, the cost for hybridization is too large to be offset just by bond shortening, leading to higher strain and weaker bonds in the three-membered rings.

RESULTS

As a result of the high strain and weak bonds, the heavier polyhedral compounds consisting of only three-membered rings easily undergo bond stretching or bond breaking.

Octasilacubanes (Si_8H_8) bearing alkyl, aryl and silyl substituents of various sizes were calculated using the semiempirical MIEHT- α method [1] and PDFT approach [4]. X-ray structures are available for $Y = 2,6 - \text{Et}_2\text{C}_6\text{H}_3$, $\text{CMe}_2\text{CHMe}_2$ and $t\text{-Bu}$ [8, 9]. Both the calculated and the X-ray structures show almost perfect cubic skeletons. In addition, the experimental skeletal Si bond lengths are reasonably well reproduced by the calculations, taking into account the overestimation of the Si-Si bond distances by *ca* 0,05 Å. Our results shows O_h symmetry of Si_8H_8 is lowered as the substituents become more bulky. Nevertheless, all of the calculated structures still retain relatively high symmetry in contrast with the available experimental structures in crystals. This suggests that packing forces significantly affect the favourable conformations of bulky substituents around the cubane skeleton, probably because the energy loss due to the conformational changes is very small.

The prismanes with Si and Ge skeletons are yellow to orange. Figure 1 shows the UV-Vis spectra

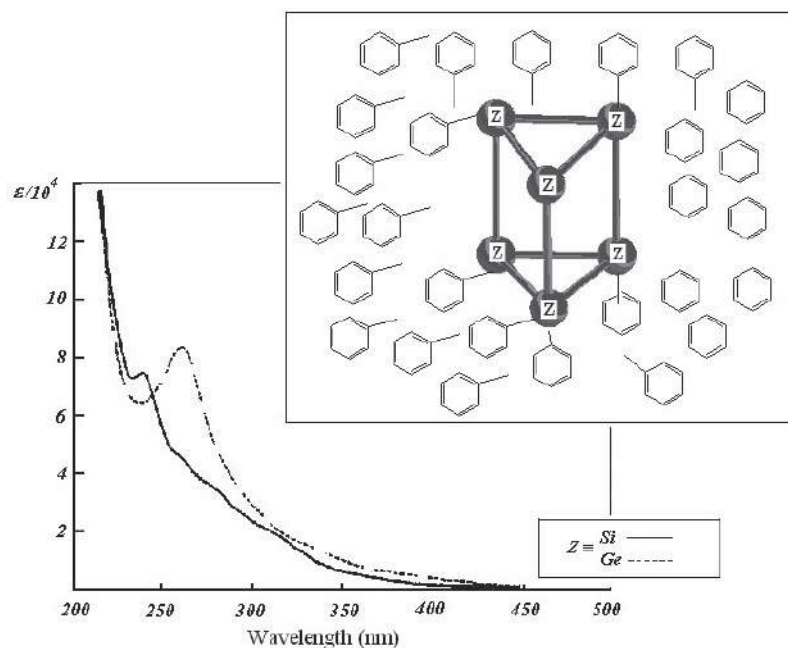


Fig. 1 Electronic absorption spectra of hexasilaprismane Si_6H_6 and hexagermaprismane in hexane

of Si_6Y_6 and its germanium analogue. These prismanes have absorptions tailing into the visible region. For example, Si_6H_6 has an absorption band with a maximum at 241 nm tailing to *ca* 500 nm. The absorption band of Ge_6Y_6 ($Y = 2,6 - i - \text{Pr}_2\text{C}_6\text{H}_3$) has a maximum at 261 nm, which is red-shifted compared to that of Si_6Y_6 because of the higher-lying orbitals of the Ge-Ge bonds [5].

Hexasilaprismane Si_6Y_6 is photosensitive. On irradiation in solution at low temperature with light having wavelength 340–380 nm, new absorption bands appeared at 335, 455 and 500 nm assignable to the absorption bands of hexasila-Dewar benzene. Upon excitation of these bands with wavelengths longer than 460 nm, Si_6Y_6 was immediately regenerated. A single chemical species was produced during the photochemical reaction since the bands of Si_6Y_6 (with single Si-Si-bonds) and those assigned to Si_6Y_6 (with double Si-Si-bonds) appeared and disappeared simultaneously.

The lowest energy absorption is forbidden when the cubane has high symmetry, but becomes weakly allowed when the symmetry is lowered. MIEHT- α calculations [1] show that the spectrum shape in the low energy region depends strongly on the substituents.

The kinetic stability of tetrasilatetrahydride (Si_4H_4), hexasilaprismane (Si_6H_6) and octasilacubane (Si_8H_8) depends strongly on the steric bulkiness of the substituents (matrix). The silyl-substituted Si_nY_m ($Y = t\text{-Bu}$) is stable in an inert atmosphere, but is oxidized in air to give colourless solids. The 1,1,2-trimethylpropyl-substituted Si_nY_m ($Y = \text{C Me}_2\text{CH Me}_2$) is very

stable even in air and survives for two weeks in the solid state. Most probably, the, small HOMO-LUMO gap of 13 makes it possible that the Si = Si double bonds undergo formally symmetry forbidden [2 + 2] thermal reaction.

All cubanes of Si, Ge and Sn are coloured from yellow to purple [6]. The silyl-substituted octasilacubane (Si_8Y_8 , $\text{Y} = t - \text{Bu}$) was synthesized as bright yellow crystal. A diffuse reflection absorption of Si_8H_8 is red-orange. The UV/Vis spectrum of Si_8Y_8 ($\text{Y} = \text{C Me}_2\text{CH Me}_2$) exhibits absorption bands at 252,350 nm and around 500 nm [7]. Aryl-substituted octasilacubane were prepared by the dechlorinative reactions of $\text{Ar Cl}_2 \text{ SiSi Cl}_2 \text{ Ar}$ and of ArSi Cl_3 and was isolated as orange crystal with Mg/MgBr_2 reagent [7]. The spectrum depends on the type of the aryl substituent. The absorption band at around 240 nm is attributed to the $a-a^*$ transition, while the absorption at around 280 nm is caused by transition from a $a-n$ mixing between the orbitals of the Si-Si σ bonds and the aromatic π orbitals.

STRUCTURAL DEPENDENCE OF THE BAND GAP

G. Allan with coworker's shows that the radiative recombination rate in spherical silicon nanocrystals (calculated as in Ref. [1]). It is low and it decreases for smaller band gap because of the indirect bulk band gap. In this regard, it would be of interest to use a direct gap phase of silicon such as Si-III (BC8) or to use materials like SiGe alloys or amorphous silicon because the disorder breaks the selection rules. But an essential question arises about the existence of quantum confinement effects in disordered materials. Here we describe recent results that we have obtained on these problems.

The Si-III (BC-8) crystal phase is obtained for t bulk samples by releasing the pressure on the high-pressure *beta-tin* phase (Si-II). Existing theoretical calculations show that the valence band maximum and the conduction band minimum occur at the same H point in the Brillouin zone. BC-8 silicon is thus a direct gap material but the calculations conclude that it is close to a zero gap semiconductor. To calculate the electronic structure of BC-8 crystallites with size in the 1-3 nm range, we have chosen the same non-orthogonal ETB technique as used for silicon crystallites with the diamond structure but we have developed a specific parameterization for that structure.

Our results show that the confinement effect is quite similar for BC-8 and diamond clusters. The only difference when one goes from the BC-8 cluster to the diamond one with the same size comes from the bulk gap value which simply shifts the cluster gap energy. We have also performed PDFT calculations. One

can see that the values calculated with PDFT for two small clusters and shifted by 0.6 eV to take into account the underestimation of the bulk gap, are in very good agreement with our ETB calculation. This confirms the transfer-ability of the ETB parameters from the bulk material to clusters.

Experimentally, it was shown [6, 7] than the BC-8 structure is obtained upon release of a high pressure on porous silicon. But the luminescence band remains practically unchanged except perhaps for a small shift (of order 0.1—0.2 eV) after release of the pressure. This finding completely disagrees with our predictions, where this redshift should amount to ~ 1 eV for crystallites of the same size. This would rule out quantum confinement as the origin of the observed luminescence band and favor other possibilities. We compare the variation of the recombination rate as a function of the cluster gap for the BC-8 and the diamond structures. Because it has a direct bulk band gap, the recombination rate in the BC-8 phase remains constant and pretty high) when the cluster size increases and the blue shift decreases. It is of the order of a few ms^{-1} (i.e. more than 10^3 times larger than in the diamond phase below 2 eV), but remains however lower than the result for GaAs ($\sim \text{ns}^{-1}$) which is also a direct gap semiconductor. However, the luminescence yield must be strongly improved for the BC-8 structure compared to the diamond structure.

With improved optical properties compared to silicon, $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ alloys are also interesting materials. We have studied the strong confinement effects in SiGe clusters performing ETB calculations with the parameters. We consider spherical clusters passivated by hydrogen atom where the atomic sites are occupied randomly by Si or Ge atoms following the composition x . Our results shows that the band gaps of $\text{Si}_{0.8}\text{Ge}_{0.2}$ and Si clusters are quite close, with comparable blue-shift. This is due to the fact that the electronic states in bulk SiGe alloys are still delocalized, so they experience the full confinement effect as for crystalline Si (c-Si).

We now analyze the case of stronger disorder as obtained in amorphous silicon (a-Si). It raises extremely interesting problems related to the confinement induced blue shift of the energy gap: (a) does it exist in clusters of a-Si and is it comparable to what is obtained for c-Si; (b) what is the behavior of disorder-induced localized states in this regard. It has been often assumed that quantum confinements effects are small in a-Si nanostructures due to the short coherence length of free carriers in these materials. We will see that it is not true.

We calculate the electronic structure of a-Si and a-Si:H spherical clusters using the ETB and PDFT model.

The interaction parameters are limited to first-nearest neighbors and the usual d^{-2} Harrison law can be used to calculate their variation with interatomic distance d . The starting structure for the a-Si or a-Si:H clusters is obtained by selecting the atoms belonging to the respective atoms unit cell. Due to the new boundary conditions the structure is no more in equilibrium and we have thus relaxed the atomic positions using a Keating potential.

A generally accepted picture of the electronic structure of a-Si is that it is still composed of valence and conduction bands separated by an energy gap but with band tails of defect or disorder-induced localized states extending into the gap. For what follows we find it useful to classify the electronic states into three categories: delocalized states, experiencing the full confinement effect as for c-Si; strongly localized states with extension in space much smaller than the cluster diameter and energies deep in the gap, insensitive to the confinement effect and showing no blue shift; weakly localized states with extension in space of the order of the cluster diameter and energies near the gap limits, subject to an intermediate blue shift.

To characterize the luminescence of our a-Si clusters with (1-2.5) nm size we have first computed their fundamental gap, i.e. the distance in energy between the HOMO (highest occupied molecular orbital) and the LUMO (lowest unoccupied molecular orbital). There is a substantial blue shift in both cases, more important for a-Si than for a-Si:H. Furthermore, our larger a-Si clusters give rise to a two-peak distribution. We have checked that the lower and upper peaks


are, respectively, due to strongly and weakly localized or delocalized states. The relative intensity of the upper peak thus corresponds to the proportion of nanoclusters which do not contain strongly localized states. The apparent blue shift in a-Si clusters has thus two origins: (a) the varying proportion of clusters with strongly localized states and (b) the normal confinement effect on the other states. This is confirmed on the sapie figure by the a-Si:H clusters which show only the second type of behavior.

CONCLUSION

Thus we have discussed in detail the theoretical calculations on the band gap of quantum-dimensional systems on the basis of the silicon atomic nanoclusters. One of the main conclusions is that the comparison between theory and experiments shows the possibility of different radiative channels for the recombination in porous silicon which is a complex material.

The mechanism by which Si_nY_m with chloral atoms is formed is not clear, but the first step involves the electrophilic attack by PCl_5 on the strained Si-Si bond, followed by an intramolecular skeletal rearrangement. Bromo and iodo derivatives of Si_nY_m are also formed by the reactions of Si_8Y_8 with Br_2 and with I_2 . Octasilacubanes were used as a model in an attempt to understand the optical properties of porous silicon because both porous silicon and octasilacubane show a broad photoluminescence spectra and large Stokes shifts. Si_8Y_8 , $\text{Y} = t - \text{Bu}$, for example, shows an absorption edge at ca 3,2 eV and a broad photoluminescence spectrum with a peak at 2,50 eV. At the [1, 4, 5, 11] more detail information of the processes of matrix influence on the polyhedral DSP are gives.

REFERENCES / СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Kovalchuk V.V. Cluster Modification Semiconductor's Heterostructures. — Kiyv: Hi-Tech, 2007. — 309 p.
2. Keghelian P., Melinon P., Perez A. Properties of silicon and silicon-carbon cluster assembled films // *Nano Structured Materials*. — 2009. — v. 12. — P. 277—280.
3. Chen X., Zhao J., Wang G., Shen X. The effect of size distributions of si nanoclusters on photoluminescence from ensembles of si nanoclusters // *Phys. Lett. A*. — 1999. — v. 212. — p. 285—289.
4. Kovalchuk V. The optical properties, stability and reactivity of solid nanocluster subsystem // *Photoelectronics*. — 2011. — № 20. — p. 53—58.
5. Kovalchuk V., Smorgh M. Nanometrology: optical properties of Si-nanoclusters // *Metrology & Instruments*. — 2019. — № 2. — c. 52—56.
6. Kamenutsy Y., Suzuki K., Kondo M. Luminescence properties of a cubic silicon cluster octasilacubane // *Phys. Rev.* — 1992. — B 51. — P. 10666—10669.
7. Kanzawa Y., Kageyama, Takeoka S., Fujii M., Hayashi S., Yamamoto K. Size-dependent near-infrared photoluminescence spectra of Si nanocrystal embedded in SiO2 matrices // *Sol.St.Com.* — 2007. — v. 102. — P. 533—537.
8. Wiberg N., Finger C.M.M., Auer H., Polborn K. Supersilylated disilenes, cyclotrisilanes, cyclotetrasilanes and tetrahydrosilanes: Production, structures and formation // *J. Organometallic Chem.* — 1996. — v. 521(1—2). — P. 377—386.
9. Sita L.R., Kinoshita I. Decakis (2,6-diethylphenyl) decaoctastanna [5] prismane-characterization and molecular structure // *J.of the Am.Soc.* — 1991. — v. 113(5) — P. 1856—1857.
10. Sita L.R., Kinoshita I. Octakis (2,6-diethylphenyl) octastannacubane // *Organometallics*. — 2000. — v. 9(11). — p. 2865—2867.
11. Kovalchuk V., Smorgh M. Metrology of the real nanoclusters: structure and optical characteristics // *Metrology & Instruments*. — 2020. — № 1. — c. 56—60. 

Отримано / received: 28.09.2020.

Стаття рекомендована до публікації д.ф.-м.н., проф. О.В. Тюрнім (Україна).
Prof. O.V. Tiurin, D. Sc. (Phys-Mat.), Ukraine, recommended this article to be published.

DOI: 10.33955/2307-2180(5)2020.64-68

УДК 621.81:621.253.2

АКТУАЛЬНІ ПИТАННЯ РОЗРОБЛЕННЯ НОРМАТИВНОЇ ОСНОВИ МЕТРОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОЦЕСУ КОНТРОЛЮ ТА УПРАВЛІННЯ ЕТАЛОННИМИ СИГНАЛАМИ ЧАСУ І ЧАСТОТИ У ЗБРОЙНИХ СИЛАХ УКРАЇНИ

Pressing Questions of Working Out of a Standard Basis of Metrological Maintenance of Process of the Control and Management of Reference Signals of Time and Frequency in Armed Forces of Ukraine

О. В. Дзисюк, начальник Метрологічного центру,
В. М. Бойко, начальник науково-дослідного відділу,
заступник начальника центру,
В. В. Тішкін, головний інженер,
заступник начальника центру,
Метрологічний центр військових еталонів ЗС України,
Харків, Україна,
e-mail: vicboy@ukr.net

O. V. Dzisjuk, the chief of the Metrological centre,
V. M. Bojko, the chief of research department,
the deputy chief of the Center,
V. V. Tishkin, the chief engineer,
the deputy chief of the Center,
Metrological centre of military standards
of Armed Forces of Ukraine, Kharkiv, Ukraine,
e-mail: vicboy@ukr.net

Представлено результати узагальненого аналізу стану нормативної основи системи метрологічного контролю та управління еталонними сигналами часу і частоти — керівних і нормативних документів, що визначають зміст, організацію та порядок планування робіт, спрямованих на забезпечення єдності й точності вимірювань часу і частоти, та забезпечення частотно-часовою інформацією споживачів Збройних Сил (ЗС) України. Визначено озброєння та військову техніку, яка потребує суттєвого удосконалення системи частотно-часового забезпечення. На сьогодні актуалізованого нормативного забезпечення процесу метрологічного контролю і управління еталонними сигналами, що використовуються ЗС України, фактично не існує. Розроблені пропозиції щодо складу нормативного забезпечення системи метрологічного контролю та управління еталонними сигналами часу і частоти, що використовуються ЗС України та іншими військовими формуваннями, які спрямовані на реалізацію повноти використання еталонних сигналів часу і частоти та сигналів глобальних навігаційних супутникових систем з урахуванням їх особливостей.

In article results of the generalized analysis of a condition of a standard basis of system of the met-

rological control and management of reference signals of time and frequency — supervising and standard documents which define mission, the organization and an order of scheduling which are directed on maintenance of unity and accuracy of measurements of time and frequency, and maintenance with the time-and-frequency information of consumers of Armed forces of Ukraine are presented. Taking into account the analysis of planned equipment of Armed forces of Ukraine perspective samples of arms and the military (special) techniques and world tendencies of development of arms and the military techniques, define techniques who demands essential improvement of system of time-and-frequency maintenance. The basic tasks which are assigned to metrological services of the Ministry of Defense of Ukraine in the field of time-and-frequency maintenance are systematized. For today actually there are no actual standard supports of process of the metrological control and management of reference signals which are used by Armed forces of Ukraine. Offers on structure of standard maintenance of system of the metrological control and management of reference signals of time and frequency which are used by Armed forces of Ukraine and other military formations which are directed on realization of completeness of use of reference signals of time and frequency and signals of global navigating satellite systems taking into account their features are developed.

Ключові слова: частотно-часове забезпечення, еталонні сигнали, контроль та управління сигналами.
Keywords: time-and-frequency maintenance, reference signals, control and management of signals.

За сучасних умов забезпечення воєнної безпеки України повинно здійснюватися шляхом оснащення Збройних Сил України перспективним озброєнням і військовою технікою (ОВТ) як вітчизняного виробництва, так і постачанням ОВТ іноземного виробництва [1].

У зв'язку з цим питання розвитку системи метрологічного забезпечення й її складової частини — частотно-часового забезпечення (ЧЧЗ) ОВТ на всіх етапах їх життєвого циклу набуває відповідних пріоритетів [2].



О. В. Дзисюк



В. М. Бойко



В. В. Тішкін

У державі функціонує Служба єдиного часу та еталонних частот, яка здійснює міжгалузеву координацію та виконання робіт, спрямованих на забезпечення єдності вимірювань часу і частоти та надання частотно-часової інформації, в тому числі у сфері оборони. У ЗС України для виконання завдань за призначенням необхідно [3] функціонування системи, яка спрямована на постійне контрольоване забезпечення еталонними сигналами часу і частоти споживачів ЗС України та інших військових формувань. Завдання та основні засади Служби єдиного часу та еталонних частот визначено в Положенні [4] як «систему структурних підрозділів, підприємств, установ та організацій, що постійно проводять науково-методичну роботу щодо вимірювання часу і частоти в єдиних на всій території України одиницях і шкалах та забезпечення споживачів частотно-часовою інформацією з відповідною технічною базою».

Метрологічний контроль системи ЧЧЗ — комплекс заходів, спрямованих на досягнення єдності та достовірності вимірювань еталонних сигналів часу і частоти, координатних вимірювань глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС) та точності їх передавання споживачам ЗС України.

Система метрологічного контролю та управління сигналами часу і частоти, як складна організаційно-технічна система, потребує відповідного удосконалення технічної, організаційної й нормативної основ виконання завдань забезпечення єдності й точності вимірювань еталонних сигналів часу і частоти, оперативного контролю та управління передаванням еталонних сигналів, які використовуються ЗС України та іншими військовими формуваннями.

Існують нормативні документи вищого рівня [2—4], що визначають завдання, пов'язані зі системою метрологічного контролю та управління еталонними сигналами. Положенням про Службу єдиного часу та еталонних частот визначено завдання та основні засади діяльності Служби єдиного часу та еталонних частот. Згідно з Положенням Службу очолює Глобальний центр, який є структурним підрозділом Національного наукового центру «Інститут метрології». Для виконання робіт, спрямованих на забезпечення єдності вимірювань часу і частоти та надання частотно-часової інформації споживачам у сфері оборони, до Служби має входити структурний підрозділ Метрологічного центру військових еталонів ЗС України, що здійснює оперативний контроль еталонних сигналів, які використовуються ЗС України, та забезпечує єдність та точність ви-

мірювань часу і частоти у ЗС України та інших військових формуваннях.

Нормативна основа системи контролю і управління сигналами часу і частоти — керівні та нормативні документи, що визначають зміст, організацію та порядок планування робіт, спрямованих на забезпечення єдності й точності вимірювань часу і частоти та забезпечення частотно-часовою інформацією споживачів ЗС України й інших військових формувань, а також керівні нормативні документи Державної служби часу і частоти.

Актуальні вимоги — гармонізація військових нормативних документів у сфері вимірювань часу і частоти за вимогами державних та міжнародних нормативних документів, розроблення пропозицій та участь у реалізації програм і планів державної стандартизації.

На сьогодні нормативне та методичне забезпечення функціонування діяльності систем контролю ЧЧЗ ЗС України та інших військових формувань у питаннях вирішення завдань оперативного контролю та управління передаванням еталонних сигналів фактично відсутнє.

Формування та удосконалення нормативної основи системи контролю частотно-часового забезпечення ЗС України повинні бути спрямовані на реалізацію політики використання еталонних сигналів часу і частоти та сигналів ГНСС у ЗС України [5, 6] з урахуванням можливих ризиків.

Мета статті — визначення й обґрунтування пропозицій щодо розроблення нормативної основи метрологічного забезпечення процесу контролю та управління еталонними сигналами часу і частоти в ЗС України.

ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Комплексне рішення проблем створення ефективної системи контролю та управління еталонними сигналами часу і частоти, що використовуються у ЗС України, визначає ефективне й якісне виконання вимог до складових основ системи, включаючи нормативну складову. В свою чергу, нормативна основа системи визначається з урахуванням планового оснащення ЗС України перспективними зразками озброєння та військової (спеціальної) техніки, та визначення світових тенденцій розвитку озброєння (рис. 1).

У ЗС України повинна функціонувати система, яка спрямована [7, 8] на постійне, контрольоване забезпечення еталонними сигналами часу і частоти серверів цифрових систем і засобів зв'язку, автоматизованих систем контролю та управління, передавання й опрацювання



Рис. 1. Озброєння і військова (спеціальна) техніка, які потребують суттєвого удосконалення системи частотно-часового забезпечення

Fig. 1. Weapons and military (special) equipment that require significant improvement of the frequency-time support system

інформації; систем оперативного керування військами, полігонними вимірювальними комплексами, створення єдиного інформаційного простору ЗС України. Рівень складу нормативної основи системи контролю та управління частотно-часовим забезпеченням суттєво залежить від рівня виконання завдань, які покладені у сфері частотно-часового забезпечення на відповідні служби метрології Міністерства оборони України та Збройних Сил України.

Нормативну основу системи контролю частотно-часового забезпечення ЗС України становлять нормативні документи, що визначають зміст і організаційне вирішення відповідних робіт. Формування та удосконалення нормативної основи системи контролю та управління еталонними сигналами у ЗС України повинні бути спрямовані на реалізацію політики використання еталонних сигналів часу і частоти та сигналів ГНСС у ЗС України з урахуванням можливих ризиків.

Розвиток нормативної основи вказаної системи має здійснюватися шляхом:

- розроблення документів, що регламентують види еталонних сигналів, які дозволено використовувати у ЗС України, визначають порядок їх використання, контролю та управління передаванням сигналів;
- розроблення документів, які регламентують порядок забезпечення єдності й точності вимірювань часу і частоти;
- створення актів, що визначають суб'єкти системи контролю частотно-часового забезпечення ЗС України та вимоги щодо їх взаємодії;
- регламентації заходів із взаємодії у напрямку забезпечення ЗС України еталонними сигналами як в мирний час, так і за умов особливого періоду.

Згідно з [2] принциповим завданням основної організації з метрологічної діяльності у Міністерстві оборони України та ЗС України — Центрального управління метрології та стандартизації — є розроблення нормативно-правових документів з питань метрологічного забезпечення.

Особливо необхідно вказати на завдання Метрологічного центру військових еталонів Збройних

Сил України — головної організації з військово-метрологічного супроводження ОВТ на всіх етапах його життєвого циклу. Згідно з [3] основними завданнями Метрологічного центру військових еталонів Збройних Сил України є:

- здійснення оперативного контролю еталонних сигналів часу і частоти у ЗС України та інших військових формуваннях;
- формування шкали часу у взаємодії зі структурними підрозділами Служби єдиного часу та еталонних частот та здійснення оперативного контролю сигналів;
- координація функціонування розподіленої (із використанням сил і засобів регіональних метрологічних військових частин) системи контролю частотно-часового забезпечення ЗС України;
- науково-технічне забезпечення зберігання, експлуатації, дослідження та удосконалення вихідного еталона часу і частоти ВЕЗСУ 07-01-01-09, забезпечення необхідного рівня точності відтворення одиниць фізичних величин і передавання їх розмірів робочим еталонам військових метрологічних лабораторій;
- розроблення науково-технічних, нормативних документів, методичних рекомендацій та військових стандартів з метрологічного забезпечення військових частин та установ у мирний час та в особливий період.

Формування та удосконалення нормативної основи системи контролю та управління еталонними сигналами часу і частоти повинні бути спрямовані на реалізацію політики використання еталонних сигналів часу і частоти державної служби та сигналів ГНСС.

Обов'язково необхідно також урахувати сучасне оснащення ЗС України зразками (комплексами) військової (спеціальної) техніки, включаючи військову техніку іноземного виробництва.

За результатами проведених досліджень розвиток нормативної основи системи контролю частотно-часового забезпечення ЗС України має здійснюватися таким шляхом.

Розроблення документів, що регламентують види еталонних сигналів, які дозволено використовувати у ЗС України, визначають порядок їх використання, контролю та управління передаванням еталонних сигналів. На сьогодні практично не виконується функція передавання споживачам еталонних сигналів часу і частоти та шкал часу за відсутності державної системи забезпечення (у межах кордонів України) користувачів сигналами єдиного часу та еталонних частот. «Аналогова» система пе-

редавання сигналів фактично зруйнована і себе вичерпала, а «цифрова» система потребує розбудови. У сфері використання сигналів ГНСС необхідне розроблення військового стандарту, який регламентує порядок забезпечення єдності й точності вимірювань часу і частоти у ЗС України [6, 9].

Застарілі стандарти ДСТУ 2681-94, ГОСТ 12.3.019-80 (нормативні документи для розроблення військового стандарту) — їх чинність перевіряють згідно з офіційним виданням національного органу стандартизації — каталогом нормативних національних документів та каталогом військових нормативних документів.

Пропонований військовий стандарт повинен установлювати основні положення методики періодичної повірки супутникової навігаційної апаратури для наземних і транспортних засобів озброєння.

Обов'язкові питання стандарту: операції повірки (перелік), засоби повірки (перелік), вимоги до кваліфікації фахівців, умови повірки, порядок проведення повірки, випробування (перевірка функціонування) супутникової апаратури, визначення метрологічних характеристик.

Актуальним напрямком розвитку нормативної основи ЧЧЗ є розроблення документів, які встановлюють вимоги до інформативного обслуговування споживачів еталонних сигналів ЗС України, — оперативне забезпечення відповідною інформацією органів бойового управління ЗС України за результатами метрологічного контролю еталонних сигналів часу і частоти (в тому числі й навігаційно-часового поля ГНСС).

Необхідне удосконалення керівних і нормативних документів, які регламентують порядок забезпечення єдності й точності вимірювань часу і частоти у ЗС України. На сьогодні єдність і точність вимірювань забезпечується у відповідності з Військовою метрологічною схемою передавання розміру одиниць часу і частоти (ВМС 07.01-09) під час передавання розміру одиниць часу і частоти від вихідного еталона ЗС України (ВЕЗСУ 07-01-01-09) робочим еталонам регіональних метрологічних військових частин та робочим еталонам і засобам виміральної техніки інших військових метрологічних лабораторій і військових частин. За виконання такої роботи метрологічною службою еталонні сигнали не використовуються (сигнали шкал часу, які передаються в комп'ютерних мережах, і сигнали ГНСС — не регламентуються нормативним документом).

Відсутні нормативні документи, які регламентують заходи із взаємодії між суб'єктом Служби єдиного часу та еталонних частот у напрямку забезпечення

ЗС України та інших військових формувань еталонними сигналами як в мирний час, так і за умов особливого періоду. Основні заходи: забезпечення відтворення, зберігання та передавання розмірів одиниць часу і частоти у ЗС України; забезпечення формування та зберігання шкали часу вихідного еталона ЗС України та порівняння її з Національною шкалою часу *UTC (UA)*; оцінка точності передавання еталонних сигналів технічними засобами та доведення такої інформації до споживачів.

Першочерговими завданнями з питань удосконалення нормативної основи системи метрологічного контролю та управління еталонними сигналами часу і частоти у сфері оборони треба вважати розроблення та затвердження:


- Положення про взаємодію Метрологічного центру військових еталонів ЗС України та Головного центру Національного наукового центру «Інститут метрології»;
- Положення про функціонування системи контролю та управління передаванням еталонних сигналів часу і частоти у ЗС України;
- Положення про метрологічне забезпечення серверного обладнання системи передавання (приймання) еталонних сигналів часу і частоти у ЗС України.

Реалізація концептуальних проблем оснащення ЗС України перспективним озброєнням і військовою (спеціальною) технікою зумовлює принципове удосконалення всіх видів забезпечення, в тому числі й системи метрологічного забезпечення. У межах досягнення єдності вимірювань та достовірності контролю параметрів об'єктів вимірювань військового призначення, одним із пріоритетів є розвиток військового сегмента Служби єдиного часу та еталонних частот у напрямку розвитку системи контролю та управління передаванням еталонних сигналів часу і частоти, що використовуються у ЗС України та інших військових формуваннях.

ВИСНОВКИ

1. Визначено й систематизовано основні тенденції розвитку озброєння і військової (спеціальної) техніки, які потребують суттєвого удосконалення системи частотно-часового забезпечення.
2. Визначено й обґрунтовано основні питання розвитку нормативної основи процесу контролю та управління еталонними сигналами часу і частоти у ЗС України.
3. Визначено першочергові завдання з питань удосконалення нормативної основи у цій сфері за сучасних умов оснащення ЗС України військовою (спеціальною) технікою.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Воєнна доктрина України. Затверджено Указом Президента України від 24.09.2015 р. №555/2015 (The military doctrine of Ukraine. It is confirmed by the Decree of the President of Ukraine from 24.09.2015 №555/2015).
2. Положення про метрологічну службу Міністерства оборони України та Збройних Сил України. Затверджено Наказом Міністра оборони України від 24.05.2017 р. №288 (Positions about metrological service of the Ministry of Defense of Ukraine and Armed forces of Ukraine. It is confirmed by the Order of the Ministry of Defense of Ukraine from 24.05.2017 №288).
3. Зміни до Положення №288. Наказ Міністра оборони України від 29.12.2018 р. №676 (Changes to Position №288. The order of the Minister of Defense of Ukraine from 29.12.2018 №676).
4. Положення про Службу єдиного часу та еталонних частот. Затверджено Постановою Кабінету Міністрів України від 02.09.2015 р. №604 (Position about Service of uniform time and reference frequencies. It is confirmed by the Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine from 02.09.2015 №604).
5. Шевцов М.М. Сучасні вимоги до програмно-апаратного комплексу з повірки, випробувань і сертифікації апаратури споживачів глобальних навігаційних супутникових систем / М.М. Шевцов, А.Б. Гаврилов, В.М. Бойко, О.В. Шуригін // Озброєння та військова техніка. Науковий журнал ЦНДІ ОВТ ЗС України (Shevtsov M.M. Modern requirements to a hardware-software complex on checking, tests and a hardware complex of global navigating satellite systems / M.M. Shevtsov, A.B. Gavrilov, V.M. Bojko, O.V. Shurygin // Arms and the military techniques. Scientific journal of a TSNDI of a OVT of Armed forces of Ukraine) — Вип. 3 (11). — 2016. — С/Р. 60—65.
6. МПУ 01-021-2006. Метрологія. Супутникова навігаційна апаратура. Методика повірки. (MPU 01-021-2006. Metrology. Satellite navigating equipment. A checking technique).
7. Бойко В.М. Варіант апаратного оснащення програмно-технічного комплексу для створення автоматизованого робочого місця з метрологічної атестації технічних засобів супутникових навігаційних систем / В.М. Бойко, А.Б. Гаврилов, Ю.П. Рондін // ЗНП ХНУПС ім. Івана Кожедуба (Bojko V.M. Variant of hardware equipment of a program-technical complex for creation of the automated workplace on metrological certification of means of satellite navigating systems / V.M. Bojko, A.B. Gavrilov, Ju.P. Rondin // ZNP of HNUPS of a name of Ivan Kozhedub) — Вип. №4(41). — С/Р. 89—95.
8. ВМС 07.01-09 Військова метрологічна схема передавання розміру одиниць часу і частоти (VMS 07.01-09 Military metrological scheme of transfer of the size of time units and frequency).
9. Бойко В.М. Методики удосконалення організаційно-технічної основи забезпечення єдності навігаційно-часових вимірювань у Збройних Силах України / В.М. Бойко, А.Б. Гаврилов, Ю.П. Рондін // Метрологія та прилади (Bojko V.M. Technique of improvement of an organizational-technical basis of maintenance of unity of navigating-time measurements in Armed forces of Ukraine / V.M. Bojko, A.B. Gavrilov, Ju.P. Rondin // Metrology and instruments) — 2012. — №42. — С/Р. 59—64. 

Отримано / received: 16.09.2020.

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

DOI: 10.33955/2307-2180(5)2020.69-72

УДК 681.518.54

ПЕРЕВІРКА ПРОФЕСІЙНОГО РІВНЯ: КАЛІБРУВАННЯ МЕГОММЕТРІВ

Professional Level Check: Calibration of Megohmmeters

І. М. Коржов, доктор філософії, інженер з метрології,
email: troublerbv@gmail.com

О. М. Новомодний, начальник відділу,
email: 330@mtl.kharkov.ua

Державне підприємство «Харківський регіональний
науково-виробничий центр стандартизації,
метрології та сертифікації», Україна,

Р. П. Мигущенко, доктор технічних наук, професор,
проректор,

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут», Україна,
email: mrp1@ukr.net

I. M. Korzhov, doctor of philosophy, metrology engineer,
email: troublerbv@gmail.com

O. M. Novomodnyi, head of the department,
email: 330@mtl.kharkov.ua

State enterprise «Kharkov regional research
and production center for standardization,
metrology and certification», Ukraine,

R. P. Mygushchenko, doctor of technical sciences,
professor, vice-rector,

National Technical University
«Kharkov Polytechnic Institute», Ukraine,
email: mrp1@ukr.net

Представлені дослідження стану технічних компетенцій калібрувальних лабораторій, які брали участь у другому раунді схеми перевірки професійного рівня MetrCentr-PT-C-EM «Дослідження засобів вимірювальної техніки електричних та магнітних величин» з калібрування мегомметрів, проведеним акредитованим провайдером перевірки професійного рівня — Метрологічним центром ДП «Харківський стандартметрологія». Представлено результати калібрувань мегомметра, наданих калібрувальними лабораторіями — учасниками раунду, проведено аналіз документів, наданих учасниками, та наведено результати розрахунку їх статистик робочих характеристик згідно з положеннями EN ISO/IEC 17043:2010. Проаналізовано діяльність акредитованого провайдера перевірки професійного рівня — Метрологічного центру ДП «Харківський стандартметрологія» за реалізації другого раунду з калібрування мегомметрів за схемою перевірки професійного рівня MetrCentr-PT-C-EM «Дослідження засобів вимірювальної техніки електричних та магнітних величин». Проведений аналіз отриманих результатів свідчить стосовно наявної потреби у створенні та використанні стандартизованої методики калібрування мегомметрів, що дасть можливість забезпечити єдиний та зрозумілий підхід до проведення та оформлення результатів калібрування мегомметрів. Представлено висновки стосовно покращення організації та проведення провайдером перевірки професійного рівня раундів з калібрування мегомметрів під час реалізації відповідної схеми перевірки професійного рівня. Наведено результати оцінки технічної компетенції калібрувальних лабораторій — учасників.

The article presents studies of the state of technical competencies of calibration laboratories that took part in the second round of the scheme of proficiency testing MetrCentr-PT-C-EM «Research of measuring equipment of electrical and magnetic quantities» on megohmmeter calibration conducted by an accredited provider Metrological center of SE «Kharkovstandartmetrology». The results of megohmmeter calibration provided by the calibration laboratories — participants of the round are presented, the analysis of documents provided by the participants and the results of calculation of their performance statistics in accordance with the provisions of EN ISO/IEC 17043:2010. The activity of the accredited provider of proficiency testing verification Metrological Center of SE «Kharkovstandartmetrologiya» during the implementation of the second round of calibration of megohmmeters according to the scheme of proficiency testing verification MetrCentr-PT-C-EM «Research of measuring equipment of electrical and magnetic quantities» is analyzed. The analysis of the obtained results indicates the need to create and use a standardized method of calibration of megohmmeters, which will provide a unified and clear approach to the conduct and design of calibration results of megohmmeters. Conclusions are made regarding the improvement of the organization and conducting by the provider of proficiency testing verification of megohmmeter calibration rounds during the implementation of the relevant proficiency testing verification scheme. Are given results of the assessment of the technical competence of the participating calibration laboratories.



І. М. Коржов



О. М. Новомодний



Р. П. Мигущенко

Ключові слова: перевірка професійного рівня (кваліфікації), провайдер, координатор, EN ISO/IEC 17043, калібрування, мегомметр.

Keywords: proficiency testing, provider, coordinator, EN ISO/IEC 17043, calibration, megohmmeters.

ВСТУП

Досвід міжнародних організацій *ILAC*, *APLAC*, *EA*, *Eurachem*, *EUROLAB* тощо, свідчить, що перевірка професійного рівня є найбільш об'єктивним методом перевірки технічної компетентності калібрувальних лабораторій [1, 2].

Поширенню застосування перевірки професійного рівня в Україні сприяє прийняття стандарту *EN ISO/IEC 17043* [3], який забезпечує всі зацікавлені сторони узгодженою базою для визначення компетентності організацій, які надають послуги з перевірки професійного рівня (провайдерів перевірки професійного рівня). Також участь у перевірках професійного рівня є необхідною умовою відповідності лабораторії вимогам *ISO/IEC 17025* [4] та перевіряється під час акредитації лабораторії на відповідність *ISO/IEC 17025* [1, 2, 4].

У цій статті розглянуто результати перевірки професійного рівня калібрувальних лабораторій України, які брали участь у другому раунді схеми перевірки професійного рівня з калібрування мегомметрів, проведеного акредитованим провайдером перевірки професійного рівня — Метрологічним центром ДП «Харківстандартметрологія» (атестат № 50003 від 03.12.2018 р.) [5].

Мета статті полягає в дослідженні стану технічних компетенцій калібрувальних лабораторій, які брали участь у другому раунді схеми перевірки професійного рівня з калібрування мегомметрів, (учасників) та в аналізі діяльності акредитованого провайдера перевірки професійного рівня — Метрологічного центру ДП «Харківстандартметрологія» (провайдера).

ОРГАНІЗАЦІЯ ТА ПРОВЕДЕННЯ
РАУНДУ ПЕРЕВІРКИ
ПРОФЕСІЙНОГО РІВНЯ

У рамках схеми перевірки професійного рівня *MetrCentr-PT-C-EM* «Дослідження засобів вимірювальної техніки електричних та магнітних величин» провайдером проведено два раунди з калібрування мегомметрів. Звіт за результатами другого раунду схеми перевірки професійного рівня № С-08-02-П/20 [6] з калібрування мегомметрів опубліковано на офіційній веб-сторінці провайдера (<http://khsms.com/primaryactivity/metrology/about/type/remont/id/23>) [5]. Короткий опис другого раунду наведено у таблиці 1.

Під час аналізу результатів, наданих учасниками, виявлено, що калібрування у точці 10 МОм проводилося учасниками на різних шкалах, що не було враховано під час планування раунду. У зв'язку

Таблиця 1. Короткий опис раунду

Table 1. Short description of the round

Характеристика	Значення
Зразок перевірки професійного рівня	Мегомметр Ф4102/1
Точки калібрування	10 МОм; 50 МОм; 100 МОм
Період проведення раунду	з 17.06.2019 до 13.07.2020
Кількість учасників	5
Розрахунок статистик робочих характеристик	Числовий показник E_n

Таблиця 2. Результати, надані учасниками

Table 2. Results provided by participants

Шифр учасника		Точки калібрування	
		50 МОм	100 МОм
М0-1	ΔX_{lab}	-6,54 МОм	-1,52 МОм
	U_{lab}	1,15 МОм	1,16 МОм
М0-2	ΔX_{lab}	-5,6 МОм	-4,2 МОм
	U_{lab}	5,8037 МОм	7,2203 МОм
М0-3	ΔX_{lab}	-9,7 МОм	-3,0 МОм
	U_{lab}	2,2 МОм	2,3 МОм
М0-4	ΔX_{lab}	-8,93 МОм	-2,51 МОм
	U_{lab}	0,13 МОм	0,22 МОм
М0-5	ΔX_{lab}	-11,110 МОм	-2,63 МОм
	U_{lab}	0,085 МОм	0,10 МОм

з чим подальший аналіз та опрацювання результатів для зазначеної точки калібрування неможливі.

Виявлений недолік планування проведення раунду схеми перевірки професійного рівня повинен бути врахований провайдером у процесі реалізації подальших раундів [6].

Таблиця 3. Визначений дрейф мегомметра

Table 3. Defined megohmmeter drift

Точки калібрування	Виявлений дрейф d , МОм
50 МОм	3,23 МОм
100 МОм	2,53 МОм

Таблиця 4. Співвідношення розширених невизначеностей учасників

Table 4. The ratio of expanded uncertainties of participants

Точки калібрування	Max U_{lab} , МОм	Min U_{lab} , МОм	Max U_{lab} / Min U_{lab}
50 МОм	5,8037	0,085	≈68
100 МОм	7,2203	0,1	≈72

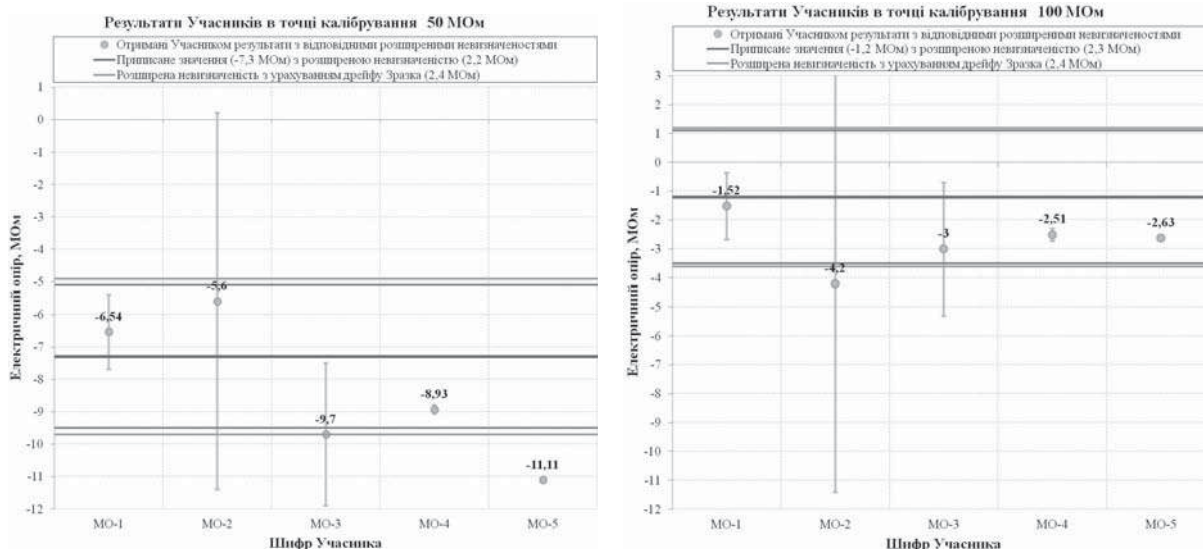


Рис. 1. Результати, надані учасниками, та приписані значення, отримані в референтній лабораторії
 Fig. 1. Results provided by the participants and assigned values obtained in the reference laboratory

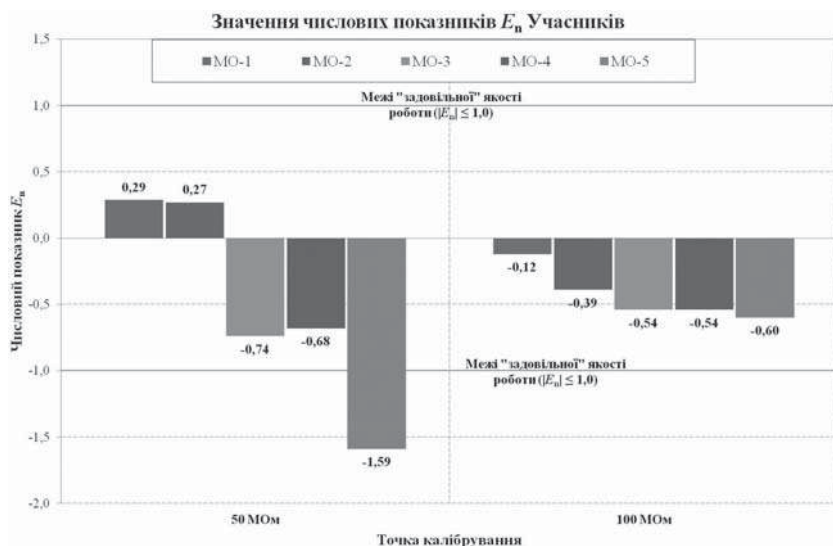


Рис. 2. Результати, надані учасниками, та приписані значення, отримані в референтній лабораторії
 Fig. 1. Results provided by the participants and assigned values obtained in the reference laboratory

На рис. 1 та у таблиці 2 представлено результати, надані учасниками (абсолютні відхилення ΔX_{lab} , з відповідними невизначеностями U_{lab}), та приписані значення, отримані в референтній лабораторії, яка акредитована НААУ на відповідність ISO/IEC 17025 [4], має багатолітній досвід у калібруванні та регулярно бере участь у перевірці професійного рівня, зокрема, отримала позитивні результати у першому раунді з калібрування мегомметрів [6].

Також зазначена лабораторія була залучена для визначення дрейфу зразка перевірки професійного рівня (результати наведено у таблиці 3). Виявлений дрейф d є значним порівняно з розширеною невизначеністю калібрування та повинен враховуватися під час опрацювання результатів учасників:

$$U_{ref} = \sqrt{U^2 + \left[\frac{d}{2\sqrt{3}} \right]^2}, \quad (1)$$

де U_{ref} — розширена невизначеність референтної лабораторії з урахуванням дрейфу (рис. 1), U — розширена невизначеність, отримана в референтній лабораторії без урахування дрейфу [6].

Під час аналізу документів, наданих учасниками, було виявлено використання різних методів калібрування та застосування різних методик калібрування власного розроблення з різними бюджетами невизначеності, які враховують різний набір впливних величин,

що, в свою чергу, відображується у виді суттєво різних розширених невизначеностях (таблиця 4) [6].

Різні підходи до визначення впливних величин та відповідного формування бюджету невизначеності серед учасників наводять на думку стосовно необхідності створення єдиної стандартизованої методики калібрування [6].

РЕЗУЛЬТАТИ РАУНДУ ПЕРЕВІРКИ ПРОФЕСІЙНОГО РІВНЯ

Результати розрахунку статистик робочих характеристик наведені на рис. 2 та у таблиці 5, числові показники E_n розраховані за формулою [1, 3, 6]:

$$E_n = \frac{\Delta X_{lab} - \Delta X_{ref}}{\sqrt{U_{lab}^2 + U_{ref}^2}}, \quad (2)$$

Таблиця 5. Числові показники E_n Table 5. Numerical indicators E_n

Точки калібрування	Шифр учасника				
	МО-1	МО-2	МО-3	МО-4	МО-5
50 МОм	0,29	0,27	-0,74	-0,68	-1,59
100 МОм	-0,12	-0,39	-0,54	-0,54	-0,60

де ΔX_{lab} , U_{lab} — абсолютні відхилення та відповідна розширена невизначеність, отримана учасником; ΔX_{ref} , U_{ref} — абсолютні відхилення та відповідна розширена невизначеність, отримана в референтній лабораторії [6].

Розраховані числові показники E_n порівнюються з критичними значеннями у такий спосіб:

$|E_n| \leq 1,0$ — «задовільна» якість роботи і не вимагає виконання запобіжних або коригувальних дій;

$|E_n| \geq 1,0$ — «незадовільна» якість роботи і вимагає виконання коригувальних дій [1, 3].

За результатами аналізу таблиці 5 можна зробити висновки, що числові показники E_n вказують на «задовільну» якість роботи учасників, окрім учасника МО-5 у точці калібрування 50 МОм, якість роботи якого в цій точці калібрування визнається «незадовільною» [6].

ВИСНОВКИ

Підсумовуючи все, зазначене вище, можливо зробити такі висновки:

1) проведення перевірок професійного рівня акредитованим провайдером перевірки професійного рівня — МЦ ДП «Харківстандартметрологія» є ефективним та об'єктивним засобом для забезпечення єдності вимірювань в Україні, але наявні недоліки в організації раундів та підборі зразків, що потребує проведення коригувальних дій;

2) учасники другого раунду схеми перевірки професійного рівня з калібрування мегомметрів отримали позитивні результати та підтвердили свою компетентність з калібрування зазначеного типу засобів вимірювальної техніки (окрім учасника МО-5 у точці калібрування 50 МОм);

3) виявлені під час проведення раунду схеми перевірки професійного рівня з калібрування мегомметрів різні методики калібрування, що застосовуються учасниками, та відповідно різні бюджети невизначеності наводять на думку стосовно необхідності створення стандартизованої методики калібрування мегомметрів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Коржов І.М. Перспективи розвитку теорії і практики контролю та діагностування в розрізі перевірки кваліфікації лабораторій / І.М. Коржов // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». — Х.: НТУ «ХПІ» (Korzhev I.M. Prospects for the development of the theory and practice of control and diagnosis in terms of testing the qualifications of laboratories / I.M. Korzhov. Korzhov // Bulletin of the National Technical University «KhPI». — Н.: NTU «KhPI», 2018. — № 27(1303). — С/Р. 30—34.
2. Величко В.А. та ін. Перевірки професійного рівня. оцінювання учасників на підставі аналізу калібрувальних кривих // The 8 th International scientific and practical conference — Eurasian scientific congress (August 9—11, 2020) Barca Academy Publishing, Barcelona, Spain (Velychko V.A. et al. Perevirky profesiinoho rivnia. otsiniuvannia uchasnykiv na pidstavi analizu kalibruvalnykh kryvykh). 2020. 370 p. — 2020. — С/Р. 129.
3. EN ISO/IEC 17043:2010. Conformity assessment — General requirements for proficiency testing. 2010. 39 p.
4. ISO/IEC 17025:2017 General requirements for the competence of testing and calibration laboratories.— 2017. — 30 p.
5. Офіційна веб-сторінка провайдера перевірки професійного рівня — Метрологічного центру ДП «Харківстандартметрологія» (Official web page of the proficiency testing provider — Metrology Center of Kharkivstandartmetrologiya) URL: <http://khsms.com/primaryactivity/metrology/about/type/remont/id/23> (дата звернення / access date 01.10.2020 p.)
6. Звіт за результатами другого раунду схеми перевірки професійного рівня № С-08-02-II/20 (Report on the results of the second round of the professional level verification scheme № С-08-02-II/20) URL: <https://drive.google.com/file/d/1FiXEEQRY75RgS1RogHVVkImTNJGSZtGq/view> (дата звернення / access date 02.10.2020 p.)

Отримано / received: 16.10.2020.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. Б.М. Горкуновим (Україна).
Prof. B.M. Gorkunov, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.