

АНОТАЦІЯ

Костеров О.О. Удосконалення та дослідження державного первинного еталона одиниці звукового тиску в повітряному середовищі. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 152 «Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка». Національний університет «Львівська політехніка» МОН України, м. Львів, – Інститут комп'ютерних наук, автоматички та метрології, м. Львів, 2021.

Дисертацію присвячено розв'язуванню актуальної науково-технічної проблеми – поліпшуванню метрологічних характеристик державного первинного еталону України одиниці звукового тиску в повітряному середовищі через удосконалювання еталона, комплексне аналізування складових непевності під час калібрування мікрофонів, виявляння та досліджуванню найбільш впливових складових непевності для вдосконалювання методів і засобів вимірювання, які дають змогу зменшувати непевність відтворення та передання одиниці звукового тиску.

За результатами проведених досліджень, направлених на розроблення та вдосконалення еталона одиниці звукового тиску у повітряному середовищі, отримано наступні результати:

1. *Вперше*, за результатами аналізу та дослідження математичної моделі процесу калібрування мікрофонів, встановлено, що основними чинниками, які визначають метрологічні характеристики державного первинного еталона одиниці звукового тиску в повітряному середовищі є оцінки електричного передавального імпедансу, параметрів довкілля, параметрів мікрофонів та розмірів камери малого об'єму;
2. *Вперше*, за результатами проведених досліджень математичної моделі процесу калібрування мікрофонів, запропоновано та впроваджено удосконалену структуру державного первинного еталона одиниці звукового тиску в повітряному середовищі, що дозволило:

- для мікрофонів типу LS1: зменшити непевність їх калібрування на 0.01 дБ – 0.04 дБ;
- для мікрофонів типу LS2: розширити частотний діапазон вимірювань з діапазону (31 Гц – 20 кГц) до діапазону (2 Гц – 25 кГц), крім того, зменшити непевність їх калібрування на 0.02 дБ – 0.05 дБ;

3. *Вперше* встановлено частотні залежності впливу шумів з нормальним розподілом у вимірювальних каналах на стандартний відхил результатів калібрування мікрофонів із використанням моделювання методом Монте-Карло та показано суттєве зростання їх впливу на інфранизьких частотах;

4. *Вперше*, під час уведення поправки на теплопровідність, запропоновано метод для оцінення значення частоти спряження та запропоновано використання в частотній смузі нижче від цього значення - зазначену низькочастотну модель поправки, а у високочастотній області – широкосмугову модель, що забезпечує зменшення непевності у робочому діапазоні частот.

Практичне значення отриманих результатів:

виконано порівняльний аналіз наявних методів та засобів відтворення одиниці звукового тиску в провідних акустичних лабораторіях світу та визначено теоретичні засади вдосконалювання державного первинного еталону України одиниці звукового тиску в повітряному середовищі;

визначено структуру побудови для вдосконалювання державного первинного еталону України одиниці звукового тиску в повітряному середовищі;

створено та введено в експлуатацію вдосконалену еталонну установку для калібрування за тиском лабораторних еталонних мікрофонів у діапазоні частот від 2 Гц до 25 кГц на державному первинному еталоні України одиниці звукового тиску в повітряному середовищі;

розроблено та впроваджено такі методики калібрування: «Державний первинний еталон одиниці звукового тиску в повітряному середовищі ДЕТУ 10-01-11. Методика калібрування еталонної установки УЕ-2ПУ» ДШВК

407539.001 МК (ДП НДІ «Система», м. Львів); «Методика калібрування за тиском вимірювальних мікрофонів на державному первинному еталоні ДЕГУ 10-01-11 в діапазоні частот від 2 Гц до 25 кГц» ДШВК 407629.001 МК (ДП НДІ «Система», м. Львів);

виконано міжнародні ключові звірення COOMET.AUV.A-K5, за результатами яких оновлено 15 рядків вимірювальних і калібрувальних можливостей (СМС) України в царині акустики в Базі даних ключових звірень Міжнародного бюро з мір та ваг (КСДВ ВІРМ).

Перший розділ дисертації присвячено порівняльному аналізу наявних методів та засобів відтворювання одиниці звукового тиску. Розглянуто первинний метод калібрування мікрофонів за тиском. Зазначено, що реалізація одиниці звукового тиску в повітряному середовищі відбувається через калібрування лабораторних еталонних мікрофонів, які завдяки своїм характеристикам є прецизійними перетворювачами.

Зазначено, що на тепер калібрування мікрофонів методом взаємності є фактично єдиним первинним методом калібрування мікрофонів, який використовують всі провідні акустичні лабораторії світу для відтворювання одиниці звукового тиску, а калібрування мікрофонів за тиском дає змогу досягати найвищого рівня точності.

Розглянуто історію виникнення та сучасний стан вимірювань за використання первинного методу калібрування (методу взаємності) та зазначено, що реалізацію цього методу постійно вдосконалюють через урахування впливу тих чинників, що їх раніше нехтували.

Проаналізовано значини непевностей вимірів під час калібрування еталонних мікрофонів у провідних акустичних лабораторіях світу та зазначено, що ці лабораторії постійно слідкують за змінами в реалізації методу калібрування та відповідно вдосконалюють свої акустичні еталони.

Проаналізовано метрологічні характеристики державного еталона ДЕГУ 10-01-00 та зазначено, що вони вже не відповідають сучасному стану вимірювань. За результатами аналізування визначено теоретичні засади

вдосконалювання еталона одиниці звукового тиску в повітряному середовищі, а саме: зменшення непевності визначення електричного передавального імпедансу; зменшення непевності визначення параметрів довкілля, параметрів мікрофонів і геометричних розмірів мікрофонів та акустичних камер малого об'єму, а також зменшення стандартної непевності вимірів за типом А (середнього квадратичного відхилення вимірів).

Другий розділ дисертації присвячено визначанню та оцінюванню впливу джерел непевностей вимірів під час калібрування еталонних мікрофонів. Зокрема, представлено детальну математичну модель процесу калібрування мікрофонів методом взаємності. Подано математичну модель та еквівалентну схему мікрофона; еквівалентну схему вимірювання під час визначення чутливості мікрофонів за тиском, а також формулу обчислювання чутливості мікрофона за тиском у разі використання трьох пар мікрофонів, акустично з'єднаних між собою за допомогою камер малого об'єму.

Розглянуто акустичний передавальний імпеданс системи «мікрофони—камера малого об'єму», коли довжина акустичної хвилі значно більше за розміри цієї камери, тобто, коли газ в камері поводить себе просто як гнучкість. На високих частотах, коли розміри камери малого об'єму є сумірними з довжиною хвилі, цю систему розглядають як однорідну передавальну лінію за умови, що камера малого об'єму має циліндричну форму та діаметр, який дорівнює діаметру діафрагми мікрофона, а також за умови плоскохвильового поширювання сигналу й адіабатичного стискання та розширювання газу.

Подано дві моделі враховування втрат на теплопровідність, описані в міжнародному стандарті ІЕС 61094-2:2009, так звані низькочастотну та широкосмугову моделі.

Зазначено, що на чутливість мікрофонів також впливають величини, які описують властивості газу, що перебуває в камері малого об'єму під час вимірювання (зазвичай це — повітря). Ці величини залежать від умов

довкілля, тобто температури, статичного тиску та відносної вологості під час вимірювання.

Розглянуто схему вимірювання під час калібрування еталонних мікрофонів і зазначено, що для цієї схеми вимірювання головними джерелами непевності є: шуми вимірювальних каналів; часова нестабільність вимірювальних каналів; нелінійність вимірювальних каналів; мала розрядність аналого-цифрових перетворювачів (АЦП) у вимірювальних каналах; велика відстань між мікрофоном-передавачем та еталонним імпедансом, що призводить до появи паразитного імпедансу; перехресні завади між каналами.

Оцінено вплив шумів вимірювальних каналів на непевність результатів калібрування мікрофонів. Оскільки рівень сигналів у вимірювальних каналах суттєво залежить від частоти та типу мікрофонів, що їх калібрують, то для оцінювання впливу шумів на точність визначання електричного передавального імпедансу пари мікрофонів було застосовано аналітичні методи моделювання (метод Монте-Карло).

Оцінено вплив часової нестабільності, нелінійності, розрядності АЦП, паразитного імпедансу та перехресних завод у вимірювальних каналах і розроблено рекомендації щодо структури побудови вдосконаленого державного первинного еталона одиниці звукового тиску в повітряному середовищі.

Проаналізовано вплив параметрів довкілля на акустичний передавальний імпеданс системи «мікрофони—камера малого об'єму» і зазначено, що найбільший вплив на непевність результатів калібрування мікрофонів має непевність визначання температури повітря в камері малого об'єму.

Проаналізовано вплив непевності визначання геометричних розмірів (глибини та діаметру фронтальної порожнини мікрофонів і довжини та діаметру камери малого об'єму), і параметрів мікрофонів (еквівалентного і фронтального об'ємів, резонансної частоти та коефіцієнта втрат) на

непевність оцінки акустичного передавального імпедансу пари мікрофонів та зазначено, що їхній вплив суттєво зростає зі зростанням частоти.

Зазначено, що на непевність вимірів під час калібрування мікрофонів також впливають: непевність встановлення напруги поляризації мікрофонів, непевність визначання параметрів повітря, поява радіально-хвильового руху на високих частотах та схеми включення заземлення мікрофонів під час вимірювання.

У третьому розділі дисертації проаналізовано та оцінено вплив непевності визначання поправки на теплопровідність на результати калібрування. Зазначено, що дві моделі розрахунку цієї поправки (низькочастотна та широкопasmова) дають результати, які значною мірою різняться між собою. Головними, але не єдиними, чинниками, що визначають різницю між запропонованими моделями теплопровідності в діапазоні низьких частот, є: спрощений варіант обчислення обох моделей; некоректне обчислення втрат на торцевих поверхнях камери малого об'єму (діафрагмах мікрофонів) в широкопasmовому рішенні, що призводить до порушення принципу збереження енергії; некоректне врахування впливу нарізі у фронтальній порожнині мікрофона (на низьких частотах розміри нарізі є меншими за розміри ізотермального граничного шару повітря).

Розглянуто альтернативну модель обчислювання поправки на теплопровідність, яка також ґрунтується на моделі теплопровідності в закритій циліндричній порожнині (моделі Гербера), але за збуджувача з нульовим імпедансом.

Зроблено висновки стосовно методики обчислювання чутливості мікрофонів за тиском на державному первинному еталоні.

У четвертому розділі дисертації подано структурну схему вдосконаленої еталонної установки для калібрування мікрофонів за тиском, яку розроблено на основі аналізу чинників, що впливають на непевність виміру під час калібрування мікрофонів.

Подано результати експериментальних досліджень метрологічних характеристик удосконаленої еталонної установки для калібрування мікрофонів за тиском, зокрема, оцінено вплив непевності визначання електричного передавального імпедансу, параметрів довкілля, параметрів мікрофонів, геометричних розмірів мікрофонів і камер малого об'єму та деяких інших величин на стандартну непевність калібрування мікрофонів. Складено бюджет непевності вимірів під час калібрування мікрофонів за тиском.

Подано аналіз результатів двосторонніх ключових регіональних звірень із національним метрологічним інститутом Польщі (Główny Urząd Miar, GUM), який брав участь у звіреннях SSAUV.A-K5, і який виконав функцію лабораторії, яка дала змогу приєднати отримані результати до опорної значини ключового звірення (KCRV) та оцінити ступінь еквівалентності результатів, які отримано на вдосконаленій еталонній установці для калібрування мікрофонів за тиском (результати ДП НДІ «Система»), відносно інших учасників звірень SSAUV.A-K5. Відповідно до технічного протоколу звірень кожен із учасників прокалібрував один мікрофон типу LS1P методом взаємності згідно з міжнародним стандартом IEC 61094-2:2009 та визначив рівень і фазу його чутливості за тиском щодо третинооктавного ряду частот у діапазоні від 2 Гц до 10 кГц. Пілотною лабораторією в цих звіреннях виступила акустична лабораторія GUM.

За результатами, що їх подали учасники звірень, було обчислено односторонні ступені еквівалентності, визначені як різниця між перетвореними результатами ДП НДІ «Система» та KCRV, на кожній частоті як щодо модуля чутливості мікрофона, так і щодо її фази, а також відповідну розширену непевність результатів. Зазначено, що абсолютна значина DoE результатів ДП НДІ «Система» відносно KCRV на всіх частотах є меншою за розширену непевність цих DoE, що свідчить про те, що результати ДП НДІ «Система» є еквівалентними відносно KCRV, отриманих в SSAUV.A-K5, в усьому діапазоні частот.

За отриманими результатами було заявлено оновлені СМС України в царині акустики (15 СМС-рядків), які було опубліковано в КСДВ ВІРМ. Крім того, результати проведених звірень дали змогу порівняти заявлені непевності калібрування лабораторних мікрофонів типу LS1 в ДП НДІ «Система» з іншими учасниками звірень ССАУВ.А-К5.

Ключові слова: лабораторний еталонний мікрофон, метод взаємності, непевність, ключове звірення, одиниця звукового тиску в повітряному середовищі, первинний метод калібрування за тиском, чутливість мікрофона.

ABSTRACT

Kosterov O.O. Improvement and investigation of the national primary measurement standard for the unit of sound pressure in air. Qualifying scientific work on the rights of a manuscript.

Thesis for the decree of Doctor of Philosophy in the specialty 152 «Metrology and information-measuring technology» – Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine, 2021.

The thesis is devoted to the solution of the actual scientific and technical problem – the refining of metrological characteristics of the State primary standard of Ukraine of the unit of sound pressure in the air by improvement of the standard, to the complex analysis of sources of uncertainty during microphone calibration, to the identification and exploration of the most influential components of uncertainty in order to improve the methods and the measuring instruments that will reduce the uncertainty of reproduction and transference of the unit of sound pressure.

The scientific novelty of the obtained results is as follows:

According to the results of research aimed at developing and improving the standard unit of sound pressure in the air, the following results were obtained:

1. For the first time, according to the results of analysis and research of mathematical model of microphone calibration process, it is established that the

main factors determining metrological characteristics of the state primary standard of sound pressure unit in the air are: estimates of electrical transmission impedance, environmental parameters, microphone parameters and small volume camera size;

2. For the first time, based on the results of research of the mathematical model of the microphone calibration process, an improved structure of the state primary standard of the sound pressure unit in the air was proposed and implemented, which allowed:

- for LS1 type microphones: reduce the uncertainty of their calibration by 0.01 dB - 0.04 dB;

- for LS2 type microphones: expand the frequency range of measurements from the range (31 Hz - 20 kHz) to the range (2 Hz - 25 kHz), in addition, reduce the uncertainty of their calibration by 0.02 dB - 0.05 dB;

3. For the first time, the frequency dependences of noise influence with normal distribution in measuring channels on the standard deviation of microphone calibration results using Monte Carlo simulation were established and a significant increase in their influence at infra-low frequencies was shown;

4. For the first time, when introducing the thermal conductivity correction, a method for estimating the coupling frequency value is proposed and the use in the frequency band below this value is proposed - the specified low-frequency correction model, and in the high-frequency region - the broadband model to reduce uncertainty in the operating frequency range.

The practical significance of the obtained results is as follows:

the comparative analysis of the existing methods and means of reproduction of the unit of sound pressure in the air in the world's leading acoustic laboratories has been performed and the theoretical basis of improvement of the standard has been defined;

the structural scheme of the improved national standard of the unit of sound pressure in the air has been defined;

an improved standard unit for pressure calibration of laboratory standard microphones in the frequency range from 2 Hz to 25 kHz of the State primary standard of the sound pressure unit in the air has been created and put into operation;

the following calibration procedures have been developed and implemented: "Calibration procedure of the standard unit UE-2PU of the State primary standard DETU 10-01-11", "Procedure for pressure calibration of the measuring microphones against the State primary standard DETU 10-01-11 in the frequency range from 2 Hz to 25 kHz";

international key comparison COOMET.AUV.A-K5 has been conducted and, as a result, 15 lines of measuring and calibration capabilities in the field of acoustics of Ukraine were updated in KCDB BIPM.

The first chapter of the thesis is devoted to a comparative analysis of existing methods and means of reproducing the unit of sound pressure (USP). The primary method of the calibration of microphones is reviewed. It is noted that the realization of the USP in the air is carried out by the calibration of laboratory standard microphones, which, due to their characteristics, are precision transducers.

It is noted that, as for today, calibration of microphones by reciprocity is in fact the only primary method of microphone calibration, which is used by all world's leading acoustic laboratories for reproducing the USP, and the pressure microphone calibration allows achieving the highest level of accuracy.

The history and the current state of measurements which are using the primary method of reciprocity are considered and it is noted that the implementation of this method is constantly improved by taking into account the influence of those factors that were previously neglected.

The values of measurement uncertainty of the calibration of reference microphones in the world's leading acoustic laboratories are analyzed and it is noted that these laboratories are constantly monitoring changes in the

implementation of the calibration method and improve their acoustic standards accordingly.

The metrological characteristics of the State standard DETU 10-01-00 are analyzed and it is noted that they no longer correspond to the current state of measurements. According to the results of the analysis, the theoretical principles of improving the standard of the USP in the air are determined, namely: reducing the uncertainty of determining the electrical transfer impedance; reducing uncertainty of determining environmental parameters; parameters of microphones and geometric dimensions of microphones and small volume acoustic couplers; as well as - reducing of the type A standard uncertainty of measurements.

The second chapter of the thesis is devoted to determining and evaluating the influence of measurement uncertainty sources during calibration of standard microphones. In particular, a detailed mathematical model of the process of microphone calibration by the reciprocity method is presented. Also, presented are: mathematical model and equivalent microphone scheme; an equivalent scheme of measurement for determining the pressure sensitivity of microphones and a formula for calculating the pressure sensitivity by using three pairs of microphones that are acoustically connected to each other by means of coupler.

The acoustic transfer impedance of a system “microphones-acoustical coupler” has been considered when the acoustic wavelength is much larger than the size of this coupler, i.e. when the gas in the coupler behaves as a simple compliance. At high frequencies, when the dimensions of the coupler is proportional to the wavelength, this system can be considered as a homogeneous transmission line, provided that the coupler has a cylindrical shape and its diameter equals to that of the microphone diaphragm, and assumptions about the plane-wave signal propagation and adiabatic gas compression and expansion are valid.

Two models of heat conduction losses presented by the international standard IEC 61094-2:2009 are reviewed – the so-called low-frequency and broadband solutions.

It is noted that the sensitivity of microphones is also affected by values that describe the properties of the gas in the coupler during the measurements (usually it is air). These values depend on the environmental conditions, i.e. temperature, static pressure and relative humidity during the measurements.

The scheme of measurements during calibration of standard microphones is considered and it is noted that for a such scheme of measurements the main sources of uncertainty are: noise, time instability and nonlinearity of measuring channels; low resolution of analog-to-digital converters in measuring channels; large distance between the transmitter microphone and the reference impedance, that leads to the appearance of a parasitic impedance; cross-talk interference between channels.

The influence of noise of measuring channels on uncertainty of results of microphone calibration has been estimated. Since the signal level in the measuring channels significantly depends on the frequency and type of the calibrated microphones, analytical simulation methods (Monte Carlo method) were used to assess the effect of noise on the accuracy of determining the electrical transfer impedance of a pair of microphones.

Further on, the influence of time instability, nonlinearity, ADC resolution, parasitic impedance and cross-talk in the measuring channels was evaluated and recommendations about the structure of the improved national standard of the USP in the air had been developed.

In addition, the influence of environmental parameters on the acoustic transfer impedance of the system “microphones-coupler” was analyzed, and it was noted that the greatest influence on the uncertainty of the results of microphone calibration has the uncertainty of determining the air temperature in the coupler.

The influence of uncertainty of determining the geometric dimensions (depth and diameter of the microphone front cavity and length and diameter of the coupler) and of microphone parameters (equivalent and frontal volumes, resonant frequency and loss factor) on the uncertainty of estimating of the acoustic transfer

impedance of each pair of microphones was considered and it was noted that their effect increases significantly with increase of frequency.

In the third chapter of the thesis the effect of the uncertainty of determining the thermal conduction correction on the calibration results has been analysed and evaluated. It is noted that the two calculation models of this correction (low-frequency and broadband) give results that differ significantly from each other. The main, but not the only, factors that determine the difference between the proposed models of thermal conduction in the low frequency range are: a simplified version of the calculation of both models; incorrect calculation of losses on the end surfaces of the coupler (microphone diaphragms) in the broadband solution, that leads to a violation of the principle of energy conservation; incorrect accounting of the influence of the notch in the front cavity of the microphone (at low frequencies, the size of the thread is smaller than the size of the isothermal boundary layer of air).

An alternative model of calculating the correction for thermal conduction is considered, which is also based on the model of thermal conduction in a closed cylindrical cavity (Gerber model), but for the driving source with zero impedance.

Conclusions are made regarding the method of calculating the pressure sensitivity of microphones on the state primary standard.

The fourth chapter of the thesis presents a block diagram of an improved standard unit for pressure calibration of microphones which is developed on the basis of the analysis of factors influencing the uncertainty of measurements during the calibration of microphones.

The results of experimental researches of metrological characteristics of the improved standard unit for pressure calibration of microphones are presented, in particular, the influence of assessing the uncertainties is estimated: of electric transfer impedance; of environmental parameters; of microphone parameters; of geometric dimensions of microphones and coupler and of some other values for standard microphone calibration uncertainty. A budget for measurement uncertainty during pressure microphone calibration has been prepared.

An analysis of the results of bilateral key regional comparison with the National Metrological Institute of Poland (GUM), which participated in the CCAUV.A-K5 comparison and which could serve as a laboratory that will link the obtained results to the KCRV and assess the degree of equivalence of the results obtained on the improved standard unit for pressure calibration of microphones (results of DP NDI “Systema”) to other participants of CCAUV.A-K5 comparisons is presented. According to the technical protocol of comparison, each participant had to calibrate one microphone type LS1p by the primary method of reciprocity according to the international standard IEC 61094-2: 2009 and determine the level and phase of its pressure sensitivity for third-octave frequency range from 2 Hz to 10 kHz . The acoustic laboratory GUM acted as a pilot laboratory in this comparison.

Based on the results presented by the participants, unilateral equivalence degrees (DoE) were calculated, which were defined as the difference between the converted results of DP NDI “Systema” and KCRV at each frequency, both for the microphone sensitivity module and for its phase, and the corresponding expanded uncertainty of measurement was calculated. It is noted that the absolute value of DoE of the results of DP NDI “Systema” in relation to KCRV at all frequencies is less than the expanded uncertainty of these DoE, which indicates that the results of DP NDI “Systema” are equivalent to values of KCRV of CCAUV. A-K5 in the entire frequency range.

The obtained results allowed DP NDI “Systema” to present in CCAUV the updated SMS capabilities of Ukraine in the field of acoustic measurements (15 SMS lines), which were published in KCDB BIPM. In addition, the results of the comparison made it possible to compare the stated uncertainties of calibration of laboratory microphones of the LS1 type in the DP NDI “Systema” with other participants in the CCAUV.A-K5 comparison.

Key words: key comparison, laboratory standard microphone, microphone sensitivity, primary method for pressure calibration, reciprocity technique, unit of sound pressure in the air, uncertainty.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Estimating the uncertainty of a primary acoustic standard by numerical methods / V. P. Chalyi, V. V. Parakuda, A. A. Kosterv, N. V. Gaiduk, A. M. Faida // Measurement Techniques. 2005. Vol. 48, iss. 5. P. 438–444
2. Гайдук Н.В., Костеров А.А., Файда А.М., Чалый В.П. Два численных метода оценки неопределенности измерений // Сборник научных трудов 2-го Международного радиоэлектронного форума «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» (МРФ' 2005). – Том VII. Международная конференция «Метрология и измерительная техника» (МК МИТ' 2005). – Харьков: АНПРЭ, ХНУРЭ. – 2005. – С.68-71
3. Чалий В.П., Костеров О.О., Файда А.М. Сучасні методи розрахунку невизначеності у вимірюваннях // III Міжнародний науково-практичний семінар “Проблеми якості та стандартизації в автоматизованих технологіях”. – Збірник доповідей. – Східниця: ЛФІХФ ДП “УкрНДНЦ”. – 2005. – С.50-62
4. Чалий В. П., Паракуда В. В., Гайдук М. В., Костеров О. О., Файда А. М. Оцінювання характеристик точності первинного акустичного еталона методом Монте-Карло / Збірник праць IV Міжнародна науково-технічна конференція “Метрологія та вимірювальна техніка” (Метрологія-2004). – Харків: ННЦ “Інститут метрології”. – 2004. – Том 2 С.133-135
5. Ключові зв'язки державного первинного еталона одиниці звукового тиску в повітряному середовищі / В. Паракуда, В. Чалий, Е. Пасько, О. Костеров, В. Борис // Метрологія та прилади. 2007. №1. С.20–25
6. Чалый В.П., Костеров А.А. Оценивание неопределенности в измерениях методом Монте-Карло и методом численного дифференцирования // Сборник доклады XVII-ти Национален научен симпозиум с международно участие “Метрология и метрологично осигуряване”. – Созопол. – Технический университет София. – Изд. “СОФТТРЕЙД”. – България. – 2007. – С.36-41. (10-14 септември 2007 г.)

7. В.П.Чалий, О.О.Костеров. Метод Монте-Карло та метод числового диференціювання для оцінювання характеристик точності результатів вимірювання // Системи-2008: метрологія, стандартизація, сертифікація. Матеріали науково-технічної конференції, 30-31 жовтня 2008 р., Львів, ДП НДІ «Система» 2008. – С. 139-148
8. Е.В.Пасько, В.П.Чалий, О.О.Костеров, І.Г.Кізлівський, С.В.Кузнєцов. Результати пілотного звірення національних акустичних еталонів України та Росії в інфразвуковому діапазоні частот // Системи-2008: метрологія, стандартизація, сертифікація. Матеріали науково-технічної конференції, 30-31 жовтня 2008 р., Львів, ДП НДІ «Система» 2008. – С. 194-198
9. Ключові звірення державного первинного акустичного еталона в інфразвуковому діапазоні частот / В. Чалий, Е. Пасько, О. Костеров, І. Кізлівський. // Метрологія та прилади. 2012. №1. С. 17–22
10. Ильницкая Т. М., Чалый В. П., Костеров А. А. Применение метода Монте-Карло для оценивания неопределенности ультразвукового эталона // Системи обробки інформації. – 2012. – Вип. 1 (99). – С. 108–112
11. D.Dobrowolska, A.Kosterov / Report on key comparison COOMET.AUV.A-K5: Pressure calibration of laboratory standard microphones in the frequency range 2 Hz to 10 kHz / Metrologia, Volume 53, Technical Supplement, 2016. pp. 22.
12. Костеров О.О., Паракуда В.В. / Особливості звірень державного первинного еталона одиниці звукового тиску в повітряному середовищі з національними еталонами інших держав та міжнародними еталонами / III Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених у царині метрології «Technical Using of Measurement-2017», 24-27 січня 2017 року: тези доповідей / Відп. за вип. Володарський Є.Т. – Київ: Академія метрології України, 2017. – С. 87-88. ISBN 978-617-397-133-0
13. Костеров О.О., Кізлівський І.Г., Шпак О.В. / Стан еталонної бази України в галузі акустичних та ультразвукових вимірювань / Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку

технічного регулювання у сферах виробництва, послуг і торгівлі згідно з вимогами ЄС», 6-8 вересня 2017 року: матеріали конференції – Херсон: Херсонський національний технічний університет, 2017. С. 109-112

14. Nikolaenko A., Pozdeeva V., Kosterov O. Final Report "The comparison of national standards of the sound pressure unit in air through calibration of working standard microphones" // Metrologia. 2018. Vol. 55, iss. 1 A. P. 09001-1–09001-21
15. Костеров О. О. Визначення напрямків вдосконалення Державного первинного еталону одиниці звукового тиску для підвищення точності калібрування мікрофонів у вільному полі // Technical Using of Measurement-2018 : тези доповідей IV Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених у царині метрології (Славське, 13–18 лютого 2018 р.). – 2018. – С. 137–138
16. Костеров О. О. Розвиток еталона одиниці звукового тиску у повітряному середовищі // Метрологія та вимірювальна техніка : тези доповідей XI Міжнародної науково-технічної конференції (Харків, 9–11 жовтня 2018 р.). – 2018. – С. 24–25
17. Костеров О. О. Стратегія 2017-2027 ССАУВ ВІРМ та вдосконалення національного акустичного еталону України ДЕТУ 10-01-11 // Системи-2018 : тези доповідей міжнародної науково-технічної конференції (Львів, 22–23 листопада 2018 р.). – 2018. – С. 29–30
18. Бугайцова П. В., Яцук В. А., Костеров А. А. Анормальность закона распределения при оценивании неопределенности эталона звукового давления в воздушной среде, при определенных неопределенностях температуры // Системи обробки інформації. 2008. Вип. 4(71). С. 63-65
19. Костеров О. О., Паракуда В. В., Шпак О. В. Удосконалення державного первинного еталону України ДЕТУ 10-01-11 для калібрування мікрофонів у вільному полі // Міжнародна конференція метрологів МКМ'2019 (XXIII міжнародний семінар метрологів МСМ'2019) : тези доповідей, до 100-

річчя кафедри інформаційно-вимірювальних технологій (Львів, 10–12 вересня 2019 р.). – 2019. – С. 124–125

20. Костеров О. О., Паракуда В. В., Бубела І. В. Оцінення впливу теплопровідність на непевність вимірювань під час калібрування еталонних мікрофонів // Technical using of measurement-2020 : тези доповідей VI Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених у царині інформаційно-вимірювальних технологій та метрології, 4–7 лютого 2020 р., Славське. – 2020. – С. 73–76