

Анализ неопределенности акустических измерений при различных углах падения акустических волн на измерительный микрофон

А. В. Богомолов

Санкт-Петербургский институт информатики
и автоматизации РАН
Санкт-Петербург, Россия
a.v.bogomolov@gmail.com

В. Н. Зинкин

Центральный научно-исследовательский институт
Военно-воздушных сил Минобороны России
Москва, Россия
zinkin-vn@yandex.ru

С. П. Драган

Государственный научный центр РФ – Федеральный
медицинский биофизический центр им. А.И.Бурназяна
ФМБА России
Москва, Россия
s.p.dragan@mail.ru

Е. В. Ларкин

Тульский государственный университет
Тула, Россия
elarkin@mail.ru

Аннотация. Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований акустических измерений при различных углах падения акустических волн на мембрану измерительного микрофона конденсаторного типа, которые показали, что для минимизации погрешности измерений технические микрофоны должны указывать нормализованные частотные характеристики чувствительности при разных углах падения звуковой волны.

Ключевые слова: акустические измерения; измерительные микрофоны; погрешность акустических измерений; чувствительность измерительных микрофонов; неопределенность акустических измерений

I. ВВЕДЕНИЕ

Для разработки и реализации специальных мероприятий, направленных на минимизацию негативного влияния шума, проводят акустический мониторинг, в задачи которого входят измерение, оценивание и прогнозирование характеристик акустического воздействия на персонал и население в интересах определения границ санитарно-защитных зон вблизи источников шума, составления карт «шумности» городов, обоснования мероприятий по защите от шума и т.д. [1–5]. Учитывая большие масштабы территорий, на которых необходимо осуществлять одновременные акустические измерения, для их реализации применяют множество однотипных приборов, в том числе, изготовленных разными производителями. Одним из ключевых элементов оборудования для акустических измерений, определяющим их качество, являются измерительные микрофоны, осуществляющие преобразование звукового давления в электрический сигнал. В качестве таких микрофонов в настоящее время применяют микрофоны

конденсаторного типа [6, 7]. Конденсаторные микрофоны имеют или линейную характеристику в свободном звуковом поле при угле падения 00 (микрофоны свободного звукового поля), или линейную характеристику звукового давления (микрофоны звукового давления).

Микрофоны свободного звукового поля следует направлять на источник звука, в то время как микрофон звукового давления должен быть установлен так, чтобы его мембрана располагалась параллельно к направлению звуковой волны. Микрофоны звукового давления применяются при измерениях в диффузном звуковом поле (случайное падение звука), т.к. их частотная характеристика в определенном производителем частотном диапазоне почти не зависит от угла падения звуковых волн.

При мониторинге акустической обстановки, для реализации стратегии измерения на основе рабочей операции, трудовой функции или рабочего дня [8], важными источниками неопределенности при оценке воздействия шума на рабочем месте являются средства измерений и их калибровка, а также условия размещения микрофона относительно источников звука. Для снижения погрешности оценки, обусловленной измерительным средством, измерения выполняют с помощью интегрирующих-усредняющих шумомеров класса 1 (по ИЕС 61672-1), снабженных конденсаторными микрофонами. Кроме того, необходимо соблюсти условия идентичности расположения микрофона относительно источника звука. Однако, когда угол прихода акустической волны на мембрану микрофона за сеанс измерений изменяется в широком диапазоне (для авиационного, транспортного или производственного шума), соблюсти идентичность размещения микрофона относительно

источника звука невозможно. В этой связи возникают дополнительные источники неопределенности при оценке воздействия. Производители акустического оборудования зарубежных фирм в прилагаемой технической документации приводят подробные частотные характеристики диаграмм направленности конденсаторных микрофонов, которые можно учесть для минимизации неопределенности измерений, а отечественные производители такой информации не представляют.

Исследование неопределенности измерений конденсаторными микрофонами свободного поля и микрофонами звукового давления, используемыми ведущими российскими и зарубежными производителями аппаратуры для акустических измерений, являлось целью проведенной работы.

II. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования погрешности акустического измерительного тракта в условиях одинакового угла падения акустической волны на мембрану микрофона проведены испытания конденсаторных микрофонов свободного поля ВМК 205 (СКБ «Виброприбор», Россия) и микрофонов звукового давления Type 4193 (Briel&Kjaer, Дания). Регистрация и анализ результатов измерения осуществлялись на шумомерах производства фирмы «Октава-Электрон Дизайн» (Россия) и фирмы Briel&Kjaer (Дания) соответственно. Исследования проводили с помощью специального стенда, состоящего из двух низкочастотных усилителей ALPINE PDX-M12 (Япония) с четырьмя подсоединенными громкоговорителями ALPHARD Audio Extreme GR-18F (Россия) диаметром 18 дюймов номинальной мощностью 2000 Вт, расположенными на квадратной панели $1 \times 1 \text{ м}^2$, к задней стороне которой закреплен куб объемом 1 м^3 , а к лицевой подсоединен рупор длиной 3 метра, выполненный в виде усеченной пирамиды с сечением на срезе $0,4 \times 0,4 \text{ м}^2$. Стенд изготовлен из слоеной фанеры толщиной 25 мм, на боковых поверхностях закреплены металлические уголки, с целью минимизации вибрации. Большая мощность используемых громкоговорителей и усилителей обусловлена необходимостью формирования тестовых сигналов, в том числе инфразвука на частотах 8 и 16 Гц для достижения приемлемого соотношения сигнал/шум (более 30 дБ). Фоновый шум на инфранизких частотах в диапазоне 60-70 дБ был обусловлен работой вентиляционных установок.

Микрофоны с предусилителями подсоединяли к шумомерам при помощи штатного выносного кабеля так, что их корпус находился вне зоны падающей на микрофоны волны. Микрофоны с предусилителями устанавливали на стойках на срезе рупора перпендикулярно либо параллельно углу прихода волны. При этом все микрофоны находились в плоскости среза рупора в центральной его части.

На срезе рупора формируется поле плоской бегущей волны, отклонения в уровнях звукового давления (УЗД) по сечению среза не превышало $\pm 0,2 \text{ дБ}$ в диапазоне частот

$8 \div 1000 \text{ Гц}$. В области высоких частот отклонения УЗД по сечению среза рупора не превышало $\pm 0,6 \text{ дБ}$. Измерения выполнены микрофоном Type 4193 (Briel&Kjaer) размещенным параллельно углу прихода плоской волны.

Генерация сигналов осуществлялась при помощи специализированного программного обеспечения, обеспечивающего формирование стабильных акустических сигналов заданной формы. Сформированный с помощью компьютера и цифро-аналогового преобразователя акустический сигнал подается на низкочастотные усилители, а затем на громкоговорители.

Погрешность измерительных трактов, в зависимости от угла падения звуковой волны оценивали при разных условиях формирования акустического поля. В качестве теста использованы: тональный звук на частотах 8, 16 и 32 Гц, белый шум и импульсы разной длительности.

Сравнительный анализ осуществляли путем сопоставления результатов одновременного измерения УЗД плоской бегущей волны в плоскости среза рупора шестью микрофонами, соединенными с шумомерами 1-го класса точности:

- три шумомера Briel&Kjaer Type 2250 с измерительными микрофонами Type 4193 (Briel&Kjaer, Дания),
- два шумомера Октава-110А (Октава-Электрон Дизайн, Россия) с измерительными микрофонами ВМК 205 (СКБ «Виброприбор», Россия),
- один шумомер Экофизика (Октава-Электрон Дизайн, Россия) с измерительным микрофоном ВМК 205 (СКБ «Виброприбор», Россия).

Используемые шумомеры широко используются в практике акустических измерений и позволяют определять практически все необходимые характеристики в соответствии с действующими в РФ санитарными нормами [9].

Следует отметить, что конденсаторные микрофоны 4193 фирмы Briel&Kjaer, являются микрофонами звукового давления и при этом обладают круговой диаграммой направленности. Микрофоны ВМК 205 (СКБ «Виброприбор») являются микрофонами свободного звукового поля, однако диаграмма направленности в технической документации не представлена. Все микрофоны перед измерениями были откалиброваны эталонным источником звука на частоте 1000 Гц с УЗД 94 дБ (калибратор Briel&Kjaer Type 4231): разброс в измерениях УЗД калибровочного сигнала не превысил 0,1 дБ.

Измеряемые показатели тестового акустического поля определены в соответствии с [9].

Нормируемыми показателями акустической обстановки для шума являлись три показателя, определяемые с использованием частотных коррекций по шкале «А» и шкале «С»:

- эквивалентный уровень звука А за рабочую смену ($L_{Aeg} = 80 \text{ дБА}$);

- максимальный уровень звука А, измеренный с временными коррекциями «медленно» и «импульс» ($L_{AmaxS} \leq 110 \text{дБА}_S$ и $L_{AmaxI} \leq 125 \text{дБА}_I$);
- пиковый уровень звука по шкале «С» ($L_{Cпик} \leq 137 \text{дБС}$).

Нормируемыми параметрами акустической обстановки для инфразвука являлись:

- эквивалентные уровни звукового давления за рабочую смену в октавных полосах частот 2, 4, 8, 16 Гц – $L_{p,1/1,ег,8h}$, дБ;
- эквивалентный общий уровень инфразвука за рабочую смену – $L_{p,ZI,ег,8h}$, дБ, измеренный в диапазоне частот 1,4...22 Гц;
- максимальный общий уровень инфразвука, измеренный с временной коррекцией S («медленно») $\leq 120 \text{дБ}$.

Принципиальное отличие санитарных норм, действующих в Российской Федерации с 2016 г. [9], от ранее действовавших санитарных норм [10] заключается в том, что:

1) УЗД в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 31,5, 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 и 8000 Гц не являются нормируемыми и рассматриваются только как справочные характеристики для выбора средств защиты от шума;

2) шум в диапазоне низких частот 22-500 Гц практически не учитывается нормируемыми показателями, поскольку использование шкалы «А» подразумевает фильтрацию (подавление) шума на низких частотах. На частоте 500 Гц отличие между уровнем звука и звуковым давлением составит 3 дБ, а на частоте 22 Гц это отличие достигнет 50 дБ – то есть значительная часть энергии шума оказывается неучтенной в нормируемых показателях акустической обстановки;

3) измерение эквивалентного общего уровня инфразвука за рабочую смену ($L_{p,ZI,ег,8h}$, дБ) предлагается осуществлять используя частотную шкалу «Z», или путем энергетического суммирования уровней звукового давления в октавных полосах частот 2, 4, 8, 16 Гц. Предполагается, что УЗД в октавных полосах частот измеряются по линейной шкале, однако во всех шумомерах даже измерения октавных компонент спектра осуществляется с использованием шкалы «Z», которая не является линейной в области инфранизких частот, нормируемая линейность шкалы начинается от 10 Гц, на уровне -3дБ. Это реализовано практически на всех шумомерах, присутствующих на отечественном рынке. Линейность шкалы на инфранизких частотах определяется используемым микрофоном. Поэтому для измерения показателей акустической обстановки в октавных полосах частот 2 и 4 Гц необходимо использовать специальные микрофоны (например 4193 В&К или ВМК205 СКБ Виброприбор), которые имеют нижнюю границу частоты 70 мГц или 1 Гц соответственно. Применение других микрофонов в инфразвуковом диапазоне частот может

привести к существенно заниженным результатам измерений.

Таким образом, принятая в настоящее время система нормирования шума и инфразвука не позволяет достоверно оценить показатели акустической обстановки, объективно характеризующие потенциальную опасность для человека. В связи с этим в перечень определяемых показателей включена величина эквивалентного УЗД, зарегистрированная во всем нормируемом инфразвуковом и слышимом диапазоне частот (от 2 Гц до 16 кГц).

Обработка результатов измерений осуществлялась с применением программного обеспечения, рекомендованного производителями шумомеров: результаты измерений шумомерами 2250 фирмы Brüel&Kjær обрабатывались программой ВZ-5503, а результаты измерений шумомерами Экофизика и Октава-110А – программой Signal+3G.

Обе программы позволяют определять в соответствии с [2] нормируемые характеристики акустического поля.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для оценивания неопределенности измерения в зависимости от угла падения звуковой волны на мембрану микрофона чувствительный элемент (мембрану) располагали перпендикулярно (нормальное падение акустической волны) и параллельно (падение акустической волны по касательной) направлению к источнику звука.

Сформировано четыре вида стационарного сигнала: тональный звук с частотами 8, 16, 32 Гц; белый шум. Регистрация каждого сигнала осуществлялась в течение одной минуты. Время усреднения на всех шумомерах устанавливалось одинаковым и равным четыре секунды. Таким образом, для каждого измерительного канала записи и для каждого вида сигнала была сформирована репрезентативная выборка, состоящая из 15 групп данных.

Средние величины определялись по выборке из 15 значений зарегистрированных УЗД тонального звука для каждого измерительного тракта. Стандартное отклонение каждого тракта не превышало $\pm 0,1$ дБ.

Шумомеры 2250 Brüel&Kjær, вне зависимости от расположения мембраны микрофона относительно источника звука, дают разброс показаний в пределах погрешности измерений указанной в технической документации не более 0,6 дБ.

Шумомеры «Октава» при нормальном и касательном падении акустической волны дают разброс показаний, значительно превышающий погрешность измерений указанную в технической документации. При касательном падении акустической волны чувствительность микрофонов ВМК205 существенно ниже, чем при ее нормальном падении. Кроме того, разница показаний, зарегистрированных шумомерами Brüel&Kjær и «Октава» при нормальном падении акустической волны на мембрану отличались между собой не более чем на 0,6 дБ, а при касательном падении эта разница достигала 5 дБ.

Результаты анализа измерений УЗД октавных компонент спектра белого шума свидетельствуют, что у шумомеров Brüel&Kjær максимальная разница, как при нормальном, так и при касательном падении акустической волны на мембрану микрофона, зарегистрирована на частоте 2 Гц и составляет 1,5 дБ, а на остальных частотах разница не превышает ± 1 дБ.

Шумомеры «Октава» характеризуются большим разбросом в показаниях: максимальная разница (-5,4 дБ) зарегистрирована на частоте 250 Гц. В целом, практически на всех частотах чувствительность микрофона ВМК 205 при нормальном падении существенно отличается от чувствительности при касательном падении.

Разница показаний между шумомерами Brüel&Kjær и «Октава» при нормальном падении акустической волны в диапазоне частот от 4 до 500 Гц приемлема (составляет $\pm 1,2$ дБ), на более высоких частотах эта разница увеличивается. При касательном падении акустической волны разница в показаниях между шумомерами во всем диапазоне весьма существенна и на границах нормируемого диапазона превышает 6 дБ.

При касательном падении акустической волны разница между зарегистрированными значениями практически всех нормируемых показателей белого шума существенна и может достигать 6 дБ.

Минимальные отличия нормируемых показателей, измеренных шумомерами Brüel&Kjær и «Октава», зарегистрированы при нормальном падении акустической волны. Только значения показателя LZ_{infra} имеют различия более 3 дБ, различия значений остальных показателей находятся в пределах 2 дБ: это обстоятельство можно объяснить отличиями частотных коррекций шкалы «Z» у шумомеров Brüel&Kjær и «Октава».

Разница между величинами нормируемых и дополнительных показателей стационарного шума, измеренных шумомерами «Октава» при нормальном и касательном размещении мембраны микрофона, составила 2–4 дБ. Можно отметить, что различия в показаниях шумомеров 2250 при нормальном или касательном падении звука не превышают 1 дБ.

Таким образом, результаты измерений тонального звука и стационарного широкополосного шума (белого шума) шумомерами «Октава» и Brüel&Kjær при нормальном и касательном размещении мембраны микрофона к источнику шума являются схожими. Значения измеряемых показателей акустических характеристик у шумомеров Brüel&Kjær практически не зависят от ориентации измерительных микрофонов в пространстве.

У шумомеров «Октава» в случае расположения измерительного микрофона перпендикулярно к источнику шума результаты занижаются более чем на 3 дБ. При измерениях акустических характеристик белого шума разница значений показателей акустической обстановки, измеренных шумомерами «Октава» и Brüel&Kjær, составляет более 2 дБ.

Аналогичная процедура проведена по определению неопределенности измерения акустических характеристик сгенерированного импульса. На стенде были сформированы импульсы заданной формы: затухающий колебательный процесс, общая длительность составила ≈ 200 мс, длительность первой фазы сжатия-разрежения равна 38 мс, амплитуда полуразмаха ± 100 Па (134 дБ).

При касательном падении импульсного звука на мембраны микрофонов разница в показаниях между шумомерами достигает 5 дБ, а при нормальном падении эти отличия составляют не более 2 дБ.

Сравнение результатов измерений акустических характеристик импульса шумомерами «Октава» при разных положениях мембраны микрофонов относительно падающего импульсного звука, также свидетельствует о некруговой диаграмме направленности и снижении чувствительности: разница между нормальным и касательным размещением мембраны микрофона составляет до 5 дБ. Различия в показаниях шумомеров Brüel&Kjær при нормальном или касательном падении звука не превышают ± 1 дБ.

Следует отметить, что в зависимости от длительности звукового импульса показатель пикового давления, зарегистрированный по шкале «С» (LC_{Peak}) отличается и всегда меньше, чем показатель LZ_{Peak} (чем больше длительность импульса, тем больше отличие). При действии низкочастотных импульсов отличие достигает 6 дБ. Следовательно, пиковое звуковое давление, зарегистрированное с частотной коррекцией «С», необъективно характеризует импульсный звук, а принятый в действующих санитарных нормах [9] в качестве критерия предельно допустимый уровень $LC_{Peak} < 137$ дБС не будет способствовать соблюдению требований безопасных условий труда по акустическому фактору.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, результаты сравнительного анализа данных, зарегистрированных испытанными акустическими измерительными трактами, свидетельствуют, что микрофоны 4193 Brüel&Kjær обладают практически одинаковой погрешностью измерений акустических характеристик тонального сигнала, белого шума и импульса, как при нормальном, так и при касательном падении звуковой волны на мембрану микрофонов.

Погрешность измерений показателей акустических характеристик с помощью шумомеров «Октава» существенно зависит от расположения мембраны относительно источника звука и может достигать 6 дБ, что обусловлено разной чувствительностью микрофона при изменении угла падения звуковой волны, т.е. некруговой диаграммой направленности.

Однако, в соответствии с требованиями [11] изменение чувствительности системы «микрофон-предусилитель» в пределах угла $60 \dots 120^\circ$ от нормали к диафрагме, в диапазоне частот до 4500 Гц не должно превышать 2,5 дБ. Это обстоятельство приводит к тому, что для снижения неопределенности измерений необходимо значительно

увеличивать количество проводимых измерений [11, приложение С, табл. С4].

Полученные результаты убедительно свидетельствуют о том, что для минимизации неопределенности измерений, техническую документацию на микрофоны ВМК 205 и шумомеры «Октава» необходимо дополнить нормируемыми частотными характеристиками чувствительности при разных углах падения звуковой волны, кроме того, целесообразно в документации более детализировано указывать область применения и ограничения на применения. Выполнение этих рекомендаций будет способствовать улучшению отечественного шумоизмерительного оборудования, а также при проведении акустического мониторинга позволит избежать пользователям грубых ошибок [12–17].

Необходимо отметить наличие некоторых преимуществ микрофона ВМК205 перед аналогичными импортными образцами: стабильность амплитудно-фазочастотных характеристик микрофонных трактов в области инфразвуковых частот делает его незаменимым для измерения импедансометрических характеристик в волноводах при использовании двухмикрофонной техники измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Зинкин В.Н., Солдатов С.К., Кукушкин Ю.А., Афанасьев Р.В., Богомолов А.В., Ахметзянов И.М., Свидовый В.И., Пирожков М.В. Гигиеническая оценка условий труда работников "шумовых" профессий авиаремонтных заводов // Медицина труда и промышленная экология. 2008. № 4. С. 40-42.
- [2] Зинкин В.Н., Солдатов С.К., Богомолов А.В., Шведов А.П. Обоснование использования специалистами средств индивидуальной защиты при воздействии авиационного шума // Информатика и системы управления. 2009. № 4 (22). С. 139-141.
- [3] Зинкин В.Н., Кукушкин Ю.А., Богомолов А.В., Солдатов С.К., Алексеенко М.С. Исследование эффективности средств индивидуальной и коллективной защиты от шума на основе оценки потенциальной ненадежности профессиональной деятельности авиационных специалистов // Безопасность жизнедеятельности. 2010. № 11 (119). С. 2-6.
- [4] Чистов С.Д., Кукушкин Ю.А., Солдатов С.К., Богомолов А.В., Кисляков Ю.Ю., Герасимова Е.Г. Влияние интенсивного шума на функциональное состояние летного состава // Проблемы безопасности полетов. 2019. № 9. С. 3-13.
- [5] Богомолов А.В., Алёхин М.Д., Дашевский В.П. Информационно-измерительная управляющая система персонализированного мониторинга условий труда // Сборник трудов XIII Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2019. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. 2019. С. 1464-1469.
- [6] <https://www.bksv.com/en/products/sound-and-vibration-meters/sound-level-meters-and-vibration-meters/Type-2250-S> [contact date - 07.07.2019]
- [7] <http://www.octava.info/octava-110A> [appeal date - 07/17/2019]
- [8] Акустика. Измерения шума для оценки его воздействия на человека. Метод измерений на рабочих местах / ГОСТ ISO 9612-2016. М.: Стандартиформ, 2016. 41 с.
- [9] Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки / Санитарные нормы СН 2.2.4/2.1.8.562-96. М.: Минздрав России, 1996. 8 с.
- [10] Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах / Санитарные правила и нормы СанПиН 2.2.4.3359-16. М.: Росздравнадзор, 2016. 69 с.
- [11] Сертификация воздушных судов по шуму на местности / Авиационные правила ИКАО, часть 36. М.: Межгосударственный авиационный комитет, 2003. 42 с.
- [12] Богомолов А.В., Драган С.П., Зинкин В.Н., Алёхин М.Д. Информационная система мониторинга экологической безопасности по акустическому фактору // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. 2019. Т. 1. С. 313-316.
- [13] Зинкин В.Н., Богомолов А.В., Ахметзянов И.М., Шешегов П.М. Экологические аспекты безопасности жизнедеятельности населения, подвергающегося действию авиационного шума // Теоретическая и прикладная экология. 2011. № 3. С. 97-101.
- [14] Прокопенко Л.В., Курьеров Н.Н., Лагутина А.В. Исследование экспозиционно-временной зависимости формирования избыточного риска потерь слуха // Медицина труда и промышленная экология. 2019. Т. 59. № 9. С. 728-729.
- [15] Зинкин В.Н., Богомолов А.В., Ерёмин Г.И., Драган С.П. Технология исследования акустической эффективности средств защиты от низкочастотного шума и инфразвука // Мир измерений. 2011. № 10. С. 40-45.
- [16] Прокопенко Л.В., Курьеров Н.Н., Лагутина А.В., Почтарёва Е.С. Определение и оценка группового избыточного (атрибутивного) риска потерь слуха от шума // Медицина труда и промышленная экология. 2019. Т. 59. № 4. С. 212-218.
- [17] Богомолов А.В., Драган С.П. Автоматизированный мониторинг и технологии обеспечения акустической безопасности персонала // Автоматизация. Современные технологии. 2015. № 4. С. 25-30.