

DOI: <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2021-61-10-655-661>

УДК 613.644

© Коллектив авторов, 2021

Прокопенко Л.В., Булгакова М.В., Курьеров Н.Н., Лагутина А.В.

Значение передаточной функции наружного уха для оценки эффективности СИЗ органа слуха

ФГБНУ «Научно-исследовательский институт медицины труда имени академика Н.Ф. Измерова», пр. Будённого, 31, Москва, Россия, 105275

Введение. Проблема объективной оценки акустической эффективности (АЭ) средств индивидуальной защиты органа слуха (СИЗОС) в производственных условиях остаётся актуальной, несмотря на многочисленные исследования в этом направлении во многих странах. Показатели эффективности СИЗОС, измеренные методом пороговой аудиометрии в свободном поле (*REAT* — *real ear attenuation threshold*), по мнению многих исследователей, не полностью отражают их защитные свойства для конкретных производственных условий и конкретного работника.

Цель исследования — реализация метода *F-MIRE* для измерения акустической эффективности СИЗОС с учётом передаточной функции наружного уха.

Материалы и методы. Метод измерений акустической эффективности (АЭ), получивший наименование *Field-MIRE* (*F-MIRE*), позволяет определить АЭ по разнице звуковых давлений, внешнего шума и шума внутри внешнего слухового прохода наружного уха, измеренных двумя микрофонами. Но поскольку эти микрофоны находятся в различных акустических условиях необходимо ввести, по крайней мере, двух блоков поправочных коэффициентов. Один блок, учитывающий свойства акустического зонда, второй — параметры передаточной функции наружного уха. Проведены измерения передаточной функции наружного уха у 18 добровольцев и оценка АЭ противошумного наушника типа СОМЗ-1 «Ягуар» в условиях производства.

Результаты. Исследования показали результативность реализации метода *F-MIRE* для адекватной оценки акустической эффективности противошумных наушников на производстве. Использование специального оголовья для измерения передаточной функции уха (*TFOE*) позволяет стандартизовать расположение измерительных микрофонов относительно головы добровольца и снизить неопределённость измерений. Метод *F-MIRE* позволяет определить *TFOE* для каждого уха работника, что невозможно при использовании метода *REAT* при бинауральном прослушивании в свободном звуковом поле, проведённые исследования показали, что различия *TFOE* между правым и левым ухом могут быть значительными.

Заключение. Определение АЭ СИЗОС по разности звуковых давлений, измеренных внешним микрофоном и микрофоном *MIRE*, без учёта акустических свойств наружного уха, как это делалось в некоторых ранее проведённых исследованиях, занижает не только спектральные, но и одночисловые показатели АЭ.

Этика. Исследования соответствовало этическим стандартам Хельсинской декларации (2000 г.), выполнено с информированного согласия добровольцев на участие в нем и одобрено этическим комитетом ФГБНУ «НИИ МТ».

Ключевые слова: акустическая эффективность; средства индивидуальной защиты органа слуха; противошумный наушник; передаточная функция наружного уха; метод *F-MIRE*

Для цитирования: Прокопенко Л.В., Булгакова М.В., Курьеров Н.Н., Лагутина А.В. Значение передаточной функции наружного уха для оценки эффективности СИЗ органа слуха. *Мед. труда и пром. экол.* 2021; 61(10): 655–661. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2021-61-10-655-661>

Для корреспонденции: Курьеров Николай Николаевич, старший научный сотрудник ФГБНУ «Научно-исследовательский институт медицины труда имени академика Н.Ф. Измерова», канд. биол. наук. Email: courierov@mail.ru

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Дата поступления: 07.10.2021 / Дата принятия к печати: 14.10.2021 / Дата публикации: 18.11.2021

Ludmila V. Prokopenko, Maria V. Bulgakova, Nicolay N. Courierov, Alla V. Lagutina

Transfer function of open ear importance in assessment of hearing protection devices noise reduction

Izmerov Research Institute of Occupation Health, 31, Budyonnogo Ave., Moscow, Russia, 105275

Introduction. Objective assessment of the noise reduction (NR) of individual hearing protection devices (HDP) in industrial conditions is actual problem despite numerous studies in this direction in many countries.

This study aimed to implement the *F-MIRE* method for measuring the NR of HDPs, considering the transfer function of the outer ear.

Materials and methods. HDP performance indicators measured by the real ear attenuation threshold (*REAT*) method in the free field, do not fully reflect the protective properties of HDP in specific production conditions and for a specific employee, according to many researchers.

The measurement method using two microphones, called *Field-MIRE* (*F-MIRE*), allows you to determine NR as the difference in sound pressure, external noise and noise inside the external auditory meatus (EAM). But since these microphones are located in different acoustic conditions, it becomes necessary use at least two blocks of correction coefficients to get real results. One block — considering the properties of the acoustic probe, the second — should consider the transfer function of open ear.

The measurements of the *TFOE* in 18 volunteers and the evaluation of the NR of the SOMZ-1 "Jaguar" earmuff in industrial conditions were carried out.

Results. This study has shown the effectiveness of the implementation of the *F-MIRE* method for an adequate assessment of the NR of earmuff in industrial conditions. The special headband uses for measuring the *TFOE* allows you to standardize the location of measuring microphones relative to the volunteer's head and reduce the uncertainty of measurements. Unlike

the REAT method with binaural listening in a free field, the F-MIRE method allows you to determine the TFOE for each ear of an employee. Our research has shown that TFOE differences between the right and left ears one-man can be significant. **Conclusion.** The NR determination by the difference of sound pressures measured by an external microphone and a MIRE microphone, without considering the acoustic properties of the outer ear underestimates both spectral and single-digit NR indicators. **Ethics.** The research corresponded to the ethical standards of the Declaration of Helsinki (2000), was carried out with the informed consent of volunteers to participate in it, and was approved by the ethical committee of the Federal State Budgetary Scientific Institution "Scientific Research Institute of MT".

Keywords: noise reduction; hearing protection devices; earmuff; transfer functions of open ear; F-MIRE method

For citation: Prokopenko L.V., Bulgakova M.V., Courierov N.N., Lagutina A.V. Transfer function of open ear importance in assessment of hearing protection devices noise reduction. *Med. truda i prom. ekol.* 2021; 61(10): 655–661. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2021-61-10-655-661>

For correspondence: Nicolay N. Courierov, Leading researcher in physical factors laboratory of Izmerov Research Institute of Occupational Health. E-mail: courierov@mail.ru

Information about the authors: Prokopenko L.V. <https://orcid.org/0000-0001-7767-8483>

Bulgakova M.V. <https://orcid.org/0000-0001-9631-0000>

Courierov N.N. <https://orcid.org/0000-0001-7064-5849>

Lagutina A.V. <https://orcid.org/0000-0002-7177-1350>

Funding. The study had no funding.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Received: 07.10.2021 / Accepted: 14.10.2021 / Published: 18.11.2021

Введение. Измерение акустической эффективности (АЭ) средств индивидуальной защиты органа слуха (СИЗОС) для определения их защитных свойств и паспортизации в целях оптимизации выбора для применения работниками выполняется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 12.4.211-99 (ИСО 4869-1-89)¹ и ГОСТ 12.4.318-2019 (ISO 4869-3:2007)². Для практических целей по результатам оценки АЭ по стандартам рассчитываются одночисловые показатели SNR^3 или NRR^4 , (показатели уровня поглощения шума — акустической эффективности, которые наносятся непосредственно на СИЗОС в странах ЕС и США соответственно).

Измерения по указанным стандартам выполняются в лабораторных условиях и требуют применения громоздкого испытательного оборудования:

- метод субъективной оценки (метод REAT — *real-ear-attenuation-at-threshold*) производится на добровольцах с хорошим слухом и основан на применении тональных испытательных сигналов аудиометрического ряда, т. е. не во всём непрерывном диапазоне частот;
- измерения с использованием испытательного устройства (ATF) имеют большую точность, но также не охватывают весь непрерывный диапазон частот, так как используется испытательный сигнал в виде ряда треть октавных полос «розового» шума.

По этим причинам, а также потому, что лабораторные условия значительно отличаются от эксплуатационных условий на рабочем месте, прежде всего, по спектральным характеристикам действующего шума, возникает обоснованное сомнение в адекватности оценки АЭ лабораторными методами, что отмечалось многими исследователями [1–4]. Причины возможных расхождений между результатами «лабораторных» и «полевых» измерений АЭ, были достаточно полно проанализированы и описаны ранее [5].

С появлением миниатюрных измерительных микрофонов, портативных многоканальных регистраторов данных измерений и разработкой методов измерений звукового давления непосредственно в наружном слуховом проходе уха появилась возможность оценить АЭ СИЗОС по разнице звуковых давлений внешнего шума и шума внутрислухового прохода⁵ (метод F-MIRE) [5–9].

Однако, в ряде исследований, как указывалось в [4], не учитывалось влияние передаточной функции открытого уха (TFOE). Ряд авторов отмечает, что передаточная функция носит индивидуальный характер и определяется преимущественно морфологическими особенностями наружного уха у различных людей [4, 8, 10].

Передаточная функция может быть определена по различию результатов, полученных методами REAT и F-MIRE [4, 11–15]. Безусловно, на результаты измерений АЭ СИЗОС методом F-MIRE будут влиять и такие факторы, как искажение свободного звукового поля работником, дифракция звуковой волны от головы и туловища работника и другие, а также эффект ушной раковины [14], который, на наш взгляд, является основным.

Точные измерения, связанные с «реальным ухом», требуют учёта акустических характеристик наружного слухового прохода (*meatus acusticus externus* — МАЕ) [16], и необходимо добавить, ушной раковины (*auricula*). Следует отметить, что на величину реальной акустической эффективности СИЗОС будет влиять спектральный состав производственного шума.

⁵ ISO 11904-1, Acoustics — determination of sound immisions from sound sources placed closed to the ears — part 1: technique using microphones in real ears (MIRE-technique), В России — ГОСТ Р ИСО 11904-1-2017 Акустика. Определение излучения близко расположенных к уху источников звука Часть 1. Метод с использованием микрофона внутри уха.

¹ ГОСТ Р 12.4.211-99 (ISO 4869-1-89) Средства индивидуальной защиты органа слуха. Субъективный метод измерения поглощения шума.

² ГОСТ 12.4.318-2019 (ISO 4869-3:2007) Средства индивидуальной защиты органа слуха. Упрощённый метод измерения акустической эффективности противошумных наушников для оценки качества.

³ Используется в Европейских странах, рассчитывается по методу стандарта ISO 4869 Part 2: Estimation of effective A-weighted sound pressure levels when hearing protectors are worn. В России — ГОСТ Р 12.4.212-99 (ИСО 4869-2-94) ССБТ. Средства индивидуальной защиты органа слуха. Противошумы. Оценка результирующего значения А-корректированных уровней звукового давления при использовании средств индивидуальной защиты от шума.

⁴ Используется в США, Канаде рассчитывается по методу стандарта ANSI, Methods of estimating effective A-weighted sound pressure levels when hearing protectors are worn, 2007 New-York, NY American National Standards Institute S12.68–2007.

Цель исследования — является определение приемлемости метода *F-MIRE* для измерения акустической эффективности СИЗОС с учётом передаточной функции наружного уха (эффекта ушной раковины и наружного слухового канала).

Ухо человека представляет собой сложный орган, позволяющий принимать и интерпретировать звуковые волны широкого диапазона частот и интенсивностей. Различная чувствительность слухового анализатора к звукам различной высоты тона (частоты) известна давно. Определение зависимостей чувствительности слухового анализатора для звуков различной частоты и интенсивности субъективными методами было проведено многими исследователями в 30-е годы прошлого века, результатом которых было определение «кривых равной громкости», т.е. субъективной оценки ощущения действия звуковых волн различных частот. Были также определены абсолютные пороги слуха - звуковосприятия продолжительных синусоидальных звуков, измеренных в условиях свободного поля [17].

Неравномерность слуховой чувствительности нашла отражение в международных и отечественных стандартах: ИСО 389-7:2005⁶, ГОСТ Р ИСО 28961–2014⁷ и др.

По своему строению наружное ухо, состоящее из ушной раковины и наружного слухового прохода (*auricula*+*MAE*), отдалённо напоминает конический рупор (горн). Свойство рупора усиливать звуковое давления звуковых волн давно использовалось человеком. Особенно широко это свойство применялось при изготовлении духовых музыкальных инструментов, в механических системах звукозаписи и звуковоспроизведения, в акустических пеленгаторах войск ПВО в периоды первой и второй мировых войн.

Коэффициент усиления звукового давления на резонансной частоте приблизительно определяется отношением площадей сечений входного отверстия рупора и его горловины и объясняется адиабатическим законом связи объёма и давления в звуковой волне. Частотная характеристика определяется показателем расширения рупора и функцией его изменения. Наиболее эффективны рупоры с экспоненциальной функцией показателя расширения.

Поскольку акустические свойства рупора зависят от его геометрии, следует предположить, что неокклюзированное (открытое) наружное ухо человека имеет передаточную функцию, определяемую его анатомическими размерами, а также упругостью барабанной перепонки.

В исследовании [18] с использованием 3-D моделирования наружного уха были обнаружены две резонансные частоты в диапазоне от 100 Гц до 10 кГц и значительное увеличение звукового давления вблизи барабанной перепонки на частотах 3 и 8 кГц.

Естественно, что все это имеет индивидуальный характер и может меняться с возрастом — ростом размеров ушей как у детей, так и у взрослых, ослаблением мышц барабанной перепонки к старости. Правое и левое ухо одного человека также могут иметь различия [8, 10]. Со-

ответственно, результаты измерений звукового давления методом *F-MIRE* будут зависеть от передаточной функции наружного уха.

Имеется достаточное количество исследований, в которых отмечено, что положение зонда микрофона внутри *MAE* имеет значительное влияние на результаты измерений звукового давления особенно для частот выше 3 кГц. Изменения звукового давления в разных положениях на протяжении внешнего акустического прохода могут достигать 10–15 дБ (*Dirksetal.*, 1994) [16], для относительных измерений на «реальном ухе» конец трубки микрофонного зонда должен быть расположен в одном и том же месте вдоль наружного слухового прохода, т.е. на одинаковой глубине.

Материалы и методы. Исследование основано на применении метода *F-MIRE* с использованием двухканальных шумомеров-анализаторов спектра типа SV-102 с микрофоном *MIRE* типа SVSS (зонд длиной 16 мм) и наружного микрофона типа SV2SD для каждого уха добровольца. Коррекция на характеристики зонда устанавливалась в шумомерах. Измерялись уровни звукового давления в октавных полосах частот и уровни звука *A* и *C* в каждом измерительном канале, которые регистрировались каждую секунду периода измерения. При анализе хронограмм определялись эквивалентные уровни измеряемых параметров, из анализа могли быть удалены участки записи с помехами, вызванными поведением добровольцев. Записи анализировались специальным ПО «*Supervisor*». Оборудование и ПО производства «*Svantek*», Польша.

Исследование состояло из двух этапов, на первом - измерения проводились для определения передаточной функции наружного уха (передаточной функции в виде коэффициентов в октавных полосах частот и в уровнях звука *A* и *C*), для чего использовалось специальное оголовье с амбушюрами без шумозащитных чашек и кронштейнами для крепления наружных микрофонов на расстоянии 10 см от головы добровольца. На втором этапе измерения проводились с использованием наушника типа COM3-1 «Ягуар» для определения его шумозащитных свойств.

Оба этапа измерений проводились с участием 18 рабочих-добровольцев (мужчины в возрасте 34,5±4,4 года, стаж работы — 18,5±3,7 года) на рабочих местах горно-обогатительного производства, участки суши и грануляции. Места измерения выбраны по соображениям стабильности уровней и спектрального состава производственного широкополосного шума, используемого в качестве «испытательного сигнала», точки измерения были приближены к технологическому оборудованию (на расстояние около 5 м).

Во время измерения для определения передаточной функции наружного уха и шумозащитных свойств наушника добровольцы находились в позе «сидя» и не выполняли рабочих операций. Длительность каждого измерения составляла 5 минут.

Исследования соответствовало этическим стандартам Хельсинской декларации (2000 г.), выполнено с информированного согласия добровольцев на участие в нем и одобрено этическим комитетом ФГБНУ «НИИ МТ».

Перед проведением измерений все добровольцы были осмотрены врачом-отоларингологом. Установка зондового микрофона производилась под отоскопическим контролем.

Передаточная функция наружного уха определялась как разность звуковых давлений, измеренных микрофоном

⁶ ИСО 389-7:2005 Акустика. Опорный нуль для калибровки аудиометрической аппаратуры. Часть 7. Опорный порог слышимости при прослушивании в условиях свободного и диффузного звуковых полей.

⁷ ГОСТ Р ИСО 28961–2014 Акустика. Статистическое распределение порогов слышимости людей с нормальным слухом в возрасте от 18 до 25 лет при прослушивании в условиях свободного звукового поля.

Таблица 1 / Table 1

Уровни звука А и С и звукового давления в октавных полосах частот в точках измерения у правого и левого уха добровольца
Octave band sound pressure levels, A-weighted and C-weighted sound pressure levels in control points of the volunteer's right and left ear

Точки измерения	Уровни звукового давления в октавных полосах частот, Гц, и уровни звука А и С, дБ										
	31,5	63	125	250	500	1к	2к	4к	8к	А	С
Участок суши											
у правого уха	90,5	90,4	86,8	88,7	85,5	82,2	78,3	73,7	72,6	87,6	95,4
у левого уха	89,6	90,4	86,9	88,6	86,2	82,1	78,2	72,8	70,0	87,6	95,2
Участок грануляции											
у правого уха	91,3	96,0	91,1	89,7	87,6	83,8	85,1	82,7	75,7	91,3	98,7
у левого уха	90,5	95,1	91,3	88,8	87,1	83,3	84,7	81,8	74,4	90,7	98,0

MIRE и внешним микрофоном в соответствующих октавных полосах частот, и по разности уровней звука А и С.

Акустическая эффективность чашки противошумного наушника также определялась как разность звуковых давлений (уровней), измеренных микрофоном MIRE и внешним микрофоном при надетом наушнике, из которой вычиталась соответствующая величина передаточной функции.

По результатам измерений АЭ СИЗОС для каждого добровольца были определены средние, максимальные и минимальные величины АЭ и стандартное отклонение для всей выборки. Статистические величины определены табличным процессором «MS Excell».

Результаты. В таблице 1 представлены спектральные характеристики и уровни звука А и С шума (испытательного сигнала) в точках измерения у правого и левого уха добровольца.

Уровни звука производственного шума, воздействующего на рабочих-добровольцев на рабочих местах в период проведения измерений в обозначенных точках (табл. 1), превышали установленные СанПиН 1.2.3685⁸ нормативы на участке суши на 8 дБА и участке грануляции на 11 дБА, что соответствует вредному классу условий труда 3.2 согласно Руководству 2.2.2006-05⁹.

На рисунке 1 представлены хронограммы уровней звука А зарегистрированные за каждую секунду пятиминутного (300 с) периода измерений внешним микрофоном и микрофоном MIRE, а так же эквивалентные уровни звука и звукового давления в октавных полосах частот за пятиминутный опорный интервал для левого уха на примере одного из добровольцев. Различия уровней звука на хронограммах обусловлено резонансными свойствами наружного уха.

В качестве примера на рисунке 2 представлены результаты измерений величин передаточной функции наружного уха в октавных полосах частот и в уровнях звука А и С некоторых добровольцев.

Как видно по этим результатам, передаточные функции наружного уха добровольцев имеют индивидуальный ха-

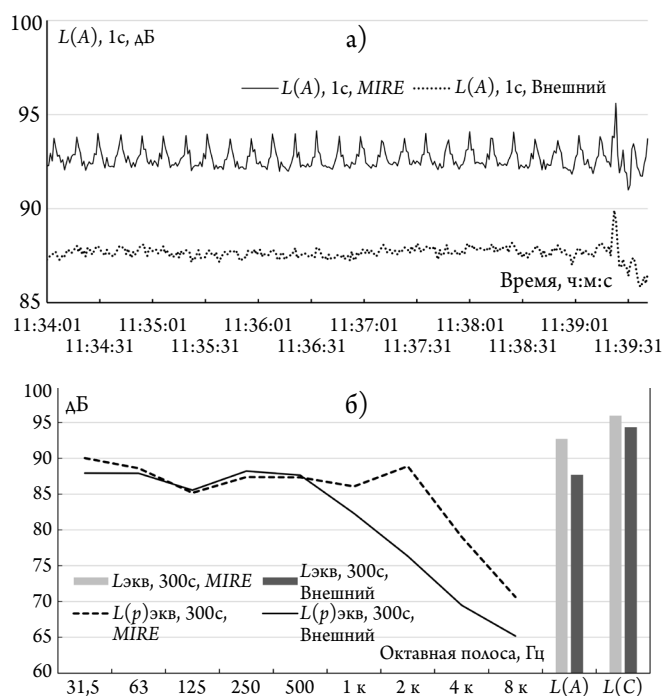


Рис. 1. а) хронограммы уровней звука А за каждую секунду пятиминутного периода, измеренные внешним микрофоном (на рис. — Внешний) и микрофоном MIRE при открытом ухе; **б)** эквивалентные уровни звука и звукового давления в октавных полосах частот, измеренные внешним микрофоном (на рис. — Внешний) и микрофоном MIRE за пятиминутный опорный интервал.

Fig. 1. a) chronograms of A-weighted sound pressure levels for each second of a five-minute period measured by an external microphone and a MIRE microphone in an open ear; **б)** equivalent sound pressure levels in octave bands, A-weighted and C-weighted sound pressure levels measured by an external microphone and a MIRE in an open ear microphone over a five-minute reference interval.

актер, отмечаются различия, иногда значительные даже для правого и левого уха одного добровольца.

В октавных полосах частот до 500 Гц величины передаточной функции близки к 0 дБ, и в большей мере могут определяться неопределённостью измерений на низких частотах.

Резонансные свойства наружного уха определённо проявляются в октавных полосах от 1000 до 8000 Гц и

⁸ СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и(или) безвредности для человека факторов среды обитания».

⁹ Р 2.2.2006-05 «Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда».

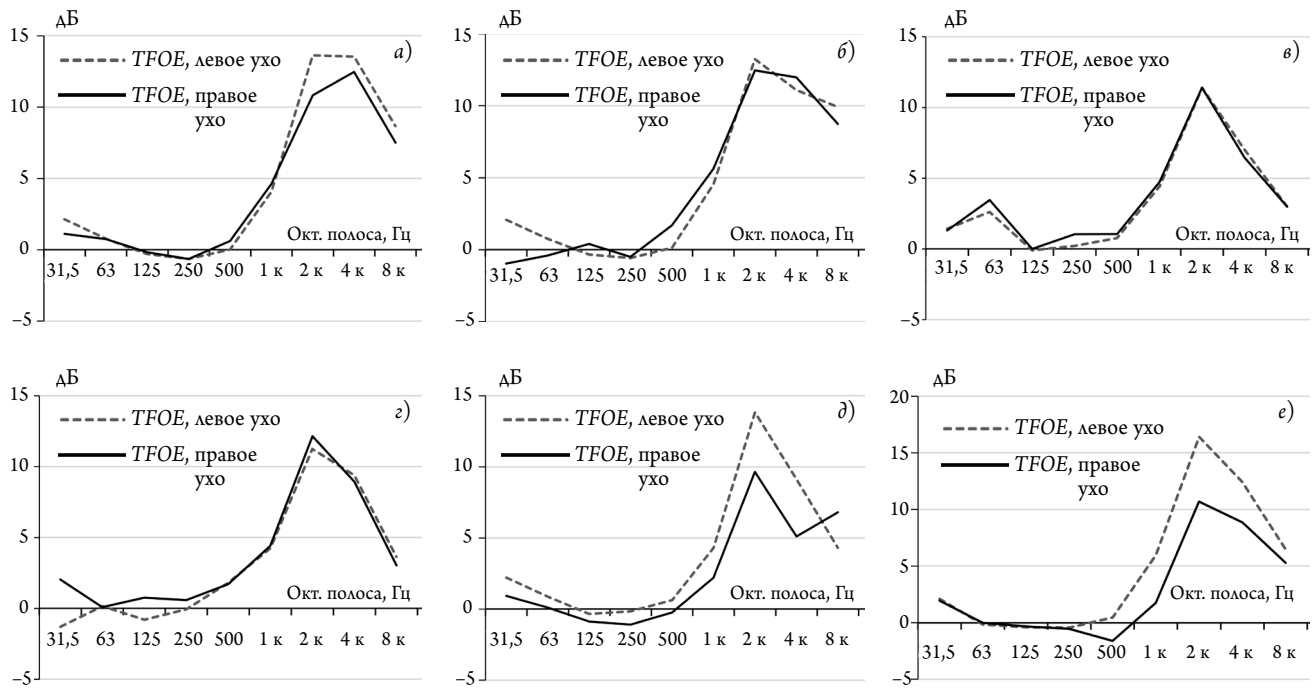


Рис. 2. Результаты измерений величин передаточной функции наружного уха (TFOE) в октавных полосах частот и в уровнях звука A и C некоторых добровольцев.

Fig. 2. External ear transfer function (TFOE) in octave bands and in A-weighted and C-weighted values of some volunteers.

максимальны в октаве 2000 Гц, где величины передаточной функции имеют значения от 6,8 до 16,4 дБ, по уровню звука A достигают 13,4 дБ, по уровню звука C — 7,5 дБ.

На **рисунке 3а** представлены хронограммы уровней звука A за каждую секунду пятиминутного периода измеренные внешним микрофоном и микрофоном MIRE; на **рисунке 3б** — уровни звука и звукового давления в октавных полосах частот за пятиминутный опорный интервал при надетом противошумном наушнике типа COM3-1 «Ягуар» (расчётные уровни звукового давления с учётом передаточной функции наружного уха условно изображены в виде линии из точек).

Расчётные величины разностей уровней звука и звукового давления в октавных полосах частот, измеренных внешним микрофоном и микрофоном MIRE, и реальной акустической эффективности противошумного наушника с учётом передаточной функции наружного уха одного из добровольцев указаны на **рисунке 4**.

Представляют интерес сравнительная оценка усреднённых величин акустической эффективности противошумного наушника с учётом передаточной функции наружного уха, измеренных в производственных условиях (на участках сушки и грануляции), с лабораторными данными, полученными с использованием устройства для измерений акустической эффективности (ATF по ГОСТ 12.4.318-2019) при испытательном сигнале в виде «розового» шума (**рис. 5**).

Полученные в лаборатории результаты АЭ противошумного наушника COM3-1 «Ягуар» по уровню звука «А» 26,7±0,7 дБ практически совпадает с заявленным производителем показателем акустической эффективности — SNR = 27 дБ.

Таким образом, данные, полученные в результате производственных и лабораторных исследований, свидетельствуют о результативности применяемого метода F-MIRE для измерения акустической эффективности противошум-

ных наушников с учётом передаточной функции наружного уха.

Использование специального оголовья при реализации метода F-MIRE для оценки передаточной функции наружного уха позволяет стандартизовать положение измерительных микрофонов относительно головы и снизить неопределённость измерений.

Метод фактически прямого измерения передаточной функции наружного уха (TFOE) менее трудоёмок и, возможно, более точен, чем метод расчёта TFOE с использованием результатов субъективной оценки (REAT).

Метод F-MIRE позволяет определить TFOE для каждого уха работника, что невозможно при использовании REAT при бинауральном прослушивании в свободном звуковом поле. Проведённые в работе исследования показали, что различия между правым и левым ухом могут быть значительными.

Определение акустической эффективности СИЗОС по разности звуковых давлений, измеренных внешним микрофоном и микрофоном MIRE, без учёта акустических свойств наружного уха, в ранее выполненных исследованиях [9], занижает спектральные и одночисловые показатели акустической эффективности, что наглядно проиллюстрировано на **рисунках 3 и 4**.

Величины акустической эффективности по уровню звука «А», полученные в двух группах производственных исследований, достаточно близки и, примерно, на 6 дБ ниже полученных в лабораторных исследованиях, что может быть объяснено расхождением спектрального состава шума. При этом следует отметить, что производственный шум на участках был широкополосным, на участке сушки он имел низкочастотный характер, на участке грануляции — с меньшим преобладанием низких частот (**табл. 1**). В лабораторных исследованиях использовался «розовый шум» практически с равномерной спектральной плотностью в диапазоне частот 80–10000 Гц.

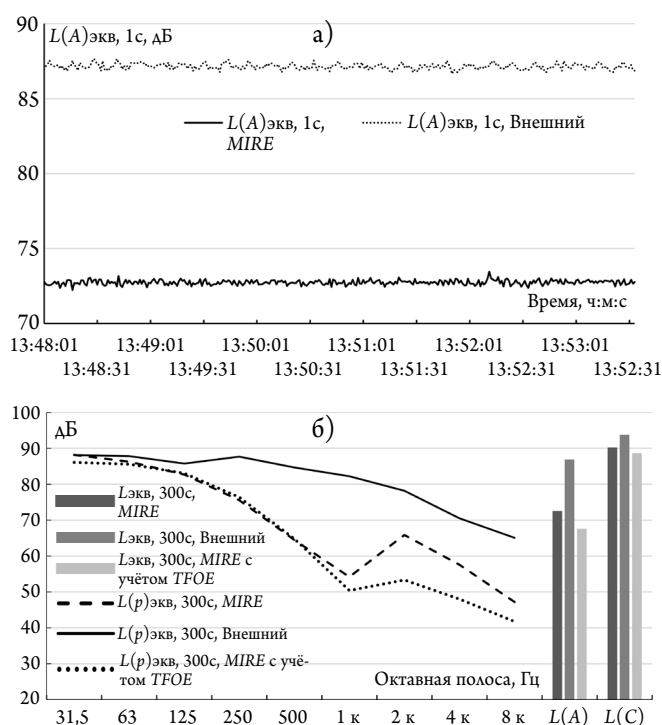


Рис. 3. а) хронограммы уровней звука А за каждую секунду пятиминутного периода, измеренные внешним микрофоном (на рис. — Внешний) и микрофоном MIRE при надетом противошумном наушнике, б) эквивалентные уровни звука и звукового давления в октавных полосах частот за пятиминутный опорный интервал при надетом противошумном наушнике и расчётные величины звукового давления с учётом TFOE.
Fig. 3. а) chronograms of A-weighted sound pressure levels for each second of a five-minute period measured by an external microphone and a MIRE microphone when earmuff are worn; б) equivalent sound pressure levels in octave bands, A-weighted and C-weighted sound pressure levels measured by an external microphone and a MIRE microphone when earmuff are worn over a five-minute reference interval and calculated sound pressure levels taking into account TFOE.

Заключение. Настоящее исследование представляет собой попытку более подробного изучения некоторых причин расхождений, наблюдаемых между результатами полевых и лабораторных измерений акустической эффективности средств индивидуальной защиты органа слуха.

Результаты, представленные в данной работе, показывают потенциал метода F-MIRE для анализа и понимания значимости различных факторов, влияющих на акустическую эффективность СИЗОС.

Необходимо продолжить исследования по определению стабильности акустических характеристик на-

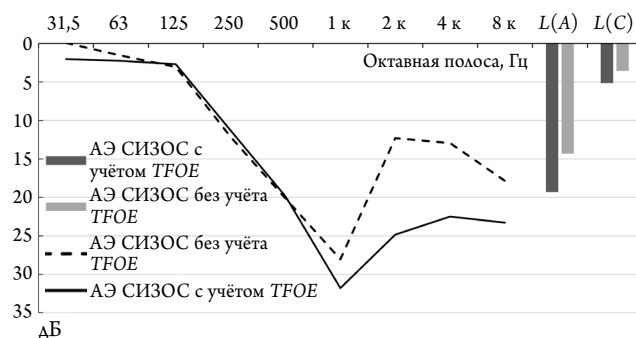


Рис. 4. Величины акустической эффективности противошумного наушника без учёта и с учётом передаточной функции наружного уха (TFOE) одного из добровольцев.

Fig. 4. Ear-muff NR values taking into account TFOE and without it in one of the volunteers.

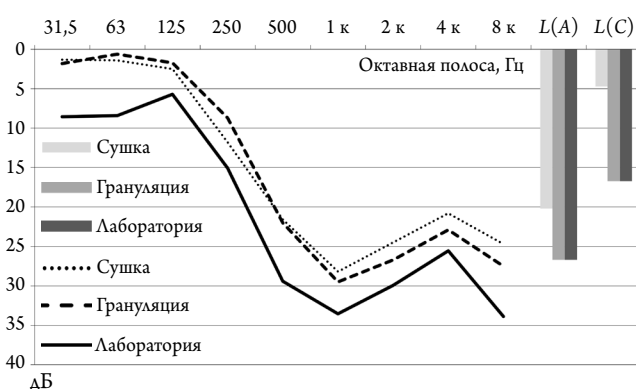


Рис. 5. Величины акустической эффективности противошумного наушника с учётом передаточной функции наружного уха по результатам измерений в производственных и лабораторных условиях.

Fig. 5. Ear-muff NR average values taking into account TFOE, in industrial conditions measurements and laboratory conditions measurements according to ISO 4869-3:2007 requirements

ружного уха в различных условиях. Однако, если такие изменения будут найдены, они, вероятно, окажутся незначительными, так как акустические характеристики наружного уха определяются, прежде всего, формой и размерами ушной раковины и наружного слухового прохода [16, 19, 20].

Следует продолжить исследования по изучению влияния анатомических (антропометрических) параметров наружного уха с учётом возрастных изменений на его передаточную функцию. Это важно в плане объективизации оценки акустической эффективности средств индивидуальной защиты органа слуха.

Список литературы / References

- Behar A. Field evaluation of hearing protectors. *Noise Control Eng J.* 1985; 24: 13–7.
- Berger E.H., Franks J.R., Lindgren F., Axelsson A., Borchgrevink H., Hamernik R.P., Hellstrom L., Henderson D., Salvi R.J. Chapter 29 — international review of field studies of hearing protector attenuation, Scientific basis of noise-induced hearing loss. 1996, New-York, NY Thieme Medical Publisher: 361–77.
- Casali J.G., Park M.-Y. Attenuation of four hearing protectors under dynamic movement and different user fitting conditions. *Hum factors.* 1990; 32: 9–25.
- Nélisse H., Gaudreau M.-A., Boutin J., Voix J., Laville F. Measurement of Hearing Protection Devices Performance in the Workplace during Full-Shift Working Operations. *The Annals of Occupational Hygiene.* 2012; 56(2): 221–32. <https://doi.org/10.1093/annhyg/mer087>
- Berger E.H. *Hearing protector performance: how they work — and — what goes wrong in the real world.* 1980 E-A-RLog Series of Technical Monographs on Hearing and Hearing Protection. Indianapolis, IN: 3M Company: 1–4.

6. Durkt G.J. Field evaluations of hearing protection devices at surface mining environments, 1993 Pittsburgh, PAU. S. Department of Labor, Mine Safety and Health Adminpg: 39
7. Giardano D.A., Durkt G.J. Evaluation of muff-type hearing protectors as used in a working environment. *Am Ind Hyg Assoc J.* 1996; 57: 264–71.
8. Otte R.J., Agterberg M.J.H., Van Wanrooij M.M., Snik A.F.M., Van Opstal A.J. (2013). Age-related hearing loss and ear morphology affect vertical but not horizontal sound-localization performance. *J. Assoc. Res. Otolaryngol.* 14: 261–73. <https://doi.org/10.1007/s10162-012-0367-7>
9. Kotarbińska E., Kozłowski E. Measurement of effective noise exposure of workers wearing earmuffs. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics (JOSE).* 2009; 15(2): 193–200.
10. PralongD., Carlile S. Measuring the human head-related transfer functions: a novel method for the construction and calibration of a miniature "in-ear" recording system. *J. Acoust. Soc. Am.* 95: 3435–44.
11. Shaw E.A., and Teranishi, R. Sound pressure generated in an external-ear replica and real human ears by a nearby point source. *J. Acoust. Soc. Am.* 1968; 44: 240–9. <https://doi.org/10.1121/1.1911059>
12. Voix J. Mise au point d'un bouchond'oreille "intelligent". 2006 Thèse de doctorat. Montréal, Canada: École de Technologie Supérieure.
13. Voix J., Laville F. The objective measurement of individual earplug field performance. *J Acoust Soc Am.* 2009; 125: 3722.
14. Voix J., Hager L.D. Individual Fit Testing of Hearing Protection Device. 2015; 08 Jan: 211–219 <https://doi.org/10.1080/10803548.2009.11076802>
15. Berger E.H. *Introducing F-MIRE testing: background and concepts (Report EAR 06-29/HP)*. Indianapolis, IN, USA: Aeero; 2007.
16. Searchfield G.D., Purdy S.C. Probe Microphone Placement for Real Ear Measurement: Update on a Simple Acoustic Method. *American Journal of Audiology.* 1997; 6(2): 49–54. <https://doi.org/10.1044/1059-0889.0602.49>
17. Алдошина И.А. Основы психоакустики. [Aldoshina I.A. Osnovy_psihoakustiki] Available at: https://nsk.jagannath.ru/users_files/books/Osnovy_psihoakustiki.pdf
18. Areias B., Parente M., Gentil F., Santos C., Jorge R.N. A numerical study of the human ear. Conference: 2017 IEEE 5th Portuguese Meeting on Bioengineering. Available at: <https://doi.org/10.1109/ENBENG.2017.7889442>
19. Carlile S., Pralong D. The location-dependent nature of perceptually salient features of the human head-related transfer function. *J. Acoust. Soc. Am.* 95, 3445–3459. <https://doi.org/10.1080/10803548.2009.11076802>
20. Wenzel E.M., Arruda M., Kistler D.J., Wightman F.L. (1993). Localization using non-individualized head-related transfer functions. *J. Acoust. Soc. Am.* 1993; 94, 111–23.