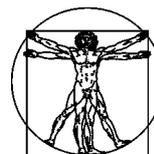


DOI: 10.15593/RZhBiomech/2021.1.06

УДК 613.644:614.89



**Российский
Журнал
Биомеханики**
www.biomech.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ КОСТНОЙ ПРОВОДИМОСТИ ДЛЯ СУБЪЕКТИВНОЙ ОЦЕНКИ ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

В.В. Харитонов¹, А.Ю. Литвинова¹, В.Н. Зинкин², П.М. Шешегов², Л.П. Сливина³

¹ Филиал «Взлет» Московского авиационного института (национального исследовательского университета), Российская Федерация, 416501, Астраханская область, г. Ахтубинск, ул. Добролюбова, 5

² Центральный научно-исследовательский институт Военно-воздушных сил Минобороны РФ, Российская Федерация, 141103, Московская область, Щелковский район, г. Щелково, ул. Аэродромная, 2–5, e-mail: zinkin-vn@yandex.ru

³ Волгоградский государственный медицинский университет, Российская Федерация, 400131, Волгоград, пл. Павших борцов, 1

Аннотация. Теоретически и экспериментально обосновано использование костной проводимости для субъективной оценки звукопоглощающих свойств материалов. Существующие противошумы в большинстве случаев предназначены для перекрытия воздушного пути поступления звука к улитке. Их эффективность не превышает уровня звука более 100–110 дБА. Для оценки акустической эффективности противошумов разработаны упрощенный (объективный) и субъективные методы. На рабочих местах, где уровень шума выше, необходимо использовать противошумный шлем, который предназначен не только для перекрытия воздушного пути поступления звука, но и защиты костно-тканевых структур головы. Это обусловлено необходимостью перекрытия костного пути проведения звука к улитке. Стандартных методов оценки эффективности противошумного шлема нет. Для оценки звукопоглощения авторами предложено использовать аудиометр. Методом тональной аудиометрии проведены экспериментальные исследования по оценке поглощения звука образцами из различных материалов, пакетами из 2–4 слоев материалов и противошумным шлемом. Полученные результаты практически соответствовали данным, полученным с помощью используемых методов оценки акустической эффективности противошумного шлема. С применением математических методов доказана эффективность предложенного авторами метода на основе тонального аудиометра для оценки звукопоглощающих свойств материалов и экстраауральных средств защиты от шума. Оценка звукопоглощения с помощью костной проводимости при тональной аудиометрии может быть использована в качестве субъективного метода для оценки акустической эффективности экстраауральных средств индивидуальной защиты от шума.

Ключевые слова: шум, орган слуха, воздушная и костная звукопроводимость, звукопоглощение, механизмы, индивидуальные средства защиты от шума.

ВВЕДЕНИЕ

Производственный шум на протяжении многих лет занимает первое место среди вредных физических факторов. Удельный вес рабочих мест промышленных

© Харитонов В.В., Литвинова А.Ю., Зинкин В.Н., Шешегов П.М., Сливина Л.П., 2021

Харитонов Владимир Васильевич, к.т.н., доцент, доцент кафедры А11, Ахтубинск

Литвинова Анна Юрьевна, старший преподаватель кафедры А21, Ахтубинск

Зинкин Валерий Николаевич, д.м.н., профессор, с.н.с. Научно-исследовательского испытательного центра авиационно-космической медицины и военной эргономики, Щелково

Шешегов Павел Михайлович, д.м.н., н.с. Научно-исследовательского испытательного центра авиационно-космической медицины и военной эргономики, Щелково

Сливина Людмила Петровна, д.м.н., профессор, заведующая кафедрой гигиены, Волгоград

предприятий, не соответствующих санитарно-гигиеническим требованиям по шуму, составляет 19,92 %. По сравнению с другими вредными факторами трудового процесса риски приобретения профессиональной патологии вследствие воздействия шума достаточно высокие, что зависит от уровня, спектра и длительности воздействия (стажа работы) шума. В структуре основных нозологических форм профессиональной патологии при действии физических производственных факторов доминирует нейросенсорная тугоухость (НСТ) шумовой этиологии (56,33 %) [7, 17, 24].

В нашей стране существует система борьбы с шумом, которая включает организационно-технические мероприятия: специальную оценку условий труда, мониторинг источников шума, наличие и правильность применения средств защиты от шума, профессиональный отбор, диспансерное наблюдение, врачебную экспертизу, лечебно-профилактические мероприятия. Несмотря на комплексный подход в борьбе с шумом, это не приводит к снижению заболеваемости, поэтому уровень экономических потерь от шума продолжает оставаться на достаточно высоком уровне.

Средствам индивидуальной защиты (СИЗ) от шума отводится важное место в системе профилактических мероприятий, направленных на обеспечение безопасности условий труда. Это особенно актуально, когда не представляется возможным только организационно-техническими мероприятиями снизить воздействие на работающих производственного шума, превышающего предельно допустимый уровень (ПДУ).

СИЗ по конструктивному исполнению подразделяются на противошумные наушники, вкладыши (беруши), шлемы и костюмы. Эффективность противошумов зависит от типа конструктивной модели, индивидуальных особенностей человека (форма головы, наружного уха), правильности эксплуатации и параметров шума (уровня, спектра). Целенаправленные исследования показали, что при реальном применении эффективность СИЗ органа слуха ниже, чем при испытаниях в лабораторных условиях. Так, средняя эффективность противошумных наушников (ПШН) в лабораторных и производственных условиях отличается на 9 дБ, а у вкладышей – на 17,5 дБ [3, 4].

Для удобства практического применения противошумы можно разделить на три группы [6]. Первая группа – СИЗ органа слуха от шума. Они предназначены для защиты органа слуха от шума путем перекрытия воздушного пути распространения звука. К ним относятся противошумные наушники (ПШН) и вкладыши (беруши), которые нашли наиболее широкое применение на производстве. Оценка их акустической эффективности проводится в лабораторных условиях с помощью упрощенного (ГОСТ Р 12.4.213–99) и субъективного (ГОСТ Р.12.4.255–2011) методов с последующей оценкой результирующего значения А-корректированных уровней звукового давления. Принято считать, что противошумы этой группы способны обеспечить снижение уровней звука до 30 дБ, преимущественно в средне- и высокочастотном звуковом диапазоне. Для повышения их эффективности рекомендуется их комбинация, что может увеличить шумопоглощение еще до 10 дБ. Эта группа СИЗ нашла наиболее широкое применение в народном хозяйстве.

Вторая группа – СИЗ головы от шума, которые используются для защиты органа слуха от шума путем перекрытия воздушного и костного путей распространения звука. К ним относится противошумный шлем (ПШШ). Защита органа слуха обеспечивается ПШН, входящими в состав шлема, а защита костных структур головы – собственно самим шлемом, многослойная структура которого предназначена для поглощения звука. Известно, что при высоких уровнях акустический сигнал поступает в улитку как через наружное ухо, так и костно-тканевые структуры черепа. Учитывая, что костно-тканевые пороги слышимости превышают воздушные на 20–40 дБ, при предельно допустимом уровне звука 80 дБА экстраауральные СИЗ головы рекомендуется использовать при уровнях звука свыше 100–110 дБА [6, 17, 20].

Научных сведений по оценке акустической эффективности ПШШ мало. Как правило, оценка их акустической эффективности проводится в лабораторных условиях с помощью микрофона, который размещают в подшлемном пространстве у человека или в области наружного уха на манекене головы, а также – субъективным методом в помещении. В последнем случае ПШШ находится на голове испытуемого, а оценка акустической эффективности осуществляется по интенсивности восприятия тонального сигнала, подаваемого через наушники, т.е. через воздушный путь. Отсутствие стандартизированных методов оценки акустической эффективности ПШШ является существенным недостатком.

Третья группа противошумов – СИЗ туловища от шума (экстраауральные). Они предназначены для защиты органов грудной и брюшной полости от шума. К ним относятся противошумный жилет (ПШЖ). Защита должна достигаться путем использования комбинации материалов, обладающих хорошей звукопоглощающей способностью. ПШЖ можно считать аналогом противошумного костюма.

Известно, что при высоких уровнях звука свыше 120 дБА человек, находящийся в акустическом поле, ощущает вибрацию всего тела и внутренних органов. Этот феномен получил название воздушная вибрация. Механизм этого явления связан с активным раздражением механо- и проприорецепторов. Действие акустических полей такой интенсивности способствует развитию субъективного дискомфорта у работающих и нарушению со стороны внутренних органов [5, 21, 22]. Для защиты человека от высокоинтенсивного шума предложено использовать ПШЖ, который предназначен для того, чтобы максимально перекрыть поверхность грудной и брюшной полостей и снизить уровень звукового давления акустического сигнала. В настоящее время это СИЗ находится на этапе экспериментальной разработки [5, 6, 17]. Проведенные лабораторные исследования показали, что звукопоглощение ПШЖ достигает 10–15 дБ в области средних и высоких частот. При натуральных испытаниях с использованием медицинских и квалитметрических методов отмечено существенное снижение субъективных жалоб, улучшение работоспособности и надежности, а также отмечены хорошие эргономические свойства изделий [11, 12]. Проведенная экспертно-аналитическая работа показала необходимость создания такого рода СИЗ, которые найдут применение в различных отраслях промышленности и на транспорте.

Оценку акустической эффективности ПШЖ предложено проводить на человеке или манекене в лабораторных и натуральных условиях с помощью микрофона, который размещают в поджилетном пространстве. Стандартизированного метода оценки акустической эффективности ПШЖ в настоящее время не имеется, что создает определенные трудности в поиске технических решений при создании ПШЖ.

Одной из особенностей современного производственного шума, уровень которого превышает 100 дБА, является преобладание в его спектре низких и инфразвуковых частот [7–9, 21]. Сочетание в спектре частот инфра- и звукового диапазонов высоких уровней требует использования комплексного подхода в силу необходимости защиты органа слуха, головы, брюшной и грудной полостей. Несмотря на отсутствие СИЗ от инфразвука, целесообразно использовать комплекс специальных средства защиты, в который должны входить ПШШ и ПШЖ [8, 14, 15].

Таким образом, СИЗ от шума представляют собой набор специальных средств, предназначенных для ослабления акустического сигнала, воздействующего на человека через воздушный или костный путь. Существующая система оценки акустической эффективности СИЗ органа слуха осуществляется объективным и субъективным методами, что позволяет сравнивать результаты и тем самым гарантировать надежность защитных свойств противошумов, полученных разными способами. Однако для оценки

звукопоглощения СИЗ головы и туловища стандартизированных методик нет, поэтому необходимо проведение дальнейших исследований в этом направлении.

Цель работы – теоретическое и экспериментальное обоснование использования костной проводимости для субъективной оценки звукопоглощающих свойств материалов и экстраауральных СИЗ от шума.

ОБОСНОВАНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ И МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Механизм проведения звуков через кости черепа

Звуки, воспринимаемые человеком, передаются во внутреннее ухо, где находится рецепторный аппарат слухового нерва, двумя путями: посредством воздушного и костного звукопроведения. Конечная рецепторная активность в улитке не зависит от способа проникновения звука. И воздушное, и костное проведение звуков поддерживает один механизм в улитке – преобразование механических вибраций в нервные импульсы. Это значит, что процесс в улитке один и тот же, независимо от способа ее стимуляции. Основное различие между путем воздушного проведения звуков и путем костного проведения звуков состоит в способе, которым улитка принимает стимуляцию. Оба пути проведения звуков являются физиологичными для человека.

При этом путь передачи звуков через кости черепа основным не является, но постоянно присутствует в норме. В том случае, если человек слушает воздушно-проведенные звуки с открытыми ушами, вклад костного проведения в восприятие звуков минимален. Причина этого заключается в большом импедансе между воздухом и костями черепа. Передача акустического сигнала в улитку через кости черепа путем вибрации на 40 дБ (для средних и высоких частот) и на 70 дБ (для низких частот) менее эффективна, чем передача звуков путем воздушного звукопроведения.

Костное проведение звуков, по сути, определяет тот лимит, при котором человеческое ухо может быть защищено от окружающих шумов различными устройствами для защиты слуха. Закрытие ушей уменьшает поступление звуковой энергии через наружный слуховой проход, но не оказывает никакого эффекта на передачу звуков путем костного проведения. Звук имеет достаточно большую интенсивность, и ухо можно стимулировать путем проведения звуковой энергии через кости черепа, даже если путь воздушного проведения максимально закрыт.

Костное проведение оказывается гораздо более эффективным для слухового восприятия, когда звуковые сигналы передаются прямо на кости черепа через вибратор, установленный на голове. Разница в импедансе костей и жидкостей внутреннего уха небольшая, что способствует передаче звуков.

Факторы, которые определяют эффективность передачи звуков при соприкосновении звучащего предмета с костями черепа:

- площадь поверхности костного передатчика – чем больше, тем эффективнее;
- положение передатчика на теле – чем ближе к улитке, тем лучше ответ ипсилатеральной улитки на стимуляцию;
- прилагаемая статическая сила – чем больше, тем эффективнее.

Основные положения теории передачи звуков через кости черепа были сформулированы Бецольдом еще в конце XIX века и изменились сравнительно мало. Он пришел к выводу, что передающиеся из воздуха на кости черепа звуковые волны только тогда будут восприниматься как звук, когда они аналогично воздушным волнам будут вызывать бегущие волны в улитке и раздражение определенных участков базилярной мембраны.

Экспериментальные исследования, математические расчеты, биофизическое моделирование позволили прийти к выводу, что характер проведения звуковых колебаний по костям черепа неодинаков при разной частоте. Различают инерционный и компрессионный типы костно-тканевой проводимости [1, 23].

Инерционный тип костного проведения отмечается при действии звуков с относительно большой длиной волны, т.е. низкой частоты, когда череп колеблется как единое целое с увеличением частоты колебаний отдельных его частей в противофазе. Инерция слуховых косточек и способность их к изменению положения обуславливают смещение основания стремени в окне преддверия при вибрации черепа и тем самым вызывают колебания в перилимфе с включением всего последующего цикла воздушного звукопроведения.

При воздействии звуков средних и высоких частот кости черепа колеблются не синфазно, а по-разному в отдельных своих частях, происходит компрессия всей лабиринтной капсулы, и перилимфа подвергается давлению, отражающемуся на положении стремени и мембраны окна улитки. Такой тип костного звукопроведения получил название компрессионного, и он в отличие от инерционного типа обусловлен различиями в подвижности окон среднего и внутреннего уха.

Таким образом, костной путь проведения звука является, по сути, дублирующей системой проведения звука к улитке. Его роль резко возрастает при высоких уровнях звука, независимо от перекрытия воздушного пути, в том числе при применении СИЗ органа слуха. Поэтому для снижения акустической нагрузки на орган слуха при высоких уровнях звука требуется защита костного пути проведения звука. Основная цель ПШШ – ограничить звукопроведение к тканям и костям головы. Акустическая эффективность снижения звука достигается за счет звукопоглощения материалов, из которых изготовлен ПШШ.

Метод исследования

Для оценки акустической эффективности ПШШ использовали аудиометр, который позволяет исследовать воздушную и костную проводимость методом тональной аудиометрии. Тональная аудиометрия – исследование слуховой чувствительности с помощью специальных электронных приборов, воспроизводящих колебания определенной частоты и интенсивности и преобразующих устройств – телефонов. Порог восприятия тона – минимальное звуковое давление, при котором появляется слуховое ощущение. Тональная аудиограмма позволяет измерять пороги слышимости с определенной точностью и выражать их в сопоставимых единицах в виде уровня (дБ) над определенной частотой звукового давления. Другими словами, данный метод исследования дает количественную характеристику слуховой функции. Аудиограмма является основным показателем слухового профиля здорового и больного человека [1, 25].

Исследования выполнялись на диагностическом аудиометре *AD 229* в специально оборудованном помещении. Аудиологическое исследование проводили в соответствии с методикой регистрации аудиограмм [25]. В начале исследования определяли пороги восприятия звуков по воздушной и по костной проводимости на частотах диапазона 250–8000 Гц. Громкость регулировалась ступенчато с шагом в 5 дБ.

Всего в исследовании принимали участие 15 мужчин и женщин возраста от 19 до 32 лет. В табл. 1 представлены показатели аудиограммы при исследовании воздушной и костной проводимости.

Из табл. 1 следует, что состояние слуха у лиц, принимавших участие в испытаниях, соответствует физиологической норме и различий между правым и левым ухом не выявлено.

Таблица 1

Показатели аудиограммы у испытуемых ($M \pm m$, дБ, $n = 30$)

Проводимость	Частота акустического сигнала, Гц									
	250	500	750	1000	1500	2000	3000	4000	6000	8000
Воздушная	1,0 ± 0,4	1,8 ± 0,7	-0,2 ± 0,7	1,1 ± 0,7	3,0 ± 0,9	7,6 ± 1,2	12,8 ± 1,2	13,6 ± 0,9	11,2 ± 0,9	11,0 ± 1,0
Костная	7,3 ± 0,8	3,5 ± 1,2	-0,3 ± 1,0	1,5 ± 1,3	10,6 ± 1,2	12,7 ± 1,1	12,3 ± 0,9	8,3 ± 0,8	10,0 ± 1,3	8,3 ± 1,1

При исследовании акустических свойств материалов под костный телефон-вибратор (КТВ) помещали прокладку из исследуемого материала (или из пакета материалов) размером 5×7 см и вновь определяли пороги по костной проводимости в этом же диапазоне частот. Наушники при этом не снимались, воздушная маскировка не проводилась (определялась абсолютная костная проводимость). Звукопоглощение исследуемого материала (пакета материалов) оценивали в каждой октавной полосе от 250 до 8000 Гц по разности величин исходной аудиограммы и аудиограммы, зарегистрированной с исследуемым материалом.

При стандартных акустических измерениях КТВ прижимается к области сосцевидного отростка с помощью оголовья. При проведении измерений с исследуемым материалом (пакетом материалов), обладающим упругостью, эластичностью и воздушностью, выявлено, что за счет прижима КТВ он деформируется, что приводит к изменению звукопоглощения. Для исключения этого влияния при проведении исследований КТВ удерживался на сосцевидном отростке рукой оператора.

Выбор материалов

При выборе материала для исследования использовали два критерия. Первый – материал по механическим свойствам должен быть подобен биологическим тканям, проводящим звук от места прикрепления КТВ до улитки. Для имитации костной ткани использовали сталь, пластик; кожи и крови – резину, пластилин; ткани легких – поролон. В табл. 2 приведены механические свойства выбранных материалов и биологических тканей [2].

Вторым критерием выбора исследуемого материала была способность звукопоглощения материалом, который можно использовать при изготовлении экстраауральных СИЗ от шума.

План эксперимента

Работа по исследованию звукопоглощения выполнялась в четыре этапа:

- 1) исследовали каждый из пяти материалов при фиксации КТВ с помощью оголовья (стандартная фиксация);
- 2) из материалов, обладающих звукопоглощающими свойствами, составляли пакеты путем комбинации 2–4 слоев разных материалов при стандартной фиксации КТВ;
- 3) материалы и пакеты с наилучшими звукопоглощающими свойствами исследовали при фиксации КТВ с помощью руки оператора;
- 4) исследовали величину звукопоглощения образцами СИЗ от шума различными методами.

Статистические методы

При статистической обработке данных рассчитывали среднее арифметическое значение (M), стандартную ошибку (m) и выполняли корреляционный анализ.

Таблица 2

Величина скорости звука и удельной плотности материалов и биологических тканей человека

Материал (биологическая среда, ткань)	Скорость звука, м/с	Удельная плотность, кг/м ³
Сталь	5000–6000	7700–7900
Пластик	2320	900–1600
Пластелин	1700	900
Резина	35–70	1100–1400
Поролон	40	25
Кость	3300	1920
Кровь	1590	1048–1066
Кожа	1610	1093–1121
Вода	1500	1000
Легкие	70	260

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗВУКОПОГЛОЩЕНИЯ РАЗЛИЧНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ТОНАЛЬНОЙ АУДИОМЕТРИИ**Первый этап**

Проводили исследования звукопоглощающей способности каждого из материалов, обладающих различными механическими свойствами [16, 18, 27]. Результаты экспериментальных исследований представлены в табл. 3.

Таблица 3

Величина звукопоглощения материалами (дБ) при стандартной фиксации КТВ (M ± m, n = 12)

Исследуемый материал	Среднегеометрическая частота в октавной полосе, Гц					
	250	500	1000	2000	4000	8000
Металлическая пластина, толщина 1,5 мм	0,0 ± 0,0	-5,0 ± 1,1	-4,6 ± 1,1	-4,2 ± 1,4	0,4 ± 1,1	0,8 ± 1,0
Пластик, толщина 5 мм	0,0 ± 0,0	-2,1 ± 1,5	-2,9 ± 1,0	2,9 ± 1,8	1,4 ± 0,9	5,7 ± 1,3
Резина микропористая, толщина 8 мм	0,0 ± 0,6	0,0 ± 0,9	0,0 ± 0,9	4,6 ± 1,3	8,8 ± 1,4	8,3 ± 1,4
Пластелин, толщина 15 мм	0,0 ± 0,0	0,4 ± 1,0	2,5 ± 1,0	8,8 ± 1,9	10,4 ± 1,9	10,4 ± 0,7
Поролон, толщина 15 мм	4,2 ± 1,4	4,2 ± 0,6	5,0 ± 1,1	9,2 ± 1,4	14,2 ± 1,0	12,5 ± 1,0

Примечание. Здесь и далее в таблицах величина звукопоглощения соответствует разнице между показаниями аудиограмм костной проводимости, полученными при контрольном исследовании и с использованием различных материалов.

Из табл. 3 следует, что стальная пластина и пластик практически не обладают звукопоглощением во всем исследуемом диапазоне частот, а в ряде случаев могут даже способствовать усилению звука. Резина и пластелин обладают звукопоглощающей способностью только в высокочастотном диапазоне (от 1000 до 8000 Гц), и величина

поглощения звука колеблется от 3 до 10 дБ. У поролона выявлено звукопоглощение от 4 до 14 дБ во всем диапазоне частот, повышаясь с частотой. Величина поглощения звука в низкочастотном (250 Гц) и среднечастотном (500 Гц) диапазонах не превышала 4 дБ, а в высокочастотном колебалась от 5 до 14 дБ. Поролон из всех исследуемых материалов обладал наибольшим звукопоглощением.

Таким образом, полученные данные показали наличие разницы в величине звукопоглощения каждого из пяти исследуемых материалов, которая колеблется в широком диапазоне от –5 до 14 дБ и зависит от частоты сигнала. С уменьшением удельного веса у материалов (пластилин, резина, поролон) звукопоглощение увеличивалось и достигало максимальных значений у поролона, что можно объяснить не только низким удельным весом, но и его пористостью за счет содержания воздуха.

Второй этап

Одним из способов повышения звукопоглощения является комбинация материалов, обладающих разной величиной поглощения звука. Поэтому на втором этапе работы использовали пакеты из двух материалов, которые при испытании на первом этапе показали наличие у них звукопоглощающих свойств, – это поролон, резина и пластилин. В табл. 4 представлены результаты исследования.

Таблица 4

Величина звукопоглощения (дБ) пакетом, состоящим из двух материалов, при стандартной фиксации КТВ ($M \pm m, n = 12$)

Исследуемый материал	Среднегеометрическая частота в октавной полосе, Гц					
	250	500	1000	2000	4000	8000
Поролон + резина	0,4 ± 1,0	0,8 ± 1,0	5,0 ± 1,1	10,8 ± 1,2	13,8 ± 1,6	14,2 ± 1,0
Резина + поролон	0,8 ± 0,8	2,9 ± 0,7	4,5 ± 1,6	9,2 ± 1,6	9,6 ± 1,3	11,3 ± 1,8
Пластилин + поролон	2,1 ± 0,7	5,0 ± 1,1	3,3 ± 0,9	12,1 ± 2,0	11,7 ± 0,9	10,8 ± 1,5
Поролон + пластилин	2,9 ± 0,7	5,0 ± 1,4	9,6 ± 1,3	15,0 ± 1,2	19,2 ± 1,2	15,0 ± 1,1
Резина + пластилин	0,4 ± 0,7	-0,0 ± 1,1	7,1 ± 1,1	9,6 ± 1,1	18,3 ± 1,7	12,9 ± 1,0
Пластилин + резина	0,8 ± 0,6	1,3 ± 1,3	1,7 ± 1,5	7,9 ± 1,8	15,8 ± 1,6	12,9 ± 0,7

Примечание. Здесь и в последующих таблицах: 1) первым указан материал, прилежащий к кости черепа; 2) жирным шрифтом выделены максимальные величины звукопоглощения в образце.

Из табл. 4 следует, что комбинация поролона и резины практически не сопровождалась повышением звукопоглощения пакетом по сравнению с указанными материалами в табл. 3. Изменение последовательности расположения материалов в пакете (резина + поролон) привело даже к некоторому снижению поглощения звука. Комбинация поролона и пластилина привела к повышению звукопоглощения пакетом от 2 до 6 дБ в диапазоне частот 1000–8000 Гц. Изменение порядка расположения этих материалов в пакете по отношению к кости черепа (пластилин + поролон) давало меньшие величины поглощения звука. Пакет из резины и пластилина обладал более высоким звукопоглощением, чем каждый из материалов в отдельности на частотах 1000–8000 Гц. Величина ее увеличилась от 1 до 8 дБ. Изменение порядка расположения этих материалов в пакете по отношению к кости черепа (пластилин + резина) давало меньшие величины звукопоглощения.

Следовательно, комбинация из двух материалов способствовала повышению звукопоглощения. В области низких частот величина поглощения звука этими пакетами не превышала 3 дБ, в среднечастотном диапазоне она повысилась до 5 дБ и в высокочастотном достигла наибольших значений, до 19 дБ. Лучшие результаты были получены, когда поролон и резина контактировали с костью черепа. Скорость распространения звука в этих материалах была меньше по сравнению с вышележащим материалом. При сочетании поролона с пластилином звукопоглощение было наибольшим среди всех комбинаций из двух материалов, величина его составила 3–19 дБ.

Итак, экспериментально было подтверждено, что комбинация двух материалов с разным звукопоглощением способствовала повышению поглощения звука на несколько дБ практически во всем диапазоне частот. Сочетание в пакете материалов с большей разницей удельного веса давало наибольшие значения звукопоглощения. Оказывала влияние и последовательность расположения материалов в пакете.

Экспериментальные исследования показали, что наилучшее звукопоглощение показали такие материалы, как поролон, резина и пластилин, а их сочетание в пакете из двух материалов дало увеличение звукопоглощения. Поэтому было решено сделать пакеты из этих трех материалов с разной последовательностью. В табл. 5 представлены результаты исследования пакетов из трех материалов.

Таблица 5

Величина звукопоглощения (дБ) пакетом, состоящим из трех материалов, при стандартной фиксации КТВ ($M \pm m, n = 12$)

Исследуемый материал	Среднегеометрическая частота в октавной полосе, Гц					
	250	500	1000	2000	4000	8000
Поролон + пластилин + резина	1,7 ± 0,7	5,4 ± 1,1	5,0 ± 1,4	12,9 ± 1,4	20,0 ± 1,1	15,8 ± 1,4
Поролон + резина + пластилин	4,6 ± 1,1	7,9 ± 1,6	11,3 ± 1,4	13,3 ± 1,8	22,1 ± 0,7	17,5 ± 1,0
Пластилин + поролон + резина	3,3 ± 1,1	4,6 ± 1,1	8,8 ± 1,4	11,3 ± 1,4	17,5 ± 1,0	16,3 ± 1,6
Резина + поролон + пластилин	5,4 ± 1,4	7,9 ± 1,4	17,1 ± 2,0	15,4 ± 1,6	29,2 ± 0,6	22,1 ± 1,0
Резина + поролон + пластик	2,9 ± 1,1	5,8 ± 1,6	9,6 ± 1,6	19,2 ± 1,5	21,3 ± 1,4	17,1 ± 1,3

Примечание: см. табл. 3 и 4.

Из табл. 5 следует, что сочетание в пакете поролона, резины и пластилина способствовало повышению поглощения звука во всем диапазоне частот. Наилучшие результаты получены в пакете при комбинации резина + поролон + пластилин. Величина звукопоглощения составила 5–22 дБ, увеличиваясь с ростом частоты. Она увеличилась от 2 до 10 дБ во всем диапазоне частот по сравнению с пакетом из двух материалов (поролон + пластилин).

Таким образом, комбинация из трех материалов (резина + поролон + пластилин) была наиболее эффективной. В области низких частот величина поглощения звука не превышала 5 дБ, в области средних частот она повысилась до 8 дБ и в области высоких – достигла наибольших значений, 15–29 дБ.

В табл. 6 приведены результаты исследования пакетов из четырех материалов.

Таблица 6

Величина звукопоглощения (дБ) четырехслойным пакетом при стандартной фиксации КТВ ($M \pm m, n = 12$)

Исследуемый материал	Среднегеометрическая частота в октавной полосе, Гц					
	250	500	1000	2000	4000	8000
Поролон 2 см + резина + поролон 2 см + пластилин	3,8 ± 1,3	8,3 ± 1,5	13,8 ± 1,8	17,9 ± 1,6	29,6 ± 1,3	20,8 ± 1,0
Поролон 1 см + резина + поролон 1 см + пластилин	3,8 ± 1,1	7,9 ± 1,6	14,2 ± 1,2	16,7 ± 1,1	27,5 ± 2,0	21,3 ± 1,3
Поролон 0,5 см + резина + поролон 0,5 см + пластилин	2,9 ± 1,0	5,0 ± 1,2	13,3 ± 1,8	17,9 ± 1,7	26,7 ± 0,9	20,4 ± 1,4

Примечание: см. табл. 3 и 4.

Из табл. 6 следует, что введение в пакет из трех материалов (резина + поролон + пластилин) дополнительного слоя из поролона (поролон + резина + поролон + пластилин) не привело к изменению величины звукопоглощения по сравнению с пакетом из трех материалов. Изменение толщины поролона (0,5–2,0 см) практически не повлияло на величину поглощения звука.

Третий этап

Надежная фиксация и плотный прижим излучающей поверхности КТВ к области сосцевидного отростка при стандартных измерениях обеспечивается с помощью оголовья, что вызывает деформацию материалов, обладающих упругостью, эластичностью и воздушностью. Как правило, это приводит к изменению звукопоглощения. На третьем этапе для исключения влияния деформации материалов за счет прижима оголовья были проведены исследования, при которых КТВ удерживался на сосцевидном отростке рукой оператора (табл. 7).

Из табл. 7 следует, что изменение способа фиксации КТВ незначительно увеличило звукопоглощение (до 2 дБ) при стандартном измерении на сосцевидном отростке и при использовании металлической пластины. При проведении измерений подача акустического сигнала через КТВ повышается последовательно от подпороговых значений до пороговых с шагом 5 дБ. Соизмеримость этих двух величин позволяет утверждать, что изменение фиксации КТВ не влияет на величину звукопоглощения материалами с высокой удельной плотностью, так как способы фиксации КТВ не способны деформировать материалы с высокой плотностью.

Устранение деформации привело к увеличению величины звукопоглощения во всем диапазоне частот: у пластилина на 2–13 дБ, у резины – на 3–17 дБ, максимальные значения наблюдались у поролона – на 15–26 дБ (см. табл. 7). У первых двух материалов существенный прирост звукопоглощения наблюдался в области высоких частот, а в последнем случае этот эффект отмечен во всем диапазоне исследуемых частот с максимумом на частотах выше 2000 Гц.

Устранение деформации повысило величину звукопоглощения всеми пакетами по сравнению с данными табл. 4–6. Так, у пакетов из двух материалов наибольшие значения были при комбинации пластилин + поролон (11–37 дБ), из трех материалов – поролон + пластилин + резина (16–39 дБ) и из четырех слоев – поролон + резина + поролон + пластилин (25–37 дБ) (см. табл. 7).

Таблица 7

Величина звукопоглощения (дБ) исследуемыми материалами при фиксации КТВ рукой оператора ($M \pm m, n = 12$)

Исследуемый материал	Среднегеометрическая частота в октавной полосе, Гц					
	250	500	1000	2000	4000	8000
Сосцевидный отросток	0,4 ± 0,4	1,3 ± 0,7	1,7 ± 0,7	2,1 ± 1,3	1,3 ± 0,7	0,0 ± 1,1
Металлическая пластинка	0,4 ± 0,4	0,8 ± 0,6	0,8 ± 1,0	1,7 ± 0,7	1,7 ± 0,7	2,1 ± 0,7
Поролон	14,6 ± 1,0	19,6 ± 1,1	22,1 ± 1,7	23,3 ± 1,8	23,8 ± 0,9	26,3 ± 1,4
Резина	3,3 ± 0,9	6,3 ± 1,4	12,9 ± 1,4	12,9 ± 1,0	15,0 ± 1,5	17,1 ± 1,1
Пластелин	1,7 ± 0,7	2,9 ± 1,1	5,0 ± 1,2	9,6 ± 1,3	11,3 ± 0,9	12,9 ± 1,0
Пластелин + поролон	11,3 ± 0,7	22,1 ± 0,7	30,8 ± 1,2	34,2 ± 1,8	32,9 ± 1,3	37,1 ± 1,9
Резина + поролон + пластелин	15,0 ± 1,1	16,3 ± 1,3	25,4 ± 1,1	31,3 ± 1,1	32,5 ± 1,0	32,9 ± 1,3
Поролон + резина + поролон + пластелин	25,0 ± 1,5	28,8 ± 1,3	34,6 ± 1,6	36,7 ± 1,7	35,0 ± 2,0	29,2 ± 1,8

Примечание. 1. Величина звукопоглощения соответствует разнице между величиной, полученной при стандартной фиксации КТВ к сосцевидному отростку с помощью оголовья и фиксацией рукой оператора. 2. Первым указан материал, прилежащий к кости черепа.

Следовательно, изменение метода фиксации КТВ привело к существенному повышению величины поглощения звука во всем частотном диапазоне, что указывает на достаточно высокую чувствительность предложенного способа измерения с помощью тональной аудиометрии.

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СРЕДСТВ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ОТ ШУМА РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ**Четвертый этап**

На четвертом этапе предлагаемый нами метод измерения поглощения звука был апробирован на мягком ПШШ, разработанном в интересах авиационных специалистов (табл. 8). Для сравнения в табл. 8 включены результаты оценки акустической эффективности этого изделия с помощью микрофона, расположенного в подшлемном пространстве манекена головы.

Из табл. 8 следует, что мягкий ПШШ обладает звукопоглощением во всем диапазоне исследуемых частот при измерении КТВ в стандартном положении. В диапазоне частот 250–1500 Гц поглощение звука не превышало 12 дБ, а на более высоких частотах оно значительно повышалось и колебалось от 18 до 35 дБ. Как и при исследовании пакетов, изменение способа фиксации источника звука (с помощью руки оператора) привело к повышению звукопоглощения ПШШ на всех частотах на 5–10 дБ.

Измерение поглощения звука мягким ПШШ, расположенным на манекене головы, с помощью микрофона в подшлемном пространстве показало, что величина звукопоглощения на частоте 250 Гц составила 4 дБ и соответствовала величине поглощения звука, измеренного КТВ, фиксированного с помощью оголовья, 6 дБ. На частоте 500 Гц величина поглощения звука, измеренная с помощью микрофона, равнялась 5 дБ и была ниже значений, полученных с помощью КТВ на 7–14 дБ, независимо от способа фиксации КТВ (см. табл. 8).

Таблица 8

Величина звукопоглощения мягким противошумным шлемом ($M \pm m, n = 12$)

Исследуемый материал и метод измерения звукопоглощения	Среднегеометрическая частота в октавной полосе, Гц					
	250	500	1000	2000	4000	8000
Мягкий шлем (стандартное положение КТВ)	6,3 ± 2,0	12,1 ± 1,6	14,6 ± 1,0	17,5 ± 2,3	24,6 ± 1,9	34,6 ± 1,8
Мягкий шлем (КТВ фиксирован рукой)	10,8 ± 0,8	15,0 ± 1,1	17,9 ± 1,3	29,2 ± 1,5	30,8 ± 1,9	38,3 ± 2,2
Мягкий шлем (микрофон в подшлемном пространстве)	4,2 ± 0,4	5,3 ± 0,6	9,1 ± 0,7	20,4 ± 1,1	29,5 ± 0,8	39,6 ± 0,7
Поролон + резина + поролон + пластилин (КТВ фиксирован рукой)	25,0 ± 1,5	28,8 ± 1,3	34,6 ± 1,6	36,7 ± 1,7	35,0 ± 2,0	29,2 ± 1,8
Пакет из материалов (поролон, войлок, тентовая ткань и др.), входящих в состав мягкого шлема (упрощенный метод)	23,4 ± 0,8	21,2 ± 0,9	18,8 ± 1,1	26,0 ± 0,8	27,7 ± 1,0	23,5 ± 0,7

На частотах 1000 и 2000 Гц величина звукопоглощения ПШШ при измерении микрофоном составила соответственно 9 и 20 дБ и совпадала со значениями, полученными КТВ при стандартной фиксации, но была ниже, чем при фиксации КТВ рукой (соответственно 18 и 29 дБ). На частотах 4000 и 8000 Гц величина звукопоглощения при измерении микрофоном была наибольшей и составила соответственно 29 и 39 дБ. Она совпадала со значениями, полученными при фиксации КТВ рукой, и была выше на 4 дБ, чем при стандартной фиксации КТВ (см. табл. 8).

Следовательно, величины звукопоглощения мягким ПШШ, измеренные с помощью микрофона в подшлемном пространстве, имеют сходство с величинами звукопоглощения, полученными при измерении с помощью КТВ.

В табл. 8 представлены результаты измерения поглощения звука пакетом материалов, из которого изготовлен мягкий авиационный шлем упрощенным методом. Пакет, который использовали для изготовления мягкого авиационного шлема, состоит из нескольких слоев материала (поролон, войлок, тентовая ткань и др.). Полученные результаты показывают, что этот пакет обладает хорошим звукопоглощением от 250 до 8000 Гц, так как на всех частотах величина поглощения звука колебалась от 18 до 27 дБ. Исследование четырехслойного пакета (поролон + резина + поролон + пластилин) с помощью КТВ, фиксированного рукой, показало близкие значения поглощения звука, которые составили 25–35 дБ. Таким образом, звукопоглощение пакетом, который использовали для изготовления мягкого авиационного шлема, имеет сходство с пакетом материалов, который был предложен нами для проведения экспериментальных исследований, несмотря на разные методы оценки измерения (соответственно упрощенный метод и субъективный метод).

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Известно, что при распространении акустических волн в среде возникают механические деформации, распространяющиеся со скоростью, зависящей от упругих свойств и плотности среды. Можно выделить три группы тканей в организме человека и животных, различающихся по акустическим свойствам [2]. К первой группе относится костная ткань (по акустическим свойствам близкая к твердому телу), в которой скорость продольной акустической волны достигает $2500\text{--}4500\text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$.

Вторая группа биологических тканей (кожа, селезенка, мышечная ткань, мозг, печень, почки) и жидкостей (кровь, ликвор) по своим акустическим свойствам имеет сходство с водой, где скорость звука равна $1500\text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$.

Легкие вошли в третью группу тканей, скорость акустической волны в них значительно меньше, чем в первых двух группах, и, по данным разных авторов, составляет менее $70\text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ из-за анатомо-морфологических особенностей органа дыхания. Они по акустическим свойствам близки к пористым мягким материалам.

В табл. 2 для сравнения приведены некоторые механические свойства исследуемых в эксперименте материалов и биологических тканей, из нее следует, что использованные в работе материалы имеют близкие физические характеристики с биологическими тканями, которые участвуют в звукопроведении акустического сигнала к улитке уха. Исследование этих материалов с помощью КТВ позволило количественно оценить их влияние на звукопроведение в диапазоне частот от 250 до 8000 Гц, т.е. во всех звуковых диапазонах (низко-, средне- и высокочастотном). Величина звукопоглощения варьировалась от -5 до 20 дБ. Наиболее высокие величины снижения акустического сигнала получены при исследовании поролон, а применение стальной пластины практически давало обратный эффект – усиление до -5 дБ.

В табл. 9 приведены коэффициенты корреляции между параметрами материалов и величиной звукопоглощения при стандартной фиксации КТВ.

Из табл. 9 следует, что в области низких частот эта связь была слабой ($r = 0,28$, $p \leq 0,05$), в области средних и высоких частот средней ($r = 0,59\text{--}0,71$, $p \leq 0,05$). Величина поглощения звука имела обратную связь и со скоростью звука материалов, и удельной плотностью. Значения коэффициента корреляции у обеих переменных практически были схожими. Из этого можно сделать два вывода. Во-первых, между величиной поглощения звука и выбранными механическими параметрами существует устойчивая связь, по которой можно оценивать звукопоглощающую способность материалов с помощью метода тональной аудиометрии. Во-вторых, корреляционный анализ показал, что между скоростью звука и удельной плотностью материалов имеется сильная прямая связь ($r = 0,88$, $p \leq 0,05$), т.е. обе переменные, разные по своей физической сущности, способны близко оценивать поглощающую способность материалов.

Таблице 9

Коэффициенты корреляции (r) между механическими параметрами материалов и величиной поглощения при стандартной фиксации КТВ

Исследуемая переменная	Среднегеометрическая частота в октавной полосе, Гц					
	250	500	1000	2000	4000	8000
Скорость звука	-0,28	-0,63	-0,59	-0,62	-0,64	-0,69
Удельная плотность	-0,25	-0,62	-0,60	-0,67	-0,61	-0,71

Примечание: здесь и в табл. 10 жирным шрифтом выделены достоверно ($p < 0,05$) значимые величины.

Устранение деформации со стороны оголовья КТВ показало значимое повышение величины коэффициента корреляции, особенно в области низких частот (см. табл. 10).

Таблице 10

Коэффициенты корреляции (r) между механическими параметрами материалов и величиной поглощения при фиксации КТВ рукой

Исследуемая переменная	Среднегеометрическая частота в октавной полосе, Гц					
	250	500	1000	2000	4000	8000
Скорость звука	-0,55	-0,59	-0,72	-0,76	-0,83	-0,85
Удельная плотность	-0,53	-0,56	-0,64	-0,73	-0,81	-0,82

Примечание: см. табл.9.

При фиксации КТВ рукой эта связь увеличивалась до $r = 0,55$ ($p \leq 0,05$) в области низких частот, практически не изменялась на частоте 500 Гц ($r = 0,59$, $p \leq 0,05$) и достигала максимальных значений в области высоких частот – $r = 0,72-0,85$ ($p \leq 0,05$).

Корреляционный анализ полученных результатов показывает, что величина поглощения звука зависит и от скорости звука, и удельной плотности материалов. Она существенно увеличивалась с повышением частоты звука. Снижение силы прижатия КТВ приводило к уменьшению деформации материала и увеличению коэффициентов корреляции, особенно в области низких частот.

Из этого следует, что у материалов с уменьшением скорости звука и плотности увеличивается величина звукопоглощения. При выборе материалов для СИЗ от шума можно ориентироваться на такие механические параметры, как скорость звука или удельная плотность материала. Звукопоглощение материалами повышается с увеличением частоты звука.

На корректность использования тональной аудиометрии в исследовании акустической эффективности указывает коэффициент звукопоглощения, который также имеет обратную корреляционную связь с плотностью материала. Так, у твердых материалов с плотностью 300–400 кг/м³ коэффициент звукопоглощения равен 0,5; у полужестких материалов с плотностью 80–130 кг/м³ (минераловатные и стекловолоконные плиты) – 0,5–0,75 и мягких материалов (минеральная вата, поролон) с плотностью до 70 кг/м³ – 0,7–0,95.

Итак, метод тональной аудиометрии позволяет проводить количественную оценку наличия у материала звукопоглощающих свойств, и это можно использовать для разработки методики оценки акустической эффективности экстраауральных СИЗ.

Одним из направлений повышения акустической эффективности является комбинация материалов с различной степенью поглощения звука. Методом тональной аудиометрии в экспериментальных исследованиях показано, что сочетание нескольких материалов может приводить к усилению поглощения звука. Были выявлены определенные последовательности расположения материалов, которые влияли на звукопоглощение и позволяли оптимизировать звукопоглощающие свойства пакета. Устранение деформации материалов за счет изменения системы крепления КТВ приводило к значительному повышению поглощения звука.

Подтверждением вышеизложенного являются результаты дисперсионного анализа полученных экспериментальных данных. В дисперсионный комплекс были включены в качестве фактора (независимой переменной) средние групповые значения звукопоглощения и в качестве зависимой переменной – величина поглощения звука.

Рассчитывали степень влияния фактора, определяемую долей дисперсии, обусловленной этим фактором, по отношению к общей дисперсии по формуле

$$\eta = (SS_{\text{материал}} \cdot 100) / SS_{\text{Total}}.$$

Значимость влияния этого фактора оценивали по F -критерию с определением его достоверности по критерию $p \leq 0,05$. Степень влияния фактора определяли на каждой из шести октавных частот со среднегеометрической частотой 250, 500, 1000, 2000, 4000 и 8000 Гц соответственно.

Исследование проводили в два этапа. На первом этапе выборка состояла из 16 групп, в которых исследовали звукопоглощение в пакетах, включающих 1–4 слоя из различных материалов, КТВ фиксировали стандартно с помощью оголовья. На втором этапе дисперсионный анализ проводился по той же схеме, только выборка была меньшей и состояла из 13 групп, а КТВ фиксировали к сосцевидному отростку с помощью руки оператора, что позволяло устранить до минимума деформацию исследуемых материалов. Выборка во всех исследуемых группах состояла из 12 наблюдений. В табл. 11 приведена степень влияния фактора на звукопоглощающие свойства материалов методом тональной аудиометрии при стандартной фиксации КТВ.

Из табл. 11 следует, что с увеличением частоты звукового сигнала доля влияния неконтролируемых факторов на дисперсию величины звукопоглощающих свойств материалов существенно снизилась: на частоте 2000 Гц она составила 32,2 %, а на частоте 8000 Гц – 12,1 %. При использовании одного слоя материала степень влияния фактора не превышала 3 % и росла с увеличением слоев материалов. Так, при использовании двух материалов ее величина достигала 6 %, трех и четырех – 13 %. Подтверждением является колебание значений поглощения звука, которое на частоте 2000 Гц было от 5 до 16 дБ, на частоте 4000 Гц – 9–30 дБ и на частоте 8000 Гц – 8–22 дБ (см. табл. 4–6). Изменение толщины поролоната от 0,5 до 2 см в четырехслойных пакетах практически не влияло на степень влияния фактора на величину звукопоглощения (см. табл. 11), что было подтверждено отсутствием достоверных различий при сравнении значений между этими тремя группами по критерию Стьюдента. Как видно, величина звукопоглощения практически не зависела от материалов и их комбинации при стандартной фиксации КТВ.

В табл. 12 приведена степень влияния фактора на величину звукопоглощения при фиксации КТВ рукой оператора.

Из табл. 12 следует, что при фиксации КТВ рукой максимальная доля дисперсии случайных факторов на частоте 250 Гц составила 18,2 %, и она снижалась с повышением исследуемой частоты. На частоте 8000 Гц ее доля была минимальной – 6,0 %. Практически во всех случаях степень влияния фактора на величину звукоизоляции была достоверной. Это указывало на то, что величина звукоизоляции во всех исследуемых группах в определенной степени зависела от используемых материалов и их комбинации. Подтверждением является увеличение абсолютных значений поглощения звука (см. табл. 7). Величина поглощения звука росла на каждой частоте как с увеличением слоев материалов, так и с повышением частоты звука.

При исследовании одного слоя материалов обращает на себя внимание поролон, у которого величина звукопоглощения повысилась на всех частотах от 10 до 14 дБ, а у резины и пластилина существенное повышение величины поглощения звука наблюдалось только от 1000 Гц и выше. У поролоната степень влияния фактора на величину звукопоглощения колебалась от 4 до 8 % в исследуемом частотном диапазоне, у резины она не превысила 2 % и у пластилина – 1 %.

Таблица 11

Степень влияния фактора на звукопоглощающие свойства материалов методом тональной аудиометрии при стандартной фиксации КТВ (η %)

Исследуемый материал	Среднегеометрическая частота (Гц) в октавной полосе					
	250	500	1000	2000	4000	8000
Поролон	3,2	1,1	0,7	1,9	2,8	3,5
Резина	0,0	0,2	0,2	0,2	0,9	1,5
Пластилин	0,0	0,1	0,0	1,7	1,4	2,4
Поролон + резина	0,0	0,0	0,7	2,9	2,6	4,5
Резина + поролон	0,0	0,4	0,5	1,9	1,1	2,8
Пластилин + поролон	0,6	1,8	0,2	3,8	1,8	2,6
Поролон + пластилин	1,2	1,3	4,1	6,0	5,3	4,8
Резина + пластилин	0,0	0,0	1,8	2,4	4,9	4,0
Пластилин + резина	0,4	0,0	0,0	1,3	3,5	3,7
Поролон + пластилин + резина	0,4	2,2	0,7	4,4	5,8	5,6
Поролон + резина + пластилин	4,0	5,6	5,7	4,7	7,2	6,8
Пластилин + поролон + резина	2,0	1,4	3,1	3,2	4,4	5,9
Резина + поролон + пластилин	5,8	5,6	14,7	6,7	12,9	10,8
Поролон + резина + поролон + пластилин (толщина поролона 2 см)	2,6	6,4	9,0	9,4	13,2	9,7
Поролон + резина + поролон + пластилин (толщина поролона 1 см)	2,6	5,6	9,7	8,0	11,4	10,0
Поролон + резина + поролон + пластилин (толщина поролона 0,5 см)	1,4	1,8	8,4	9,4	10,7	9,3
Неконтролируемые факторы	75,8	66,4	40,5	32,2	10,4	12,1
Всего	2607,20	–	–	–	–	100,0

Примечание: здесь и в табл. 12 жирным шрифтом выделены величины, уровень значимости (p) которых выше 0,05.

При комбинации двух материалов отмечалось увеличение величины звукопоглощения (см. табл. 7) и степени влияния факторов (см. табл. 12) на нее в зависимости от материалов и очередности их расположения по отношению к сосцевидному отростку. Это хорошо видно при комбинации пластилина с поролоном, при которой степень влияния фактора на частоте 250 Гц составила 5 %, а на частоте 8000 Гц – 11 %. При использовании трех материалов тенденция повышения звукопоглощения и степени влияния факторов сохранилась. Наилучшие значения получены при комбинации поролон + резина + пластилин. Степень влияния фактора на частоте 250 Гц составила 9 %, а на частоте 8000 Гц – 13 %. При исследовании четырехслойного пакета существенно увеличилась величина звукопоглощения на частоте 250 Гц, до 25 дБ, а также степень влияния фактора на нее до 25 %.

Таблица 12

**Степень влияния факторов на звукопоглощающие свойства материалов методом
тональной аудиометрии при фиксации КТВ рукой оператора (η , %)**

Исследуемый материал	Среднегеометрическая частота (Гц) в октавной полосе					
	250	500	1000	2000	4000	8000
Поролон	7,6	6,4	5,0	4,1	4,4	5,5
Резина	0,1	0,3	1,3	0,9	1,5	2,1
Пластилин	0,0	0,0	0,0	0,4	0,7	1,1
Поролон + резина	0,4	3,9	5,7	8,1	6,8	5,8
Резина + поролон	4,5	9,2	7,5	8,8	6,1	8,2
Пластилин + поролон	4,1	8,5	10,9	9,9	9,2	11,4
Поролон + пластилин	2,6	2,4	3,8	4,8	7,1	6,7
Поролон + пластилин + резина	5,3	2,8	4,2	7,1	8,9	8,6
Поролон + резина + пластилин	9,2	15,8	10,2	11,0	11,0	12,5
Пластилин + поролон + резина	4,5	7,1	9,6	8,1	8,7	10,1
Резина + поролон + пластилин	8,1	4,2	7,0	8,1	8,9	8,9
Поролон + резина + поролон + пластилин (толщина поролона 2 см)	25,0	15,6	14,2	11,8	10,6	6,7
Поролон + резина + поролон + пластилин (толщина поролона 1 см)	10,3	11,2	10,2	9,9	8,4	6,2
Неконтролируемые факторы	18,2	12,6	10,2	7,0	7,7	6,0
Всего	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Примечание: см. табл. 11.

Таким образом, дисперсионный анализ подтверждает влияние способа фиксации на величину звукопоглощения. При использовании оголовья (стандартного способа крепления КТВ) величина случайных факторов в диапазоне 250–2000 Гц достаточно высокая (превышает 32 %), а на частотах выше 4000–8000 Гц она снижается до 10–12 %. Основной причиной этого является деформация материалов за счет прижима КТВ оголовьем. Устранение деформации материалов привело к повышению поглощения звука, а дисперсионный анализ показал достаточно высокую величину контролируемых факторов (свыше 80 %), а также увеличение степени влияния факторов на величину звукопоглощения в частотном диапазоне от 250 до 8000 Гц. Кроме того, было выявлено, что степень влияния факторов повышалась от количества используемых слоев материалов в пакете и от их чередования.

Из этого следует, что метод тональной аудиометрии может быть использован для исследования поглощающих свойств материалов, а также оптимизации звукопоглощения путем комбинации материалов с различными акустическими свойствами и их очередности расположения.

Для подтверждения правильности выбранного направления были проведены исследования на ПШШ. Использование КТВ, фиксированного рукой, показало, что ПШШ обладает звукопоглощением от 10 до 39 дБ с максимумом в области 3000–8000 Гц. При фиксации КТВ с помощью оголовья поглощение звука

уменьшилось и составило 6–35 дБ. Сравнение акустической эффективности ПШШ при размещении микрофона в подшлемном пространстве (шлем надет на манекен головы) и с помощью костного телефона (шлем надет на испытуемого) показало существенно меньшие величины поглощения звука в области 250–2000 Гц в первом случае и совпадение в области 4000–8000 Гц. Различие можно объяснить тем, что в первом случае испытания проводятся в свободном акустическом поле и акустические частоты до 1000–000 Гц соизмеримы с размером черепа, поэтому голова как общее целое синфазно подвергается акустическому воздействию и защитный эффект ПШШ снижается на этих частотах. На частотах свыше 2000 Гц голова колеблется не синфазно, потому поглощение звука увеличивается. При исследовании с помощью КТВ акустическое воздействие осуществляется локально, поэтому в этом случае исследуется акустическая эффективность не всего ПШШ, а только свойства пакета материалов, из которых он изготовлен.

Определенным подтверждением являются результаты исследования пакета, из которого изготовлен ПШШ. Они были получены на устройстве, которое используется при упрощенном методе измерения СИЗ от шума [ГОСТ Р 12.4.213–99]. Величины поглощения звука у пакета колеблются от 18 до 27 дБ, совпадая с таковыми у ПШШ в области свыше 2000 Гц и значительно превышая на частотах 250–2000 Гц. Пакет ПШШ включал войлок, ткань СВМ, два слоя поролон по 8 мм каждый, тентовую ткань, т.е. материалы с различными механическими свойствами. Сравнение результатов акустической эффективности пакета ПШШ, полученных упрощенным методом измерения, и экспериментального пакета показывает, что величины звукопоглощения обоими пакетами совпадают. Из этого следует, что оба метода могут использоваться при оценке эффективности ПШШ.

Существующие подходы позволяют оценить эффективность СИЗ от шума только по воздушному пути распространения звука. Предложенный нами субъективный метод исследования звукопоглощения посредством тональной аудиометрии возможно использовать для оценки звукопоглощающих свойств материалов, предназначенных для защиты костно-тканевого пути. Наличие микрофонного способа и субъективного метода позволяют объективно и надежно оценить звукопоглощающую способность экстрауральных СИЗ. Выбранный методический путь решения этой задачи аналогичен научному решению оценки поглощения шума используемых СИЗ от шума.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование функционального состояния органа слуха с помощью метода тональной аудиометрии нашло широкое применение в медицине. Метод позволяет количественно оценивать восприятие звукового сигнала, который поступает в орган слуха воздушным и костно-тканевым путем.

Проведенные нами экспериментальные исследования показали, что аудиометр можно использовать для измерения звукопоглощающих свойств различных материалов, в том числе при создании СИЗ от шума. Это обусловлено тем, что биологические ткани и материалы имеют сходные механические и акустические свойства. Для этого была предложена усовершенствованная технология исследования костной проводимости. Исследуемый образец материала накладывался на кожу в области сосцевидного отростка, а источник звука, КТВ, прикреплялся к нему снаружи с помощью оголовья или удерживался рукой оператора. В последнем случае минимизировалась возможность деформации исследуемого материала, что существенно снижало величину поглощения звука. Особенно это актуально для пористых материалов с малым удельным весом.

Полученные результаты показали, что предложенное техническое решение позволяет, во-первых, использовать аудиометр для измерения величины звукопоглощения различными материалами. Во-вторых, разработать методику исследования акустической эффективности СИЗ, предназначенных для защиты костных структур головы и поверхности грудной и брюшной полости от высокоинтенсивного шума. Субъективный метод измерения звукопоглощения материалами, предназначенными для защиты костно-тканевого пути проведения шума, позволит получать объективные параметры поглощения звука.

Таким образом, на основе метода тональной аудиометрии разработан субъективный метод измерения звукопоглощения, необходимый для оценки эффективности экстраауральных СИЗ (ПШШ и ПШЖ) и исследования акустической эффективности материалов при разработке СИЗ. Прибор аудиометр можно рассматривать в качестве прототипа при создании нового устройства для измерения звукопоглощающей способности материалов [18, 26].

Значимость работы определяется и тем, что на сегодняшний день наиболее эффективным средством профилактики неблагоприятного действия шума на организм человека являются СИЗ от шума [10, 13, 19, 28].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабияк В.И., Говорун М.И., Накатис Я.А. Оториноларингология: руководство: в 2 т. – СПб.: Питер, 2009. – Т.2. – 739 с.
2. Березовский В.А., Колотилов Н.Н. Биофизические характеристики тканей человека. – Киев: Наукова думка, 1990. – 224 с.
3. Гигиена труда: учебник / под ред. Н.Ф. Измерова, В.Ф. Кириллова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2016. – 480 с.
4. Денисов Э.И., Морозова Т.В., Аденинская Е.Е., Курьеров Н.Н. Проблема реальной эффективности индивидуальной защиты и привносимый риск для здоровья работников (обзор литературы) // Медицина труда и промышленная экология. – 2013. – № 4. – С. 18–25.
5. Жданько И.М., Зинкин В.Н., Солдатов С.К., Богомолов А.В., Шешегов П.М. Фундаментальные и прикладные аспекты профилактики неблагоприятного действия авиационного шума // Авиакосмическая и экологическая медицина. – 2014. – Т. 48, № 4. – С. 5–16.
6. Зинкин В.Н. Пути совершенствования оценки акустической эффективности средств индивидуальной защиты // Проблемы безопасности полетов. – 2016. – № 11. – С. 27–34.
7. Зинкин В.Н. Современные проблемы производственного шума // Защита от повышенного шума и вибрации: сб. докл. всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. – СПб., 2015. – С. 34–54.
8. Зинкин В.Н., Ахметзянов И.М. Экологические, производственные и медицинские аспекты инфразвука // Защита от повышенного шума и вибрации: сб. докл. всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. – СПб., 2013. – С. 177–198.
9. Зинкин В.Н., Ахметзянов И.М., Орихан М.М. Инфразвук как вредный производственный фактор // Безопасность жизнедеятельности. – 2013. – № 9. – С. 2–9.
10. Зинкин В.Н., Квасовка В.В., Солдатов С.К., Шишов А.А., Свидовой В.И., Шешегов П.М., Шведов А.П. Влияние высокоинтенсивного авиационного шума на заболеваемость инженерно-технического состава Военно-воздушных сил // Военно-медицинский журнал. – 2008. – Т. 329, № 2. – С. 59–63.
11. 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. – С. 2–6.
12. Зинкин В.Н., Кукушкин Ю.А., Богомолов А.В., Солдатов С.К., Шешегов П.М. Анализ эффективности средств защиты от шума во взаимосвязи с профессиональной надежностью специалистов «шумовых» профессий // Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях. – 2011. – № 3. – С. 70–76.
13. Зинкин В.Н., Миронов В.Г., Солдатов С.К., Шешегов П.М. Особенности патологического действия авиационного шума на орган слуха инженерно-технического состава авиации // Российская отоларингология. – 2007. – № 6. – С. 69–74.

14. Зинкин В.Н., Свидовый В.И., Ахметзянов И.М. Неблагоприятное влияние низкочастотных акустических колебаний на органы дыхания // Профилактическая и клиническая медицина. – 2011. – № 3. – С. 280–284.
15. Зинкин В.Н., Солдатов С.К., Богомолов А.В., Драган С.П. Актуальные проблемы защиты населения от низкочастотного шума и инфразвука // Технология гражданской безопасности. – 2015. – Т. 12, № 1. – С. 90–96.
16. Зинкин В.Н., Шешегов П.М. Возможности тональной аудиометрии в определении звукопоглощающих свойств материалов // Вестник оториноларингологии. – 2014. – № 6. – С. 34–38.
17. Зинкин В.Н., Шешегов П.М. Современные проблемы шума в авиации // Проблемы безопасности полетов. – 2014. – № 5. – С. 3–25.
18. Зинкин В.Н., Шешегов П.М. Технология исследования звукопоглощающей способности материалов на основе тональной аудиометрии // Медицинская техника. – 2014. – № 4. – С. 43–47.
19. Зинкин В.Н., Шешегов П.М., Чистов С.Д. Клинические аспекты профессиональной сенсоневральной тугоухости акустического генеза // Вестник оториноларингологии. – 2015. – Т. 80, № 6. – С. 65–70.
20. Измеров Н.Ф., Суворов Г.А., Прокопенко Л.В. Человек и шум. – М.: ГЭОТАР-МЕД, 2001. – 384 с.
21. Карпова Н.И., Малышев Э.Н. Низкочастотные акустические колебания на производстве. – М.: Медицина, 1981. – 192 с.
22. Крылов Ю.В., Фролов Н.И., Кузнецов В.С. [и др.]. Воздействия авиационного шума на организм // Военно-медицинский журнал. – 1977. – № 2. – С. 57–59.
23. Национальное руководство по отоларингологии / под ред. В.Т. Пальчун. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2016. – 960 с.
24. О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2015 году: гос. докл.; Федер. служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. – М., 2019. – 254 с.
25. Таварткиладзе Г.А., Гвелесиани Т.Г. Клиническая аудиология. – М.: Святогор Пресс, 2003. – 74 с.
26. Устройство для исследования звукопоглощающей способности материалов: пат. на полезную модель № 140048 Рос. Федерация; МПК G01H 29/00 / Зинкин В.Н., Шешегов П.М., Драган С.П., Богомолов А.В.; заявл. 28.01.2014; опубл. 27.04.2014.
27. Шешегов П.М. Методические подходы к оценке эффективности экстрауральных средств защиты // Защита от повышенного шума и вибрации: сб. докл. Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. – СПб., 2015. – С. 562–565.
28. Шешегов П.М., Зинкин В.Н., Дворянчиков В.В., Миронов В.Г. Нейросенсорная тугоухость шумовой этиологии: диагностика, лечение и профилактика // Вестн. Рос. воен.-мед. акад. – 2015. – № 2. – С. 60–66.

USE OF BONE CONDUCTION MECHANISMS FOR SUBJECTIVE EVALUATION OF SOUND-ABSORBING PROPERTIES OF MATERIALS

V.V. Kharitonov, A.Y. Litvinova (Akhtubinsk, Russian Federation), V.N. Zinkin, P.M. Sheshegov (Shchelkovo, Russian Federation), L.P. Slivina (Volgograd, Russian Federation)

The purpose of the work is to theoretically and experimentally justify the use of bone conduction for the subjective evaluation of sound-absorbing properties of materials. Existing proteosome, in most cases, is to block the air pathways of sound to the cochlea. Their efficiency does not exceed the sound level of more than 100–110 dBA. Simplified (objective) and subjective methods have been developed to evaluate the acoustic efficiency of antinoise. In workplaces where the noise level is higher, it is necessary to use an antinoise helmet, which is designed to protect not only the air path of sound, but also the bone and tissue structures of the head. This is due to the need to overlap the bony pathway of sound to the cochlea. There are no standard methods for evaluating the effectiveness of an antinoise helmet. The authors proposed to use an audiometer to assess sound absorption. The method of tonal audiometry conducted experimental studies to assess the sound absorption of samples from various materials, packages of 2–4 layers of materials and antinoise helmet. The results obtained

practically corresponded to the data obtained using the methods used to evaluate the acoustic efficiency of the antinoise helmet. Using mathematical methods, the effectiveness of the method proposed by the authors on the basis of a tonal audiometer for evaluating the sound absorption of materials and extraaural means of noise protection is proved. Evaluation of sound absorption using bone conduction in tonal audiometry can be used as a subjective method for evaluating the acoustic effectiveness of extraaural personal noise protection equipment.

Key words: noise, hearing organ, air and bone sound conductivity, sound absorption, mechanisms, individual means of protection against noise.

Получено 21 декабря 2020