

УДК: 534.621.5
OECD: 01.03.AA

Пригодность лазерной доплеровской велосиметрии (LDV) для калибровки микрофонов давления

Дмитриев П.П.^{1*} Буторина М.В.²

¹ Аспирант

² Д.т.н., доцент, профессор кафедры «Экология и производственная безопасность»

^{1,2} Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»

им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург, РФ

Аннотация

Представлен вариант нового подхода к абсолютной калибровке микрофонов, основанного на прямом измерении скорости акустических частиц с помощью лазерной доплеровской велосиметрии (LDV). Показания скорости диафрагмы микрофона снимаются с помощью специального прибора для измерения вибраций- виброметра марки Polytec. Этот виброметр измеряет изменение положения мембран микрофонов и выдает значения скорости с довольно высоким пространственным разрешением. Это и используется для упрощения процедуры сканирования в сравнительном методе калибровки. Сравнение методов по значениям неопределенностей указывают на хорошее согласование классического метода взаимности и разработанного метода сравнительной калибровки. Результаты оценки звукового давления, полученные с помощью LDV, сравниваются со значениями звукового давления, полученными с помощью эталонного микрофона, откалиброванного методом взаимности. Разница в точности методов составила менее 0,045 дБ.

Ключевые слова: калибровка микрофонов, лазерная доплеровская велосиметрия, виброметры, звуковое давление, метрология.

Suitability of laser Doppler velocimetry (LDV) for calibration of pressure microphones

Dmitriev P.P.^{1}, Butorina M.V.²*

¹ Post-graduate

² DSc, assistant professor, professor of the department of Ecology and industrial safety

^{1,2} Baltic State Technical University «VOENMEH», St. Petersburg, Russia

Abstract

A variant of a new approach to absolute calibration of microphones based on direct measurement of the velocity of sound pressure using laser Doppler velocimetry (LDV) is presented. The microphone diaphragm velocity measurements are performed using a Polytec scanning vibrometer. This vibrometer measures the change in the position of the microphone membranes and outputs velocity values with a fairly high spatial resolution. This is used to simplify the scanning procedure in the comparative calibration method. Comparison of methods by uncertainty values showed good agreement between the classical reciprocity method and developed method of comparative calibration. The sound pressure estimates made using LDV are compared with the sound pressures obtained using a reference microphone calibrated by the reciprocity method. The difference in sensitivity between the methods was no more than 0.042 dB for any of the microphones tested.

*E-mail: pavel.dmitriev03@gmail.com (Дмитриев П.П.)

Keywords: *microphone calibration, laser doppler velocimetry, vibrometers, acoustic pressure, metrology.*

Введение

В микрофонах звук преобразуется в электрический сигнал, который в дальнейшем используется различными устройствами в зависимости от области применения.

Основным техническим параметром микрофона является его чувствительность. Чувствительность микрофона связана с выходным напряжением. Микрофон улавливает звуковые волны и превращает механическую энергию колебаний диафрагмы в электрическую энергию.

Механическая энергия – это уровень звукового давления на диафрагму, она измеряется в децибелах (дБ) или паскалях (Па).

Электрическая энергия – это напряжение на выходе микрофона, оно измеряется в милливольтгах (мВ) или децибел-вольтах (дБВ).

Иными словами, чувствительность микрофона означает, насколько эффективно он превращает давление звуковых волн на диафрагму в электричество. Для точной оценки измеренного уровня звукового давления требуется точная оценка чувствительности. [1]

Под чувствительностью следует понимать отношение напряжения на выходе микрофона к звуковому давлению, которое на него воздействует при определенной частоте (обычно в 1000 Гц), выраженное в мВ/Па. Чувствительность микрофона растет с увеличением значения этого отношения.

Калибровка микрофона по отношению к диагностируемому звуковому давлению помогает определить чувствительность. Известные значения звукового давления также применяются для калибровки любого акустического измерительного оборудования.

Чувствительность может быть определена абсолютным или относительным образом. Абсолютное измерение чувствительности конденсаторных микрофонов обеспечивает первичную калибровку в метрологических лабораториях по всему миру.

Метод относительной калибровки используется для оценки чувствительности типичных микрофонов, используемых в промышленных или исследовательских целях.

Для относительной калибровки чувствительность микрофона выводится из чувствительности эталонного микрофона, измеряющего ту же амплитуду давления, что и тестируемый микрофон. В случае абсолютной калибровки чувствительность тестируемого микрофона оценивается без использования эталонного микрофона. [2]

На сегодняшний день основным методом первичной абсолютной калибровки градуировки микрофонов в мире считается метод взаимности.

При помощи этого метода можно получить хорошую точность при оценке чувствительности (средняя погрешность 0,05 дБ). Метод взаимной калибровки микрофона одобрен Международной электротехнической комиссией (МЭК) и подробно описан в ГОСТ Р МЭК 61094-2-2011 «ГСИ. Микрофоны измерительные. Первичный метод градуировки по давлению лабораторных эталонных микрофонов методом взаимности». Данный стандарт определяет метод определения чувствительности микрофонов по давлению, который позволяет извлечь воспроизводимость и получить необходимую погрешность (или неопределенность) при измерении звукового давления.

Актуальность и задачи данной работы связаны с необходимостью поиска альтернативных способов проведения калибровки измерительных микрофонов, потому

что одной из задач метрологического обеспечения является разработка и внедрение новых методов выполнения измерений.

1. Лазер вместо взаимности

В последние годы, в поисках альтернативы методу взаимности для калибровки микрофонов, большой интерес привлек метод лазерной доплеровской велосиметрии, основой которого является лазерный доплеровский виброметр (далее LDV). Данное средство измерений служит для определения скорости акустических частиц в определенных точках на диафрагме микрофона. Эти измерения позволяют рассчитать его объемную скорость, когда микрофон работает в режиме передатчика или генератора звука.

Суть метода состоит в том, что уровень чувствительности обратного преобразователя одинакова в независимости от того, как он используется – в качестве источника звука или его приемника. В случае с приемником звука учитывается напряжение холостого хода для заданного звукового давления, которое распределяется одинаково по всей диафрагме. Во втором случае берется выходная объемная скорость для определяемого тока возбуждения. Эти два значения можно привести к одним единицам.

Во время исследований проводится предварительное измерение скорости для микрофонов типа LS1P. Это делается для определения состояния диафрагмы с целью дальнейшего формирования профилей скорости (в зависимости от радиуса от центра диафрагмы).

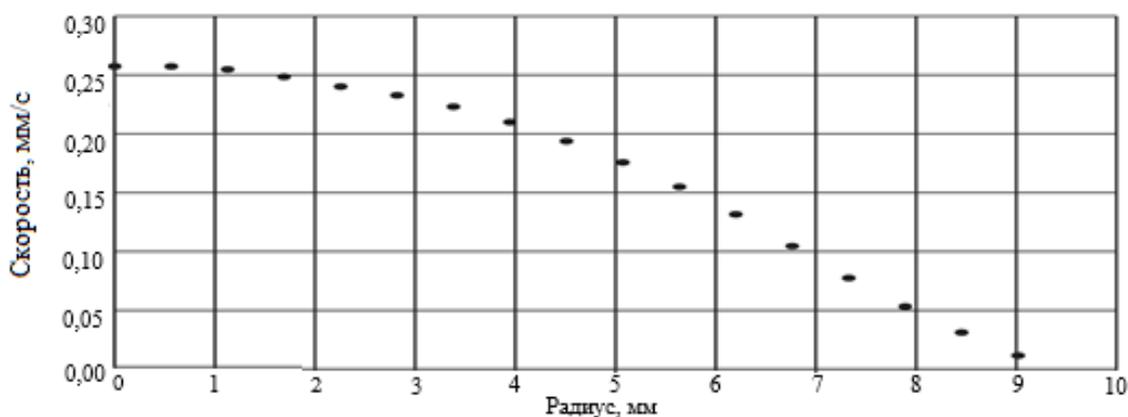


Рис. 1. График профиля скорости для микрофона

На рис.1 представлен график профиля скорости для микрофона с током 0,677 мкА (частота 1000 Гц). Лучшую воспроизводимость можно наблюдать в центре диафрагмы из-за того, что в нём самые высокие показатели движения, а данные получаются наиболее однородными.

Эти наблюдения легли в основу модели, используемой для калибровки микрофонов с использованием данных измерения в центре диафрагмы для одной точки и одного микрофона, который ранее был откалиброван методом взаимности.

Скорость измеряется в небольшой области вокруг центра мембраны. Это необходимо для адаптации сканирования в сравнительной модели калибровки.

$|M|$ – частотно-зависимая чувствительность микрофона к давлению в режиме источника звука можно выразить как:

$$|M| = \left| -\frac{q Z_a + Z_r}{i Z_a} \right|, \quad (1)$$

где i – ток возбуждения на выходе микрофона, q – скорость (объемная), Z_r – волновое сопротивление микрофона, Z_a – акустическое сопротивление микрофона.

Данная модель подразумевает, что для калибруемых одностипных микрофонов расположение вибраций на мембране, а также объемная скорость, которая была нормирована в центре диафрагмы, скоординированы между микрофонами по нормированной частоте, равной частоте возбуждения, поделенной на частоту резонанса. Для того, чтобы реализовать модель, уравнение (1) нужно преобразовать в:

$$|M| = \left| -\frac{q_n u(r_0)}{i} \frac{Z_a + Z_r}{Z_a} \right|, \quad (2)$$

где q меняется на объемную скорость q_n , умноженную на скорость в центре мембраны $u(r_0)$. С применением лазерного доплеровского вибрметра эмпирическим путем были получены значения q_n (благодаря измерениям скорости в диафрагме микрофонов, которые работают в режиме проводника).

В случае сравнительной калибровки, уравнение (2) применимо для микрофона с заранее измеренной чувствительностью M_R (эталонного микрофона), а уравнение (1) используется для калибруемого микрофона с неизвестным значением чувствительности M_t .

Из всего вышесказанного можно сделать вывод, что для того, чтобы найти уравнение для $|M_T|$, необходимо поделить уравнение для M_t на уравнение для M_R . Тогда получается, что:

$$|M_T| = \left| M_R \left(\frac{i_R}{i_T} \right) \left(\frac{u(r_0)_T}{u(r_0)_R} \right) \left(\frac{(q_n)_T}{(q_n)_R} \right) \frac{\left(\frac{Z_a + Z_r}{Z_a} \right)_T}{\left(\frac{Z_a + Z_r}{Z_a} \right)_R} \right| \quad (3)$$

где индекс R имеет отношение к параметрам, которые связаны с эталонным микрофоном, а T – к тем, что связаны с калибруемым микрофоном.

На низких частотах (до 1000 Гц) отношение членов сопротивления (импеданса) и отношение объемных скоростей можно приравнять к «1». Это применимо также и для калибруемых и эталонных микрофонов типа LS1P.

Поскольку описанные здесь измерения проводились на частотах от 250 до 1000 Гц, уравнение (3) сводится к следующему виду, который и определяет чувствительность микрофона к давлению:

$$|M_T| = \left| M_R \left(\frac{i_R}{i_T} \right) \left(\frac{u(r_0)_T}{u(r_0)_R} \right) \right|, \quad (4)$$

2. Процедура измерений

На Рис. 2 можно увидеть схему опытной установки. Ток возбуждения генерируется и рассчитывается способом, который применяется в методе взаимности.

Тестовый синусоидальный сигнал напряжением около 1,0 В подается с помощью мультифункционального синтезатора на прибор для калибровки методом взаимности, где он усиливается на 6 дБ и направляется напрямую в микрофон через специальный передатчик, содержащий калиброванный конденсатор, который напрямую подключен к микрофону. Прибор для калибровки методом взаимности также помогает обеспечить калибруемый микрофон поляризационным напряжением 200 В.

Мультиметр цифровой АРРА 502, работающий в режиме вольтметра переменного тока, необходим для измерения напряжения на конденсаторе. Запуск вольтметра

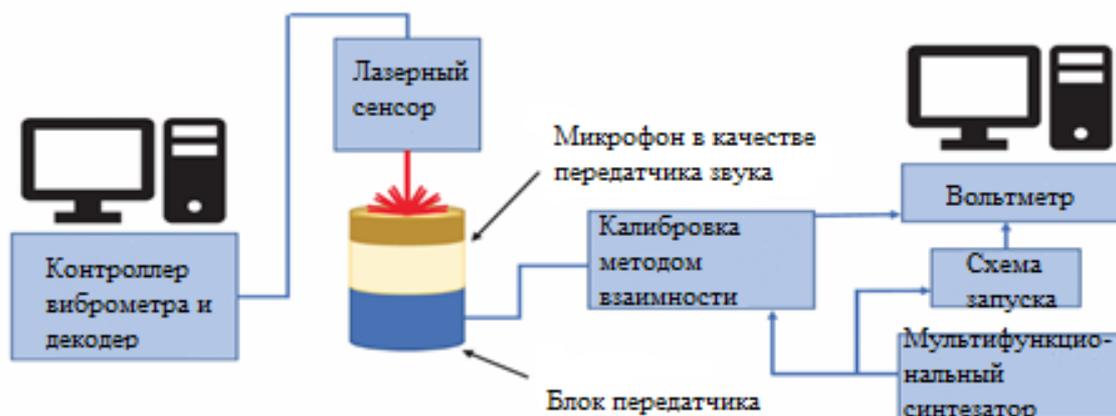


Рис. 2. Предварительная схема опытной установки

осуществляется благодаря синхронизации с тестовым сигналом, поступающим от мультифункционального синтезатора. Опираясь на установленное значение емкости и после измерения напряжения, рассчитывается сам ток возбуждения микрофона.

Виброметр сканирующий, в комплекте с контроллером и декодером, используется для нахождения значений скорости диафрагмы микрофона. Благодаря лазерному сканированию по области мембраны, система получает данные о значении скоростей в необходимом количестве точек на диафрагме. В каждой такой точке скорость измеряется по сигналу на декодере, при этом используется обработка сигналов по преобразованию Фурье.[3] Важно отметить, что выявленная в ходе эксперимента взаимосвязь между выходом синтезатора сигнала и измеренным напряжением на конденсаторе на любой частоте, была равна единице, что указывает крайне низкий уровень шума и фактически линейную зависимость между напряжениями.

Скорость измерялась в 145 точках, которые располагались в центре мембраны. Скопление точек состояло из одной точки в центре и 18 окружностей по 8 точек в каждой, интервал между окружностями составлял 0,155 мм. Для того, чтобы было проще выровнять скопление точек в пространстве, было использовано ещё 4 точки по краям мембраны.



Рис. 3. Общий вид микрофона V&K 4160 типа LS1P

Для сбора данных использовалось 9 микрофонов типа LS1P (V&K 4160) (рис.3), каждый из которых был откалиброван на 250 и 1000 Гц методом взаимности. Измерения тока и скорости проводились на всех микрофонах и на всех частотах последовательно для создания единого набора данных. Затем было отобрано 2 микрофона в качестве эталонных, а 7 применялись далее в качестве тестовых.

Для испытаний дополнительно проводились измерения атмосферного давления и температуры, чтобы проследить, что эти параметры одинаковы (10 миллибар и $23 \pm 2^\circ\text{C}$) для всех тестовых запусков установки.

3. Результаты экспериментов

В качестве эталонных применяли два микрофона, которые при испытаниях показали самые высокие значения воспроизводимости отношения скорости к току (на частоте 250 Гц).

На вышеуказанной частоте для каждого тестового микрофона была рассчитана чувствительность. Для этого вычислялось среднее значение чувствительностей, которые были определены с помощью эталонных микрофонов. Также для калибруемых микрофонов на каждой частоте был рассчитан разброс показаний чувствительности и определено стандартное отклонение, которое получилось рассчитать с помощью объединения значений разброса показаний всех калибруемых микрофонов.

Для оценки метода лазерной калибровки значения этих отклонений являются очень важным показателем.

Также по этому отклонению определяется расширенная неопределенность результатов измерений, которая показывает интервал вокруг результата измерений, в пределах которых находятся большинство распределений значений, приписываемых к измеряемой величине. [4]

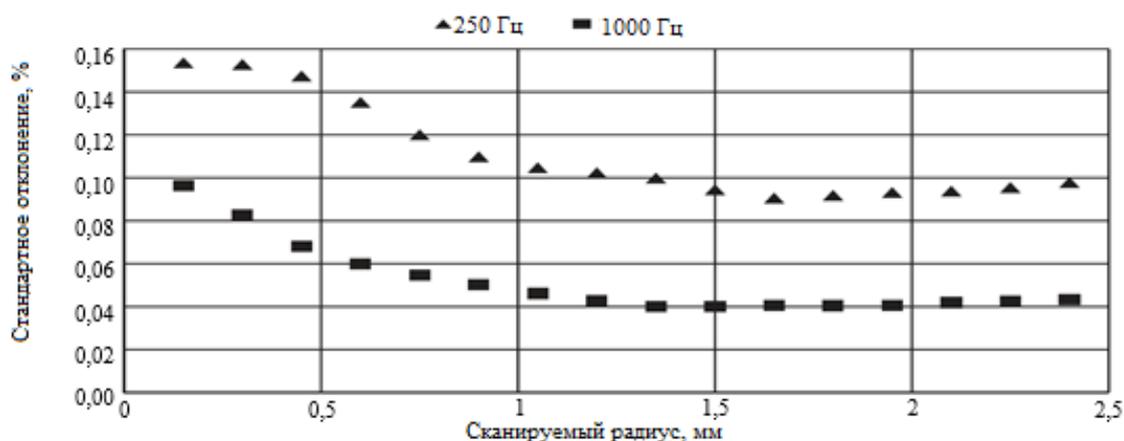


Рис. 4. График стандартного отклонения чувствительности

На Рис. 4 показан график относительного объединенного стандартного отклонения чувствительности, которая была измерена в ходе испытаний для частот 250 Гц и 1000 Гц. На графике видно, что воспроизводимость на более высокой частоте выше. Причина этому — более высокие сигналы скорости на области мембраны на частоте 1000 Гц.

Для обеих частот относительное стандартное отклонение улучшается по мере увеличения радиуса, на котором проводилось сканирование. Минимумы достигаются на радиусе в 1,5 мм на частоте 1000 Гц и 1,55 мм на частоте 250 Гц.

Если включить в анализ эксперимента данные, которые указывали на 16-18 кольца, то это сильно ухудшит воспроизводимость метода, поэтому было принято решение не учитывать точки, которые выходят за пределы небольшой области сканирования. (более, чем 2,5% от общей площади мембраны).

Теперь осталось только сравнить значения чувствительности, полученные методом взаимности с теми, что были получены с применением метода лазерного

сканирования.

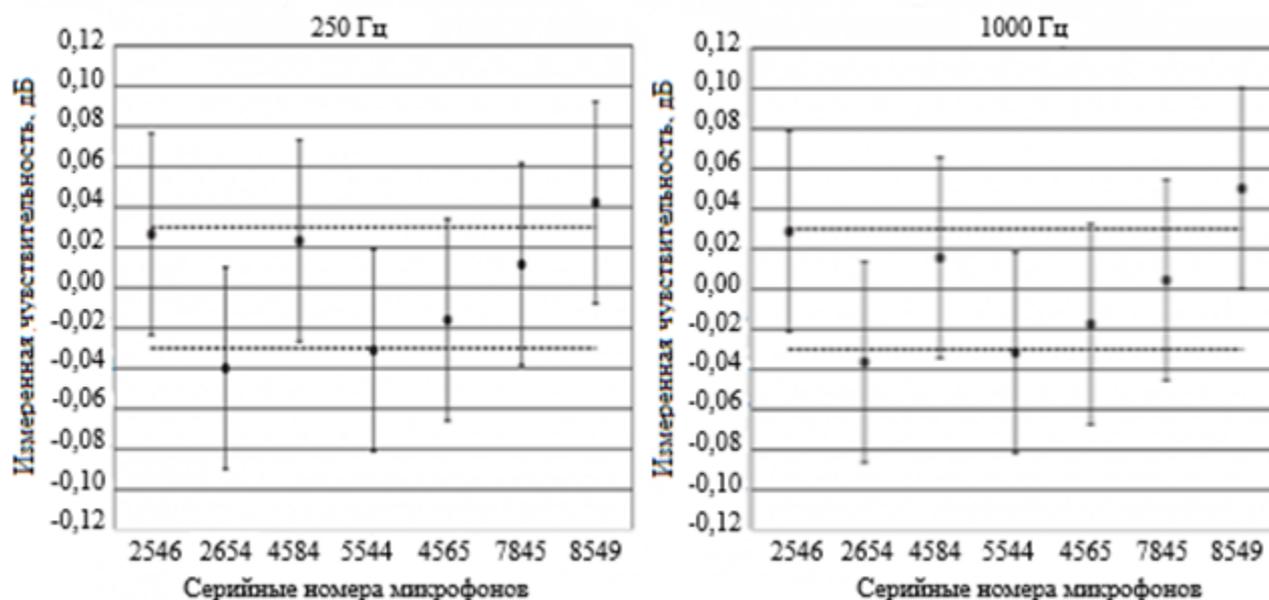


Рис. 5. Итоги сравнения 1000 Гц и 250 Гц

Подтверждением факта того, что чувствительность, полученная в ходе эксперимента с лазерным методом, выше полученной методом взаимности, являются положительные значения.

Расширенную неопределенность (U) можно увидеть на Рис. 5 в виде пунктирных линий, которые являются симметричными относительно линии нулевой разности для метода взаимности ($\pm 0,055$ дБ), а для метода лазерного сканирования – в виде полос ($\pm 0,040$ дБ). На 250 Гц средняя разница составляет 0,026 дБ, наибольшая – 0,044 дБ. На 1000 Гц – 0,025 дБ и 0,049 дБ соответственно. Этими значениями можно подтвердить согласование метода взаимности и метода лазерного сканирования.

Мною был рассмотрен ещё один метод калибровки микрофонов, использующий лазерную доплеровскую велосиметрию (LDV) для измерения скорости в центре мембраны микрофонов типа LS1P. [5] В этом методе также исследуются значения расширенной неопределенности давления, оцененного с помощью LDV и эталонного микрофона. Значения неопределенности также остаются небольшими (0,013; 0,11) дБ.

По результатам сравнения методов можно судить о хорошем сочетании методов калибровки микрофонов.

Заключение

Из представленной работы видно, что предложенный мною метод для калибровки микрофонов, при котором для измерения скорости в центре мембраны используется лазерный виброметр, вполне можно применять вместо метода взаимности.

В результате использования двух эталонных и 7 обычных микрофонов были получены значения чувствительности, которые были аналогичны значениям, полученным с помощью метода взаимности.

Для 250 Гц разница в чувствительности между двумя методами составляла не более 0,044 дБ. А для 1000 Гц этот показатель был около 0,025 дБ. Расширенная неопределенность для лазерного метода составила всего лишь 0,040 дБ для 250 и 1000 Гц.

Список литературы

1. ГОСТРМЭК 61094-2-2011. Микрофоны измерительные. Часть 2. Первичный метод градуировки по давлению лабораторных эталонных микрофонов методом взаимности: взамен ГОСТ Р МЭК 61094-2-2001: дата введения 2013-05-01. – Москва: Изд-во стандартов, 2013. – 9 с.
2. Randall P. Wagner, Richard A. Allen, Qian Dong Laser-based comparison of laboratory standart microphones. – JASA Express Lett. – 2021. – p. 3-6
3. Матвеев Д.В., Смирнов А.И., Латыпов К.Ф. Исследование процесса цифровой обработки сигнала при работе с алгоритмом быстрого преобразования Фурье // Молодой ученый. – 2016. – №3. – 141-145 с.
4. ЦФО-004-2022. Методическая инструкция. Порядок оценки неопределенности измерений при проведении калибровки средств измерений: взамен ЦФО-004-2017: дата введения 2022-12-28. – Москва: Изд-во стандартов, 2023. – 4-6 с.
5. A. Degroot, R. Macdonald, O. Richoux, B. Gazengel, M. Campbell Suitability of laser Doppler velocimetry for the calibration of pressure microphones. –Applied Acoustics – 2011. – 5-11 p.

References

1. State Standart 61094-2-2011. Measuring microphones. Part 2. The primary method of pressure calibration of laboratory reference microphones by the reciprocity method. Moscow, Standartov Publ., 2013. 10 p. (in Russian)
2. Randall P. Wagner, Richard A. Allen, Qian Dong Laser-based comparison of laboratory standart microphones. – JASA Express Lett. – 2021. – p. 3-6
3. Matveev D.V., Smirnov A.I., Latypov K.F. Investigation of the process of digital signal processing when working with the fast Fourier transform algorithm. – Young Scientist. – 2016. – №3. – 141-145 p.
4. CFO-004-2022. Methodical instruction. Procedure for estimating measurement uncertainty during calibration of measuring instruments. Moscow, Standartov Publ., 2023. 4-6 p. (in Russian)
5. A. Degroot, R. Macdonald, O. Richoux, B. Gazengel, M. Campbell Suitability of laser Doppler velocimetry for the calibration of pressure microphones. –Applied Acoustics – 2011. – 5-11 p.