

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9325133/>
<https://doi.org/10.3390/ijerph19148482>
<https://www.mdpi.com/1660-4601/19/14/8482>

International Journal of Environmental Research and Public Health

ISSN 1660-4601



International Journal of *Environmental Research and Public Health*

2022 г., [Том 19](#), [№ 14](#), статья № 8482

Прибор для проверки ослабления шума вкладышами

A Tester to Evaluate the Correct Placement of Earplugs

Авторы: Emil Kozlowski¹ *, Rafal Mlynski² , Leszek Morzynski³ и Adam Swidzinski

¹ <https://orcid.org/0000-0003-4685-1145>, ² <https://orcid.org/0000-0002-0500-0638>, ³ <https://orcid.org/0000-0003-3534-3284>
Department of Vibroacoustic Hazards, Central Institute for Labor Protection—National Research Institute, Czerniakowska 16, 00-701 Warsaw, Poland; rmlynski@ciop.pl (R.M.); lmorzyns@ciop.pl (L.M.); adswi@ciop.pl (A.S.)

* Correspondence: emkoz@ciop.pl; Tel.: +48-22-623-3294

Реферат

Одним из возможных путей профилактики негативного влияния (чрезмерного) [шума на здоровье](#) является использование средств индивидуальной защиты органа слуха ([СИЗОС](#)). При этом следует иметь в виду, что СИЗОС могут защитить от шума лишь в том случае, если они правильно применяются (надеваются или вставляются). В этой статье описан новый прибор, предназначенный для измерения ослабления шума вставляемыми в слуховой канал [вкладышами](#) (и, таким образом, проверки того, правильно ли они установлены, и соответствуют ли они слуховому каналу по форме и размеру — прим.). Для изготовления прибора использовались недорогие и доступные комплектующие. Для определения ослабления шума измеряли пороги восприятия звуков ухом (*real-ear attenuation at threshold, REAT*). В приборе использованы шумоизолирующие наушники, хорошо ослабляющие внешний низкочастотный шум. Сравнение результатов измерений, сделанных с помощью этого прибора, и специально разработанной для таких замеров системы (*Norsonic NOR838*), показало, что они отличаются менее чем на 5 дБ. Можно считать, что разработанный прибор позволяет достаточно точно измерять ослабление шума. Поэтому его можно использовать для проверки того, умеет ли работник правильно устанавливать вкладыши в слуховой канал, (и соответствуют ли они ему по форме и по размеру).

Ключевые слова: средства индивидуальной защиты органа слуха (СИЗОС); вкладыши; средства индивидуальной защиты (СИЗ); [проверка изолирующих свойств](#) (*fit testing*); ослабление шума; шум.

1. Введение

Чрезмерное воздействие шума является одной из основных причин [нейросенсорной тугоухости](#) у взрослых людей. По оценкам [1] около 16% от всего населения планеты страдает от значительного ухудшения слуха, вызванного воздействием сильного производственного шума. Для снижения риска такого ухудшения слуха могут использоваться разные методы профилактики, одним из которых является применение СИЗОС. В то же время нельзя забывать, что СИЗОС могут эффективно защищать от шума лишь тогда, когда они правильно применяются. Их эффективность (как профилактического средства) зависит от их конструктивной способности ослаблять шум; от правильности их надевания или установки; и от своевременности использования [2]. (Конструктивная) способность СИЗОС ослаблять шум — параметр изделия, не зависящий от работника. В Европейском Союзе его измеряют в соответствии со стандартом *EN ISO 4869-1:2018* [3-1]. Кроме того, есть другие параметры, которые влияют на эффективность, и зависят от работников. Например, они могут использовать повреждённые или изношенные СИЗОС, не обеспечивающие эффективную защиту от шума [4,5,6]. На практике работники часто используют СИЗОС одновременно с другими средствами индивидуальной защиты, что может ухудшить защиту от шума [7-1 – 13-1]. Также большое значение имеет то, используют ли СИЗОД своевременно, каждый раз при воздействии сильного шума. К сожалению, нередко бывает, что рабочие используют СИЗОС с перерывами, а порой и вовсе не применяют [14–18]. Перерывы в использовании резко снижают эффект от применения СИЗОС [19]. Также эффективность может снизиться из-за того, что работники неправильно их используют, т. к. не знают, как это следует делать [20]. (Ряд проведённых) исследований показал, что проведение (качественного) обучения правильному применению СИЗОС может повысить их эффективность [21–26]. Такое обучение можно проводить разными способами. Разработано много программ вводных курсов обучения, в которых используются плакаты, фотографии или видеоролики. Хорошие результаты даёт обучение работников квалифицированными специалистами, показывающими, как правильно применять СИЗОС. Проведение такого обучения можно улучшить, используя устройства, позволяющие проверить [правильность использования СИЗОС](#); которые также позволяют проверить конечный результат (насколько хорошо работник обучен) [27-1 - 32-1]. Разработанные специально для этой цели приборы могут использовать звуковые сигналы, и регистрировать реакцию работников на них, измеряя ослабление шума. Такая проверка имеет особенно большое значение для СИЗОС, устанавливаемых в слуховой канал (вкладышей), так как они очень часто вставляются неправильно (*у части работников ослабление шума может быть близким к нулю — прим.*) [13-2,33].

В этой статье описана конструкция прибора, измеряющего фактическое ослабление шума вкладышами, и его изготовление. Также представлены результаты испытаний прибора, подтвердившие его работоспособность; и испытаний, проводившихся при выборе наушников для прибора.

2. Материалы и методы

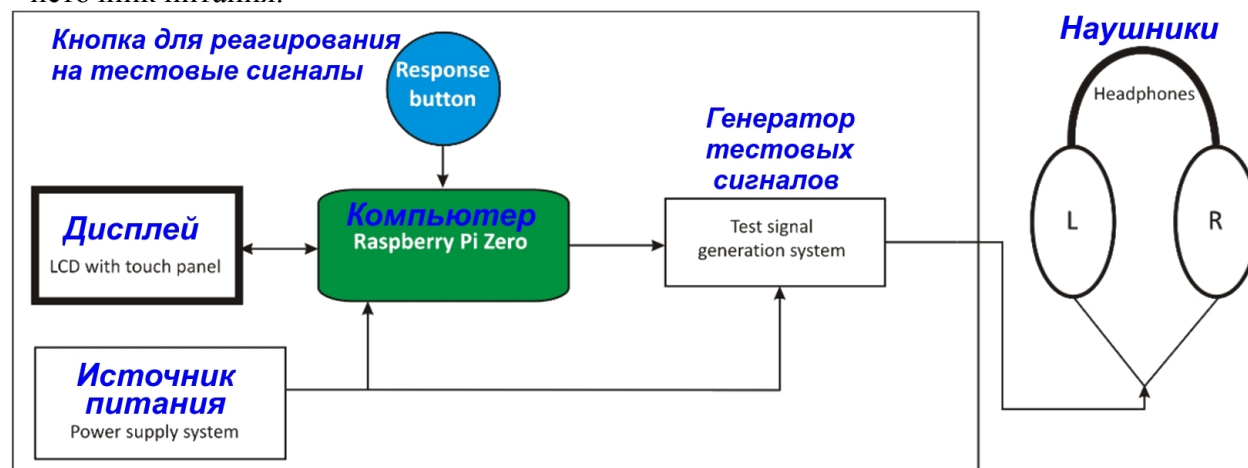
2.1. Принцип работы и устройство прибора

При разработке прибора мы планировали использовать легкодоступные и недорогие компоненты (*стоимость систем для измерения ослабления шума СИЗОС, имеющих в продаже, может составлять 3-4 тыс. долларов США, что мешает их более широкому использованию даже в развитых странах — прим.*); что устройство сможет проводить замеры самостоятельно (например, без подключения к персональному компьютеру); и что измерение ослабления шума будет проводиться путём определения порогов восприятия звуков (метод *REAT*), что позволит измерить ослабление шума вкладышами. Метод *REAT* состоит в определении [порогов восприятия звуков](#) разных частот ухом человека, с и без СИЗОС. Для измерения порогов используют аудиометрию по [методу Бекеша](#). Для определения порогов вычисляют среднее значение, полученное при 20 изменениях громкости, а первые 4 результата не используют. Методика проведения измерений предполагает не использование результатов,

полученных у одного участника, в тех случаях, если они сильно отличаются друг от друга. Отличие в порогах восприятия звуков, измеренных с и без СИЗОС, считается показателем ослабления шума СИЗОС. (В Европейском Союзе) такие замеры ослабления обычно проводят с привлечением 16 участников. Результаты измерений у отдельных участников используют для вычисления среднего ослабления шума, стандартного отклонения, и прогнозируемого ослабления шума (*APV, assumed protection value*). Последний параметр (в ЕС) получают, вычитая из среднего ослабления стандартное отклонение. Эти свойства конкретной модели СИЗОС, измеренные в лабораторных условиях при сертификации (проводимой в соответствии со стандартом *EN ISO 4869-1:2018* [3-2]), приводятся в руководстве по его эксплуатации. Обычно измерения ослабления шума проводят в специально оборудованном помещении, обеспечивающем необходимые акустические условия (низкий уровень фонового шума, требуемые свойства звукового поля и время реверберации). С помощью кнопки участник реагирует на звуковые сигналы. Они создаются из «розового» шума путём фильтрации, так, что получаются полосы 1/3 октавы с центральными частотами от 125 Гц до 8 кГц. В отличие от метода, используемого при сертификации СИЗОС, в нашем приборе источниками сигналов были наушники. Работник мог реагировать на звуковые сигналы, используя кнопку на приборе. Это позволяло определять пороги восприятия звуков с и без СИЗОС, и таким образом получать ослабление шума у вкладышей. Как и при «стандартной» проверке, сигналами были звуки, полученные из «розового» шума путём фильтрации (полосы 1/3 октавы) с центральными частотами от 125 Гц до 8 кГц, использовалась аудиометрия по Бекешу.

При использовании этого прибора для определения того, правильно ли установлены вкладыши (и соответствуют ли они слуховому каналу по форме и размеру) проводится измерение ослабления шума прибором, и результат сравнивается с приведённым в руководстве по эксплуатации СИЗОС. Прибор состоял из следующих частей:

- компьютер *Raspberry Pi Zero v.1.3 single-board computer*;
- жидкокристаллический светодиодный монитор с тачпадом и кнопками;
- система для создания тестовых сигналов;
- наушники;
- кнопка для реагирования на сигналы;
- источник питания.



Фиг. 1. Конструкция прибора, основные части.

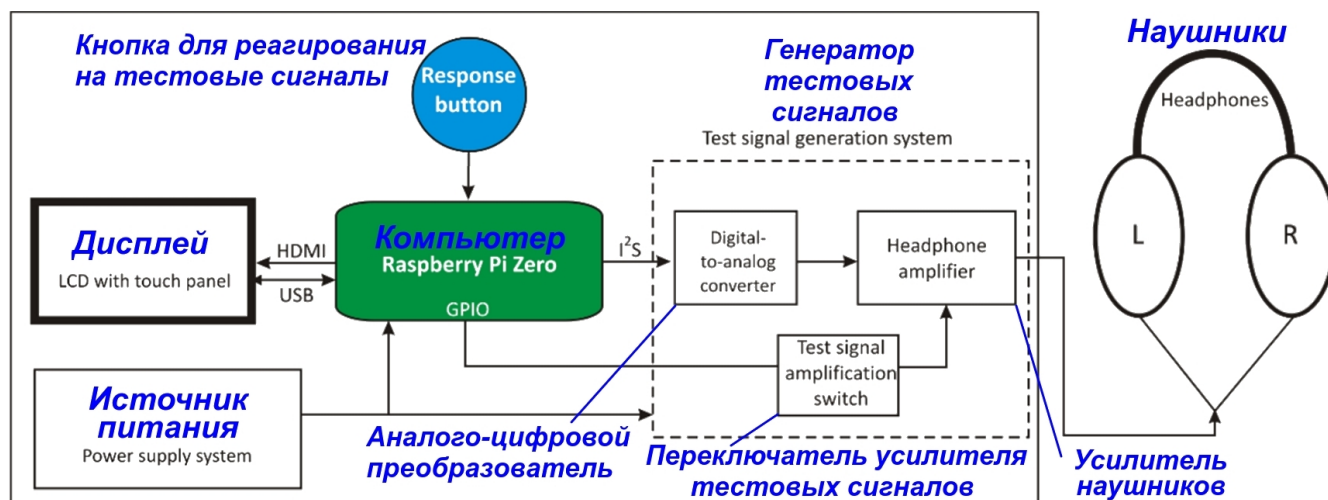
Такие компьютеры часто используют для создания изделий, которое работает используя своё (не внешнее) устройство управления. В данном случае компьютер управлял работой прибора, и одновременно использовался для создания тестовых сигналов. В компьютере имелся микропроцессор 1 ГГц и оперативная память 512 Мб. На плате компьютера был разъём для установки карты памяти, и ряд других разъёмов: для подключения питания, для связи (*high-definition multimedia multimedia interface interface*, HDMI) и USB, и разъём с 40 контактами общего назначения. Операционная система и другая информация хранились на карте памяти (*micro SD*). Кроме того, через разъём к компьютеру присоединялась печатная плата, на которой находился

концентратор (*hub*), где имелось 4 разъёма USB. Это позволяло присоединять к компьютеру монитор, и другие внешние устройства (например, для пусконаладочных работ — клавиатуру).

Для того, чтобы пользователь управлял компьютером и получал от него информацию, использовался 7-дюймовый (18 см) жидкокристаллический светодиодный монитор с тачпадом и кнопками 1024×600 пикселей, соединявшийся с компьютером через разъём HDMI, а для подачи питания и передачи команд пользователя использовался разъём USB.

Генератор тестовых сигналов

Чтобы не перегружать операционную систему компьютера, использовали 24-битный аналого-цифровой преобразователь (*digital-to-analog converter DAC*), подключаемый к компьютеру как внешнее устройство. Для этого использовали интерфейс *Inter-IC Sound (I²S)*, и разъём с 40 контактами. Так как I²S — одна из составных частей периферийных устройств для микропроцессора *Broadcom BCM2835*, с которым разрабатывался этот компьютер, и драйверы этого модуля в операционной системе хорошо настроены, то цифровая передача тестового сигнала не создавала большой нагрузки на процессор и другие системы компьютера. После преобразования цифрового тестового сигнала в аналоговый он усиливался усилителем. Для этого использовали высококачественный усилитель наушников *Topping NX1*, у которого отношение сигнал/шум было не менее чем 117 дБ. Использование усилителя позволило получать тестовые сигналы с большей громкостью, чем звуковая карта. Проверка системы также не выявила искажений тестового сигнала. Кроме того, такая система позволяла «ступенчато» изменять степень усиления. То есть, это позволяло создавать (в наушниках) звуковой сигнал с маленькой громкостью (для замера порогов без вкладышей) и с большой громкостью (замер с вкладышами), используя для этого (исходный) слабый (тихий) цифровой сигнал, и включая / выключая усилитель. Таким образом, не требовалось использовать слабые (тихие) исходные сигналы для получения тихих сигналов (в наушниках). При замерах порогов с использованием вкладышей этот усилитель наушников увеличивал громкость на 12 дБ. На фиг. 2 показана структурная схема прибора, с учётом использования усилителя наушников.



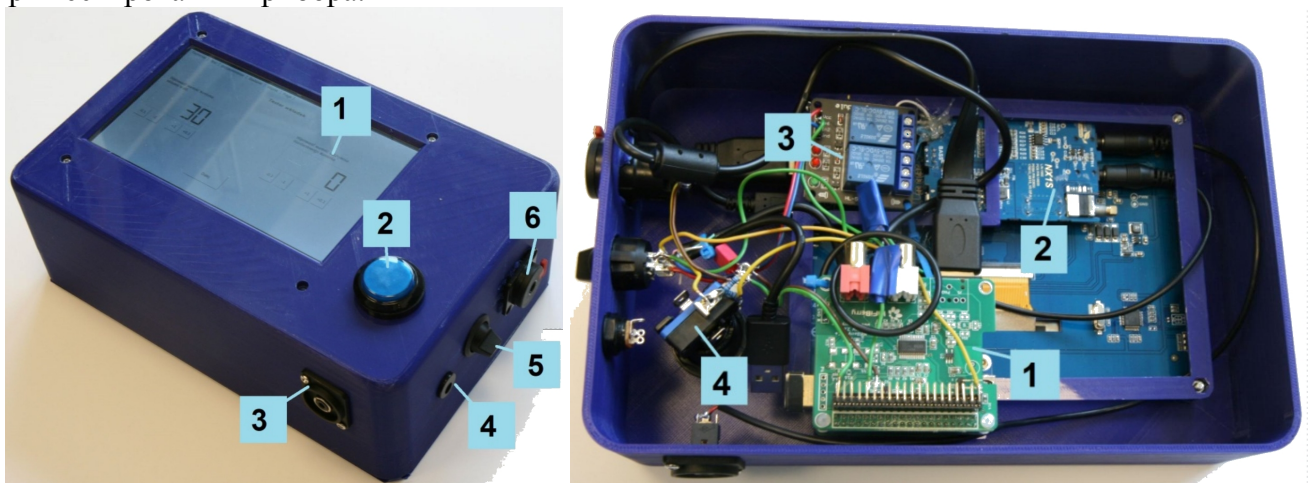
Фиг. 2. Конструкция и основные части прибора, после установки аналого-цифрового преобразователя, и усилителя наушников (включавшегося с помощью отдельного переключателя). Сокращение GPIO: *general purpose input/output* — разъём для связи с внешними устройствами общего назначения.

2.2. Принцип работы прибора

На фиг. 3-5 показан внешний и внутренний вид прибора, собранного в соответствии со схемой на фиг. 2. Электронные компоненты разместили в корпусе, сделанном из полиактида с помощью 3D печати. Для их питания использовали аккумулятор с ёмкостью 12 500 мАч. У аккумулятора была соответствующая защита, система подзарядки, индикатор заряда, и она обеспечивала прибор питанием с напряжением 5 В. Такого напряжения хватало для работы всех

систем прибора, не считая усилителя. А для питания усилителя использовали преобразователь (*step-down system*), понижавший напряжение с 5 до 4,2 вольта. Прибор работал под управлением операционной системы, предназначенной для таких компьютеров их изготовителем ([Линукс](#)). Программа для управления его работой (оператором) была написана на языке программирования [C++](#). Для реагирования на нажатие кнопки работником (сигнализовавшем о том, что громкость звукового сигнала в наушниках соответствует порогу слышимости) использовали (передачу информации через записываемый текстовый файл в памяти прибора). В системной папке (*Raspbian system's directory*) имелась виртуальная папка, где был текстовый файл с информацией о нажатии кнопки работником. Программа, управлявшая работой прибора, отслеживала содержимое файла и его изменения, и таким образом позволяла реагировать (на действия работника). Это позволяло (относительно просто) получать информацию о действиях работника.

Фиг. 3. Внешний вид прибора (слева). 1 — жидкокристаллический светодиодный монитор с тачпадом и кнопками; 2 — кнопка для нажатия работником при достижении порога слышимости; 3 — разъём для подключения наушников; 4 — разъём для зарядки аккумулятора; 5 — выключатель; 6 — дополнительный разъём (*jack connector 6,5 мм*) для подачи сигнала о достижении порога слышимости с помощью (дополнительной) внешней кнопки, использовался при тестировании прибора.



Фиг. 4. Внутренний вид прибора (справа). 1 — компьютер; 2 — усилитель наушников; 3 — переключатель, включавший/выключавший усилитель наушников (0/12 дБ); кнопка для нажатия работником при достижении порога слышимости.



Фиг. 5. Нижняя крышка прибора с прикреплённым к ней аккумулятором.

2.3. Статистический анализ

Для сравнения значений ослабления шума, полученных при использовании прибора и при с помощью измерительной системы [NOR838](#) (изготовитель [Norsonic](#)), проводился статистический анализ с помощью параметрического [t-теста Стьюдента](#); расчёты выполнялись с помощью пакета программ [MATLAB R2010b](#) версия 7.11.0.584 (*MathWorks Inc., Natick, MA, USA*).

2.4. Разрешение на проведение исследования комитета по этике и биоэтике

Перед проведением этого исследования было получено разрешение на выполнение работы и публикацию результатов от комитета по этике и биоэтике [университета кардинала Стефана Вышиньского](#) в Варшаве (номер *KeiB-20/2020*).

3. Результаты

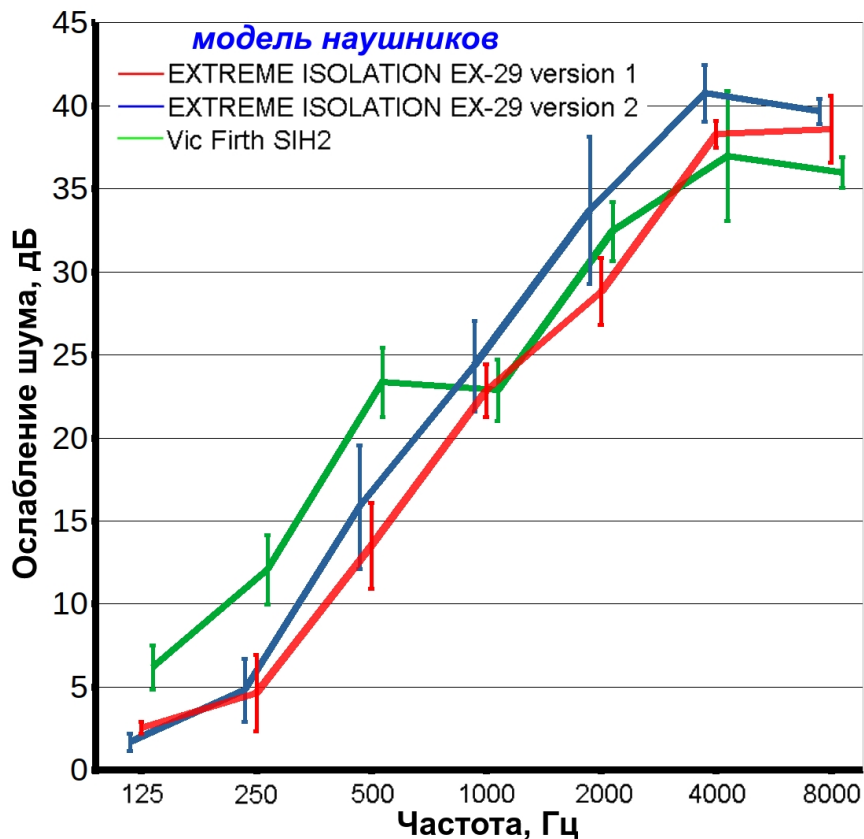
3.1. Выбор наушников

(Мы) определили, какие наушники можно использовать в составе прибора. Для этого выбрали две потенциально подходящие модели наушников (*Extreme Isolation EX-29* [изготовитель *Direct Sound*, декларируемое ослабление шума 36,7 дБ] и *Vic Firth SIH2* [изготовитель *Vic-Firth*, декларируемое ослабление шума 20 дБ]). Их изготовители заявляли, что они обеспечивают хорошее ослабление внешних шумов. Модель *Extreme* изготавливалась в двух вариантах, несколько отличавшихся по конструкции и цвету дужки, соединявшей чашки. Обе модели обеспечивали воспроизведение звуков в широком диапазоне частот, от 20 Гц до 20 кГц, и у них была хорошая чувствительность / КПД (114 дБ/мВт у *Extreme Isolation EX-29* и 110 дБ/мВт у *Vic Firth SIH2*). Это позволяло использовать наушники для измерения порогов восприятия звуков и при применении вкладышей, и без них. Кроме того, (мы) проверили способность наушников ослаблять внешние звуки, что имеет большое значение при использовании прибора в местах со сравнительно высоким уровнем фонового шума.

Замеры ослабления шума наушниками проводили с помощью аудиометрии по методу Бекеша, в помещении, предназначенном для испытаний СИЗОС в соответствии с требованиями стандарта *EN ISO 4869-1:2018* [3-3], с привлечением 4 участников (3 мужчины, 1 женщина, возраст от 20 до 45 лет). Как упоминалось ранее, в ЕС для (сертификационных) измерений ослабления шума у СИЗОС привлекают 16 участников. По двум причинам (мы) использовали меньшее количество людей. Во-первых, исследование носило сравнительный характер: требовалось не точно определить ослабление шума у наушников, а выбрать модель, более подходящую для использования в составе прибора. Во-вторых, (участники) много лет привлекались к замерам ослабления шума у СИЗОС, и было известно, что у них хорошая воспроизводимость порогов восприятия тестовых сигналов. Все участники соответствовали требованиям стандарта *EN ISO 4869-1:2018* [3-4], то есть у них пороги восприятия звуков (чистые тоны) с частотой 2 кГц и ниже были до 15 дБ, а звуков с частотой выше 2 кГц были до 25 дБ). Замеры ослабления шума наушниками проводили с помощью системы *Norsonic NOR838*, работавшей под управлением персонального компьютера; усилителя *Rotel RMB-1075*, и 4 громкоговорителей *JBL 4208*. Для измерений использовали тестовый сигнал, получавшийся из «розового» шума путём фильтрации 1/3 октавных полос с центральными частотами от 125 до 8000 Гц [3-5]. Проводили однократные замеры ослаблений шума наушниками для каждой из полос. Это обычная практика при измерении ослабления шума у СИЗОС [3-6]. Все участники проходили проверку одинаково, т. е. сначала измеряли пороги без наушников, а затем при надетых наушниках. Как упоминалось выше, поскольку у участников была высокая воспроизводимость результатов (порогов восприятия тестовых сигналов), последовательность проведения измерений не имела большого значения.

Отличия в порогах восприятия звуков, измеренные с и без наушников, показывает ослабление шума у данной модели наушников. Эти ослабления, измеренные у 3 моделей, представлены на фиг. 6.

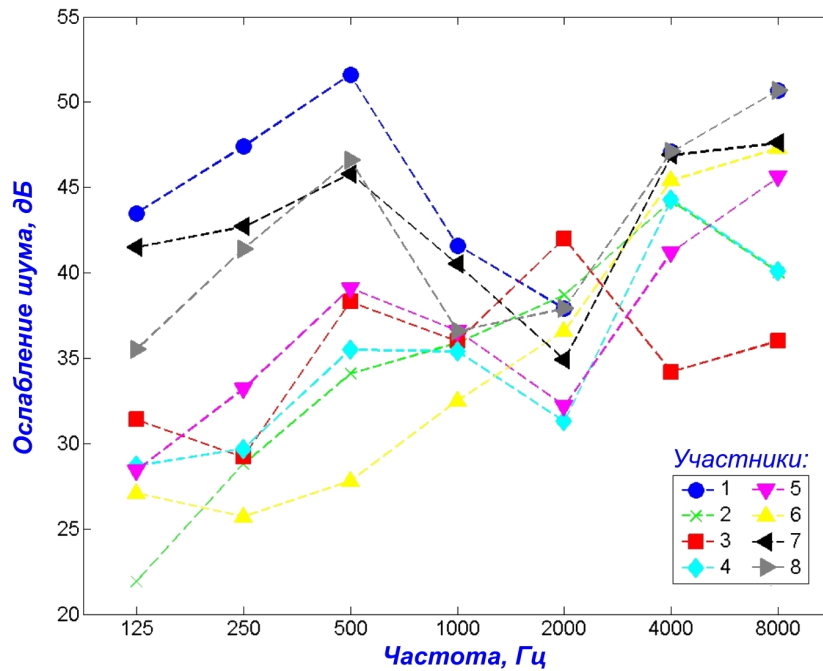
Измерения показали, что модель *Vic Firth SIH2* лучше ослабляет звуки с частотами 125-500 Гц, чем модель *Extreme Isolation EX-29*. И стандартные отклонения (для этих частот) оказались значительно меньше, чем отличия в средних ослаблениях. А ослабление звуков других частот у разных моделей получилось схожим. Важно отметить, что у моделей *Extreme Isolation* ослабление звуков с частотами 125 и 250 Гц было очень маленьким, и не превышало 5 дБ. На основе этих результатов (мы) выбрали модель наушников *Vic Firth* для использования в составе прибора, измеряющего фактическое ослабление шума вкладышами у конкретного работника. Вероятно отличия в ослаблении шума у разных моделей наушников, связаны с их конструктивными отличиями, включая плотность прилегания (к голове). На ослабление звуков с частотой до 500 Гц сильно влияют такие особенности конструкции, как объём чашек, эластичность обтюратора, и площадь его контакта с головой.



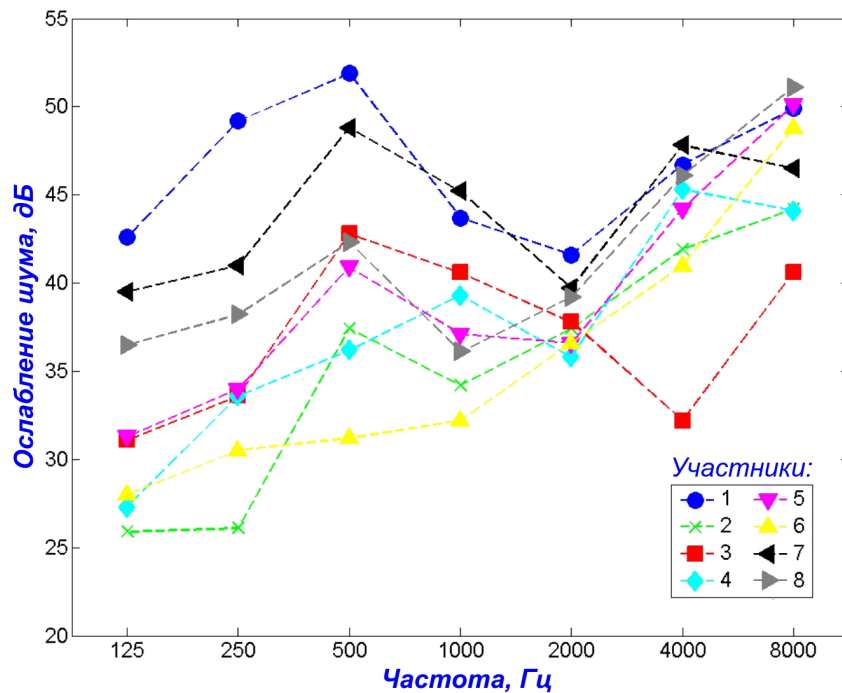
Фиг. 6. Ослабление шума у 3 наушников, средние значения и стандартные отклонения, дБ.

3.2. Использование прибора для измерения ослабления шума (вкладышами)

Чтобы проверить правильность работы прибора, мы использовали его для измерения ослабления шума у популярных вкладышей, [модель 3М 1100](#). В эксперименте участвовало 8 человек (5 мужчин и 3 женщины, возраст 20÷45 лет). Как упоминалось ранее, обычно (при сертификации СИЗОС в Европейском Союзе) замеры ослабления шума проводят с участием 16 человек. Но, например, для проверки качества изделия (*видимо, уже сертифицированного — прим.*) разрешается проводить измерения с участием 8 человек. При проведении этого исследования мы (специально) выбрали таких участников, которые ранее демонстрировали высокую воспроизводимость порогов восприятия звуков тестовых сигналов, и которые умели хорошо вставлять вкладыши в слуховой канал. Для проведения измерений с помощью наушников необходимо, чтобы участники соответствовали требованиям стандарта *ISO 4869-1:2018* в отношении порогов восприятия звуков. Ослабление шума, измеренное с помощью прибора, сравнивалось с результатами измерений «эталонной» системы, специально разработанной для таких проверок (*Norsonic NOR838*, описана в разделе 3.1). Замеры с её помощью проводились у тех же 8 участников. Чтобы правильность установки вкладышей участниками не могла повлиять на результат сравнительных измерений, после их установки проводили замеры порогов обеими устройствами — не вынимая и не поправляя вкладыши. Замеры порогов при использовании СИЗОС у всех участников этими 2 устройствами проводили одинаково, с помощью тестовых сигналов одной и той же частоты. Как упоминалось, эти люди участвовали в подобных измерениях много лет, и у них была высокая воспроизводимость значений порогов восприятия тестовых сигналов. Поэтому последовательности проведения измерений 2 устройствами не должна была повлиять на результат. При замерах ослабления шума с помощью наушников использовались тестовые сигналы, получаемые из «розового» шума путём фильтрации 1/3 октавных полос, с центральными частотами этих полос от 125 до 8000 Гц. Результаты измерений ослабления у отдельных участников при использовании 2 устройств показаны на фиг. 7 и 8. В таблице 1 показаны отличия в результатах измерений 2 устройствами. На фиг. 9 представлены средние ослабления шума и их стандартные отклонения.



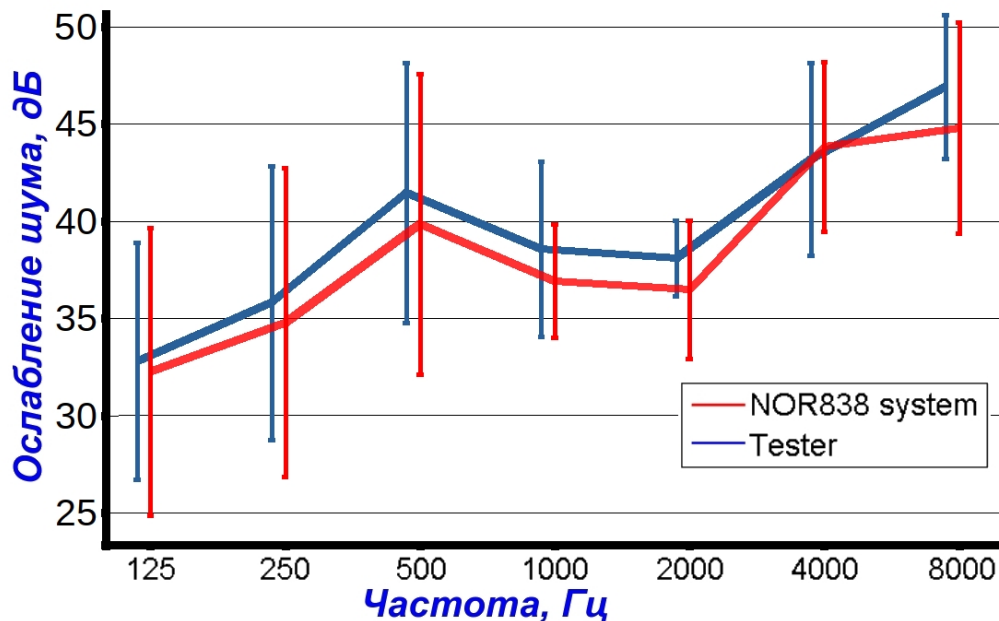
Фиг. 7. Ослабление шума вкладышами, измеренное прибором у 8 участников.



Фиг. 8. Ослабление шума вкладышами, измеренное специально предназначенной для этого измерительной системой *Norsonic NOR838* у тех же 8 участников.

Таблица 1. Отличия в ослаблениях шума (при совершенно одинаково вставленных вкладышах), полученное при сравнении результатов измерений двумя устройствами, дБ.

Участник	Частота сигнала, Гц						
	125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	0,9	-0,8	-0,3	-2,1	-3,7	0,4	0,8
2	-4,0	2,7	-3,3	1,7	1,3	2,3	-4,2
3	0,3	-4,4	-4,5	-4,6	4,2	2,0	-4,6
4	1,4	-3,9	-0,7	-3,9	-4,5	-1,0	-4,0
5	-2,9	-0,8	-1,8	-0,5	-4,4	-3,0	-4,5
6	-0,9	-4,8	-3,4	0,3	0,0	4,4	-1,5
7	2,0	1,7	-3,0	-4,7	-4,8	-0,9	1,1
8	-1,0	3,2	4,3	0,5	-1,3	1,0	-0,4



Фиг. 9. Ослабление шума, измеренное и прибором, и системой *Norsonic NOR838*, средние значения и стандартные отклонения, дБ.

Результаты измерений ослабления тестовых сигналов разных частот, измеренные прибором (фиг. 7) и системой *Norsonic NOR838* (фиг. 8), ни разу не отличались (таблица 1) более чем на 4,8 дБ. В соответствии с критерием, установленным в стандарте *EN 4869-1:2018*, при измерении порогов восприятия звуков воспроизводимость должна быть 6 дБ. Но, при использовании двух устройств, отличия между средними результатами измерений были 0,5; 1,0; 1,6; 1,7; 1,6; 0,7 и 2,1 дБ (для сигналов с частотами 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 и 8000 Гц соответственно). Эти значения достаточно маленькие, и они показывают, что прибор работает правильно. Стандартные отклонения ослабления шума вкладышами, измеренные для звуков разных частот, были от 3 до 8 дБ при замерах с помощью *Norsonic NOR838*, и от 2 до 7 дБ при использовании прибора. Эти большие стандартные отклонения объяснялись, в основном, отличиями в форме слуховых каналов у разных участников, из-за чего они вставляли противошумы по-разному. В информации для потребителя можно встретить, и такие, и даже большие стандартные отклонения у популярных моделей вкладышей.

Статистический анализ показал, что значения средних ослаблений шума, полученных при использовании двух устройств, не имеют статистически значимых отличий. В таблице 2 приведены значения p , полученные при использовании t-теста Стьюдента для отдельных частот. Перед проведением этой проверки (t-тест), была проверена гипотеза о нормальном распределении (*Lilliefors test*), и проверен критерий равенства дисперсии.

Таблица 2. Результаты проверки того, имеются ли статистически значимые отличия между средними ослаблениями звуков, измеренными с помощью *Norsonic NOR838* и прибора.

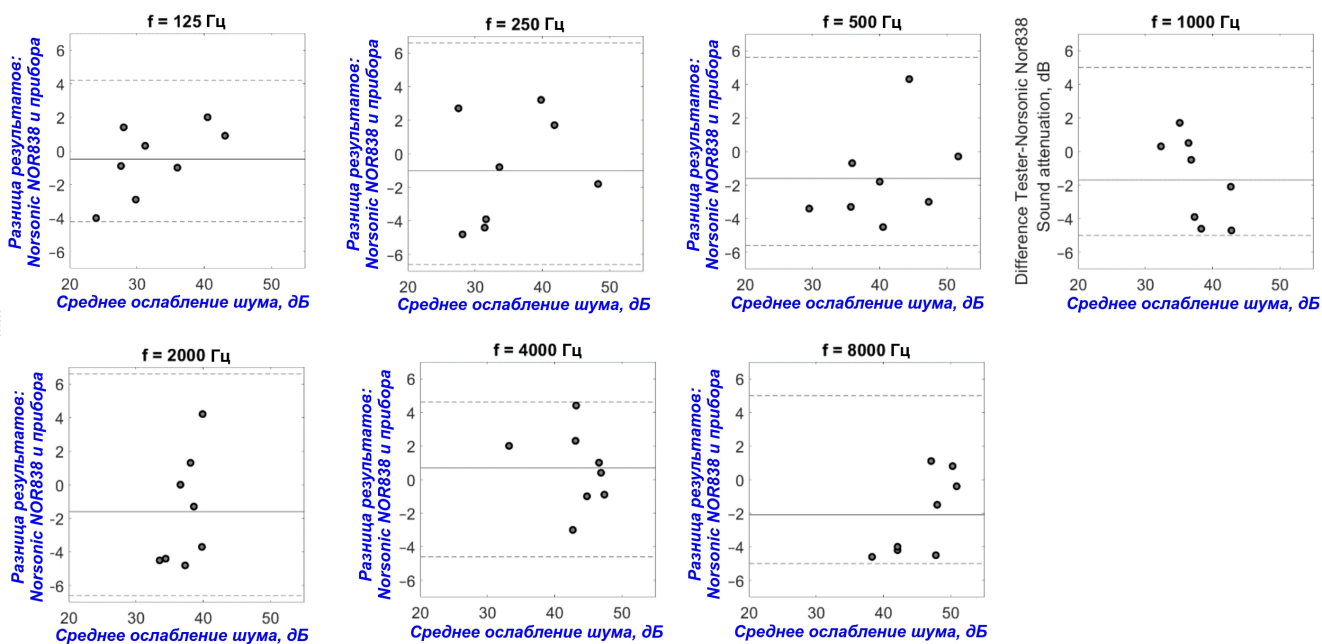
Частота, Гц	125	250	500	1000	2000	4000	8000
p	0,8798	0,7926	0,6644	0,3047	0,2713	0,7820	0,3723

Кроме того, обычный статистический анализ был дополнен байесовским статистическим анализом. В таблице 3 приведены коэффициенты BF_{10} , вычисленные с помощью *JASP Bayesian interface* [34]. Эти проверки, в целом, показывают, что результаты, полученные при измерениях двумя измерительными приборами, не отличаются.

Таблица 3. Результаты проверки того, имеются ли статистически значимые отличия между средними ослаблениями звуков, измеренными с помощью *Norsonic NOR838* и прибора, проведённые с помощью байесовского статистического анализа.

Частота, Гц	125	250	500	1000	2000	4000	8000
BF_{10}	0,4311	0,4384	0,4565	0,5533	0,6667	0,439	0,5714

Помимо статистического анализа, были построены диаграммы Bland–Altman для всех частот тестовых сигналов, для сравнения результатов измерений двух устройств. Эти диаграммы, представленные на фиг. 10, показывают, что отличия в результатах измерений не превышают двух стандартных отклонений. То есть, и разработанный прибор, и система *Norsonic NOR838* дают схожие значения ослабления шума.



Фиг. 10. Диаграммы *Bland–Altman*, на которых показано отличие в результатах измерения ослабления шума (при использовании разработанного прибора, и системы *Norsonic NOR838*), для частот звуковых сигналов 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 и 8000 Гц. Сплошная линия соответствует среднему значению, а пунктирные линии ± 2 стандартных отклонения.

Правильность работы прибора была проверена путём сравнения результатов измерений при использовании разработанного прибора, и измерительной системы *Norsonic NOR838*, у отдельных участников исследования, и средних значений.

4. Обсуждение

На практике, единственным способом убедиться, что вкладыши достаточно хорошо ослабляют шум, является их проверка¹: измерение ослабления шума. (В развитых странах) для этого всё шире используют специально разработанные измерительные системы. Сейчас в продаже есть несколько таких систем, например: *FitCheck Solo* (*Michael and Associates, State College, PA, США*) [27-2], *INTEGRafit* (*Workplace Integra, Greensboro, NC, США*) [28-2], *QuickFit* (Национальный институт охраны труда NIOSH, Washington, DC, США) [29-2], *VeriPRO* (*Honeywell, Charlotte, США*) [30-2], *E-A-Rfit* (*3M, Maplewood, MN, США*) [31-2], *SafetyMeter* (*Sonova Communications AG, Stäfa, Швейцария*) [32-2] и другие. Первые три измерительные системы определяют ослабление шума тем же способом, что и разработанный нами прибор. Они измеряют пороги восприятия звуков, без СИЗОС и при их использовании. Система *FitCheck Solo* подключается к компьютеру, на которое устанавливают специальное программное обеспечение — а наш прибор ничего этого не требует. Программное обеспечение использует звуковую карту компьютера, система измеряет пороги восприятия звуков, и вычисляет показатель ослабления шума *PAR* (*personal attenuation rating*). Этот показатель сравнивается с одночисленным показателем ослабления шума, определяемым при сертификации (в США это *NRR*, может измеряться в

¹ **Примечание:** мнение Робина Хоуи, президента *British Occupational Hygiene Society*: «Если для защиты от шума (работникам выдаются) ... вкладыши, то о степени снижения (воздействия шума на орган слуха) нельзя сказать ничего — до тех пор, пока оно не будет измерено у рабочих». Источник информации: *Robin Howie «Reality of PPE Performance»*. Слайд презентации № 74.

соответствии со стандартом *ANSI S12.6-2016* [35]; а в Европейском Союзе и РФ это аналогичный показатель *SNR* — прим.). Система *INTEGRafit* работает схожим образом, но использует не компьютер, а *iPad*, на который устанавливается соответствующее программное обеспечение. Как и в *FitCheck Solo*, результат измерений сравнивается со значением *NRR*. Устройство *QuickFit*, (разработано Национальным институтом охраны труда *NIOSH*), не требует подключения к каким-то внешним устройствам (например к компьютеру), как и (наш) прибор. Оно тоже измеряет пороги восприятия звуков для определения ослабления шума вкладышами, но в упрощённой форме. При проверке работник регулирует громкость сигнала (*пульсирующий звук 1 кГц*) так, чтобы он был еле слышен (порог слышимости). Затем рабочий вставляет вкладыш, и снова использует *QuickFit*; но громкость сигнала повышают на 15 дБ. Если работник не слышит второй сигнал, то считают, что вкладыши ослабляют шум достаточно хорошо². Устройство состоит из чашки наушников, в которых размещён проигрыватель *mp3*, и динамик, создающий тестовый сигнал. В отличие от *QuickFit* наш прибор позволяет точно измерять (пороги восприятия звуков) в широком диапазоне частот, от 125 до 8000 Гц. У системы *VeriPRO* используется другой способ измерения ослабления шума: работник сравнивает громкость звуковых сигналов, воздействующих на оба органа слуха. Сначала он регулирует громкость так, чтобы она была одинакова — не используя вкладыши. Затем он вставляет вкладыш в один слуховой канал (и снова регулирует громкость так, чтобы она была одинаковой). Потом он вставляет вкладыш в другой слуховой канал (и снова уравнивает громкость). В отличие от разработанного нами прибора, система *VeriPRO* очень сложная и дорогая. Она состоит из аудиопроцессора в отдельном модуле, специальных наушников, и программного обеспечения, устанавливаемого на компьютер. Для измерения ослабления шума СИЗОС в системе *E-A-Rfit* используется метод *MIRE* (*microphone in real ear*), при котором уровень тестового сигнала за вкладышем измеряется с помощью микрофона. Система состоит из громкоговорителя с цифровым устройством обработки сигнала; микрофонов (размещаемых на вкладышах, и снаружи); и программного обеспечения. Громкоговоритель создаёт тестовый сигнал, и уровень звукового давления измеряется снаружи и за вкладышами. Отличие в этих уровнях показывает ослабление шума вкладышами, и то, насколько они правильно вставлены (или насколько соответствуют слуховым каналам). *SafetyMeter* работает схожим образом. Эта система состоит из модуля, звуковой карты, присоединяемого к компьютеру. Модуль также присоединяется к наушникам, создающим тестовые сигналы, и к двум микрофонам, вставленным во вкладыши. Две эти системы (*E-A-Rfit* и *SafetyMeter*) позволяют измерять ослабление шума лишь у тех вкладышей, которые производятся изготовителями этих систем³. А разработанный нами прибор отличается от вышеперечисленных систем тем, что он может использоваться без подключения к компьютеру. Он позволяет измерять пороги восприятия звуков самых разных частот, и определять ослабление шума при использовании любых вкладышей. В таблице 4 приведены основные свойства прибора и нескольких систем производственного контроля, имеющимися в продаже — для сравнения.

(В таблице) сравниваются основные характеристики разработанного прибора, и тех систем производственного контроля, которые имеются в продаже — как устройств, измеряющих ослабление шума схожим образом. С другой стороны, при проведении этого исследования свойства прибора изучали, сравнивая его с другим устройством, которое считалось «эталонным», т. е. способным точно измерять ослабление шума, как это требует стандарт.

Разработанный прибор может использоваться людьми с нормальным слухом. Кроме того, он может использоваться работниками, у которых есть умеренное ухудшение слуха. Опубликованные исследования показывают, что результаты измерения ослабления шума, полученные методом REAT у таких людей, не имеют значительных отличий от результатов измерений у людей с нормальным слухом [7-2,36].

² **Примечание:** при разработке *QuickFit* использовали результаты исследований, показавших что в США, на большинстве тех рабочих мест, где превышает ПДУ по шуму, это превышение ≤ 15 дБ.

³ Для измерения громкости сигнала между вкладышем и барабанной перепонкой микрофон соединяют с пространством за вкладышем зондом-трубкой, проходящей через вкладыш. 3M и Sonova делают и обычные вкладыши (для защиты от шума), и разновидности тех же моделей, с трубкой, см. [пример](#): Вкладыши других моделей, т. е. других изготовителей, с зондом-трубкой в продаже нет.

Таблица 4. Сравнение параметров разработанного прибора с несколькими из системам производственного контроля эффективности СИЗОС, доступными на рынке.

Измерительная система	Метод измерения	Устройство, управляющее работой системы	Частоты тестовых сигналов, Гц	Типы СИЗОС
Разработанный прибор	Измерение порогов	Встроено в сам прибор	125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000	Любые вкладыши
<i>FitCheck Solo</i>	Измерение порогов	Персональный компьютер	125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000	Любые вкладыши
<i>INTEGRAfit</i>	Измерение порогов	<i>iPad</i>	500, 1000, 2000	Любые вкладыши
<i>QuickFit</i>	Измерение порогов	Встроено в сам прибор	1000	Любые вкладыши
<i>VeriPRO</i>	Выравнивание громкости	Персональный компьютер	125, 250, 500, 1000, 2000, 4000	Любые вкладыши
<i>E-A-Rfit</i>	<i>MIRE*</i> , микрофон в ухе.	Персональный компьютер	125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000	Вкладыши <u>только этого изготовителя</u>
<i>SafetyMeter</i>	<i>MIRE*</i> , микрофон в ухе.	Персональный компьютер	125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000	Вкладыши <u>только этого изготовителя</u>

* *MIRE* - microphone in real ear.

Это объясняется принципом проведения измерений: отличие в порогах восприятия звука с и без СИЗОС у людей с разной чувствительностью органа слуха одинаковы. Поэтому, при умеренном ухудшении слуха, результат измерений разработанным прибором не будет иметь большой погрешности. А при сильном ухудшении слуха, когда порог восприятия звука перестаёт зависеть от того, используется ли СИЗОС или нет, ситуация может измениться. Но людям с сильным ухудшением слуха запрещено работать в условиях чрезмерного шума, и проблем при использовании ими вкладышей не будет.

5. Заключение

Описанный в статье прибор был изготовлен из недорогих комплектующих (*стоимость систем, перечисленных в таблице 4, кроме QuickFit NIOSH, порядка 3-4 тыс. долларов США, QuickFit, ориентировочно, до 500 долларов — прим.*), включая компьютер *Raspberry Pi Zero*, независимый аналого-цифровой преобразователь, усилитель для наушников, наушники, жидкокристаллический светодиодный монитор с тачпадом и кнопками, и источник питания. Это устройство не может улучшить размещение вкладышей в слуховом канале, но может помочь выявить случаи, когда ослабление шума слишком маленькое. Если обнаружится низкое ослабление шума, то работник может вставить вкладыши более правильно.

Для проверки работоспособности прибора были проведены замеры ослабления шума вкладышами. Ослабление шума, полученное с помощью тестера, сравнили с результатами, полученными с помощью специальной измерительной системы *Norsonic NOR838*, предназначенной именно для таких измерений.

Результаты у отдельных участников отличались, но не более чем на 4,8 дБ. Средние отличия (для всех участников) для звуков разных частот были от 0,5 дБ (125 Гц) до 2,1 дБ (8 кГц). Эти отличия невелики, и они показывают, что прибор работает нормально. Таким образом, можно считать разработанный прибор подходящим средством для проверки правильности размещения вкладышей в слуховом канале.

Вклад авторов: план исследования: *E.K., R.M., L.M. и A.S.*; методика: *E.K., R.M., L.M. и A.S.*; программное обеспечение: *L.M. и A.S.*; проведение исследования *E.K., R.M. и A.S.*; визуализация: *E.K., R.M., L.M. и A.S.*; написание статьи - первоначальный черновой вариант *E.K.*; написание статьи - редактирование *R.M. и L.M.* Все авторы прочли и согласны с опубликованным вариантом статьи.

Финансирование: Статья написана на основе результатов исследований, проводившихся при выполнении пятого этапа Национальной программы «Улучшение безопасности и условий труда», которая проводилась за счёт средств Министерства семьи и социальной политики Польши; задание № 3.SP.06 «Разработка указаний для проверки и обучения (работников) правильной установке вкладышей в слуховой канал». Главными координаторами этого проекта являются: Центральный институт охраны труда Польши, и Национальный исследовательский институт.

Заключение Совета по надзору за деятельностью учреждений: Проведение этого исследования было одобрено комитетом по этике и биоэтике университета кардинала Стефана Вышиньского в Варшаве (*№ KEiB-20/2020*).

Согласие участников: Все участники были проинформированы, и дали своё согласие на участие в исследовании.

Заявление о доступности данных: Все данные хранятся в цифровом виде у исследователей.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Литература

1. ↑ Nelson, D.I.; Nelson, R.Y.; Concha-Barrientos, M.; Fingerhut, M. The global burden of occupational noise-induced hearing loss. *American Journal of Industrial Medicine*. 2005, 48(6): 446–458. <https://doi.org/10.1002/ajim.20223>
2. ↑ Themann, C.; Suter, A.H.; Stephenson, M.R. National research agenda for the prevention of occupational hearing loss — Part 2. *Seminars in Hearing*, 2013, 34(03): 208–252. <https://doi.org/10.1055/s-0033-1349352>
3. ↑ [1](#) [2](#) [3](#) [4](#) [5](#) [6](#) EN ISO 4869-1 2018; Acoustics—Hearing Protectors—Part 1: Subjective Method for the Measurement of Sound Attenuation; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2018. Аналог: [ГОСТ 12.4.211-1999](#)
4. ↑ Kotarbinska, E. [The influence of aging on the noise attenuation of ear-muffs](#). *Noise & Health* 2005, 7(26): 39–45. <https://doi.org/10.4103/1463-1741.31641>
5. ↑ Rawlinson, R.D.; Wheeler, P.D. The effects of industrial use on the acoustical performance of some earmuffs. *The Annals of Occupational Hygiene* 1987, 31(3): 291–298. <https://doi.org/10.1093/annhyg/31.3.291>
6. ↑ Carletti, E.; Pedrielli, F. The ageing effect on the acoustic performance of earmuffs: An investigation involving the forestry compartment. In *Proceedings of the 10th International Congress on Sound and Vibration 2003*, Stockholm, Sweden, 7–10 July 2003. <https://doi.org/10.1260/135101002761035690>
7. ↑ [1](#) [2](#) Abel, S.M.; Sass-Kortsak, A.; Kielar, A. [The effect on earmuff attenuation of other safety gear worn in combination](#). *Noise & Health* 2002, 5(17): 1–13. [копия](#)
8. ↑ Chung, D.Y.; Hardie, R.; Gannon, R.P. [The effect of hair, glasses, or cap on the performance of one pair of Bilsom Viking circumaural hearing protectors](#). *Canadian Acoustics*. 1983, 11(2): 45–49.
9. ↑ Lemstad, F.; Kluge, R. [Real-world attenuation of muff-type hearing protectors: The effect of spectacles](#). In [Proceedings of the Joint Baltic-Nordic Acoustics Meeting 2004](#), Mariehamn, Åland, Finland, 8–10 June 2004.
10. ↑ 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): 221–232. <http://dx.doi.org/10.1093/annhyg/mer087> [копия](#)
11. ↑ Kozłowski, E.; Mlynski, R. [Attenuation of earmuffs used simultaneously with respiratory protective devices](#). *Medycyna Pracy*, 2017, 68(3): 349–361. (In Polish) <https://doi.org/10.13075/mp.5893.00464>
12. ↑ Kozłowski, E.; Mlynski, R. [Selection of earmuffs and other personal protective equipment used in combination](#). *International Journal of Environmental Research and Public Health* 2019, 16(9): 1477. <https://doi.org/10.3390/ijerph16091477>

13. ↑ [1](#) [2](#) **Biabani, A.; Aliabadi, M.; Golmohammadi, R.; Farhadian, M.** Individual fit testing of hearing protection devices based on microphone in real ear. *Safety and Health at Work*. 2017, 8(4): 364–370. <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2017.03.005>
14. ↑ **Neitzel, R.; Seixas, N.** The effectiveness of hearing protection among construction workers. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 2005, 2(4): 227–238. <https://doi.org/10.1080/15459620590932154>
15. ↑ **Morata, T.C.; Fiorini, A.C.; Fischer, F.M.; Krieg, E.F.; Gozzoli, L.; Colacioppo, S.** [Factors affecting the use of hearing protectors in a population of printing workers](#). *Noise & Health* 2001, 4(13): 21–28. [копия](#)
16. ↑ **Landen, D.; Wilkins, S.; Stephenson, M.; McWilliams, L.** [Noise exposure and hearing loss among sand and gravel miners](#). *Journal of Occupational and Environmental Medicine*. 2004, 1(8): 532–541. <https://doi.org/10.1080/15459620490476503> [копия](#)
17. ↑ **Hansia, M.R.; Dickinson, D.** [Hearing protection device usage at a South African gold mine](#). *Occupational Medicine*. 2010, 60(1): 72–74. <http://dx.doi.org/10.1093/occmed/kqp114> [копия](#)
18. ↑ **Tak, S.; Davis, R.R.; Calvert, G.M.** Exposure to hazardous workplace noise and use of hearing protection devices among US workers—NHANES, 1999–2004. *American Journal of Industrial Medicine*. 2009, 52(5): 358–371. <https://doi.org/10.1002/ajim.20690>
19. ↑ **EN 458:2016; Hearing Protectors—Recommendations for Selection, Use, Care and Maintenance—Guidance Document; European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2016.** Есть «перевод»: проект ГОСТ EN 458 <https://www.normacs.info/discussions/7461>
20. ↑ **Stephenson, M.R.** [Hearing protection in the 21st century: They're not your father's earplugs anymore](#). *Seminars in Hearing*, 2009, 30(1): 56–64. <http://dx.doi.org/10.1055/s-0028-1111107>
21. ↑ **Schultz, T.** [Individual fit-testing of earplugs: A review of uses](#). *Noise & Health* 2011, 13(51): 152–162. <https://doi.org/10.4103/1463-1741.77216>
22. ↑ **Joseph A, Punch J, Stephenson M, Paneth N, Wolfe E, Murphy W (2007)** [The effects of training format on earplug performance](#). *International Journal of Audiology* 46(10): 609–618. <https://doi.org/10.1080/14992020701438805>
23. ↑ **Takahashi, K.; Kawanami, S.; Inoue, J.; Horie, S.** [Improvements in sound attenuation performance with earplugs following checklist-based self-practice](#). *Journal of UOEH (The University of Occupational and Environmental Health, Japan)*, 2011, 33(4): 271–282. <https://doi.org/10.7888/juoeh.33.271>
24. ↑ **Toivonen, M.; Pääkkönen, R.; Savolainen, S.; Lehtomäki, K.** [Noise attenuation and proper insertion of earplugs into ear canals](#). *The Annals of Occupational Hygiene* 2002, 46(6): 527–530. <https://doi.org/10.1093/annhyg/mef065>
25. ↑ **Tsukada, T.; Sakakibara, H.** [A trail of individual education for hearing protection with an instrument that measures the noise attenuation effect of wearing earplugs](#). *Industrial Health*, 2008, 46(4): 393–396. <https://doi.org/10.2486/indhealth.46.393> [Перевод](#)
26. ↑ **Murphy, W.; Stephenson, M.; Byrne, D.; Witt, B.; Duran, J.** [Effects of training on hearing protector attenuation](#). *Noise & Health* 2011, 13(51): 132–141. <https://doi.org/10.4103/1463-1741.77215> [копия](#)
27. ↑ [1](#) [2](#) **FitCheck Solo™.** Available online: <https://michaelassociates.com/products/fitcheck-solo-tm/> (accessed on 25 May 2022).
28. ↑ [1](#) [2](#) **Introducing INTEGRAfit for iPad.** Available online: <https://www.workplaceintegra.com/integrafit/integrafit-ipad.php> (accessed on 25 May 2022). <https://www.workplaceintegra.com/integrafit/>
29. ↑ [1](#) [2](#) **QuickFit Earplug Test Device.** Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, Pittsburgh, PA, USA. 2008. Available online: <https://www.cdc.gov/niosh/mining/UserFiles/works/pdfs/2009-112.pdf> (accessed on 25 May 2022). Перевод: [PDF Wiki](#). Проверка онлайн: <https://www.cdc.gov/niosh/mining/content/quickfitweb.html>
30. ↑ [1](#) [2](#) **Honeywell Howard Leight™ VeriPRO®4.0.** Available online: https://www.honeywellsafety.com/Products/Hearing/Hearing_Protection/VeriPRO_Earplug_Fit_Testing.aspx?site=/au (accessed on 25 May 2022).

31. ↑ [1](#) [2](#) **3M** Hearing Protection Fit Testing. Available online: https://www.https://www.3m.com/3M/en_US/p/c/ppe/hearing-protection/fit-testing/ (accessed on 25 May 2022). https://www.3m.com/3M/en_US/p/d/v000228531/
32. ↑ [1](#) [2](#) **Serenity SafetyMeter**. Available online: <https://www.phonak-communications.com/en/products/serenity/safetymeter> (25 May 2022). Руководство по эксплуатации <https://www.manualslib.com/products/Phonak-Serenity-Safetymeter-11559710.html> Новая разработка <https://www.phonak-communications.com/en/product/acoustic-leakage-tester-alt/>
33. ↑ **Chiu, C.-C.; Wan, T.-J.** [Individual fit testing of hearing-protection devices based on microphones in real ears among workers in industries with high-noise-level manufacturing.](#) International Journal of Environmental Research and Public Health. 2020, 17(9): 3242. <https://doi.org/10.3390/ijerph17093242> [оригинал](#)
34. ↑ **JASP**. A Fresh Way to Do Statistics. Available online: <https://jasp-stats.org/> (accessed on 4 July 2022).
35. ↑ **ASA S12.6-2016**; Methods for Measuring the Real Ear Attenuation of Hearing Protectors; Acoustical Society of America: New York, NY, USA, 2016. <https://webstore.ansi.org/standards/asa/ansiasas122016r2020>
36. ↑ **Suter, A.H.; Lempert, B.L.; Franks, J.R.** Real-ear attenuation of earmuffs in normal-hearing and hearing-impaired individuals. The Journal of the Acoustical Society of America. 1990, 87(5): 2114–2117. <https://doi.org/10.1121/1.399178>

↑ Примеры вкладышей с зондом-трубкой (модифицированная обычная модель), который позволяет измерять громкость сигнала между СИЗОС и органом слуха:

