

# Облик информационно-измерительной системы квалиметрии средств индивидуальной защиты от авиационного шума

С. П. Драган<sup>1</sup>, А. В. Богомолов<sup>2</sup>, С. В. Дроздов<sup>3</sup>

*Государственный научный центр РФ – Федеральный медицинский  
биофизический центр им. А.И. Бурназяна ФМБА России*

<sup>1</sup>s.p.dragan@rambler.ru, <sup>2</sup>a.v.bogomolov@gmail.com, <sup>3</sup>drozdovsv87@gmail.com

**Аннотация.** Исходя из потребностей практики обеспечения акустической безопасности профессиональной деятельности инженерно-технического состава авиации, специфических особенностей авиационного шума, опыта разработки и эксплуатации средств индивидуальной защиты от авиационного шума разработан облик информационно-измерительной системы квалиметрии средств индивидуальной защиты от авиационного шума.

**Ключевые слова:** индивидуальная защита от шума; информационно-измерительная система; квалиметрия противошумов; авиационный шум

## I. ВВЕДЕНИЕ

Отставание темпов развития средств и технологий шумозащиты от темпов роста мощности авиационных двигателей обуславливает актуальность проблемы шума в авиации. В настоящее время уровни авиационных шумов выросли до 140 дБ, а их спектр существенно расширился и включает инфразвук и высокие частоты [1, 2]. Однако средства и способы шумозащиты не приобрели достаточной эффективности [3, 4]. Неблагоприятные реакции организма, возникающие в ответ на действие шумов большой интенсивности, оцениваются как суммарный эффект, обусловленный влиянием шума на слуховой аппарат человека, на механорецепторы кожной поверхности тела, на систему кровообращения и на внутренние органы [1, 2, 5].

Применяемая на практике система нормативно-технических документов определяет порядок получения объективной и субъективной оценки акустической эффективности шумозащитных наушников для диапазона частот от 63 Гц до 8 кГц (не включая инфразвуковой диапазон частот). Однако соответствующие документы, регламентирующие методы определения акустической эффективности шумозащитных шлемов и костюмов (жилетов) отсутствуют.

Цель работы – обоснование облика информационно-измерительной системы квалиметрии средств индивидуальной защиты (СИЗ) от авиационного шума, обеспечивающей корректное определение их акустической эффективности во всем диапазоне частот авиационного шума.

## II. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объективные методы исследования акустической эффективности СИЗ требуют применения испытательной камеры, обеспечивающей формирование диффузного поля с жестко заданными характеристиками. При этом простое расширение частотного диапазона исследований невозможно. Например, для исследования акустической эффективности СИЗ на частотах от 125 Гц требуемый объем испытательной камеры составляет 10 кубических метров. Но для аналогичных исследований на частоте 2 Гц испытательная камера должна иметь объем несколько десятков тысяч кубических метров - это уже экономически нецелесообразно. Поэтому следует создать другие акустические условия, позволяющие корректно осуществлять процедуру измерений.

Субъективные методы определения акустической эффективности СИЗ основаны на анализе ощущений испытуемого и смещении порогов слышимости [1]. Для низкочастотного и инфразвукового диапазонов частот реализовать такие условия весьма проблематично, из-за «завала» кривой слышимости человека на этих частотах. Обычный человек не слышит звук инфразвукового диапазона, поэтому квалиметрию СИЗ субъективным методом достоверно осуществить достаточно сложно. Следовательно, для определения реакций организма следует разработать такие методы, которые объективно и достоверно регистрируют физиологические сдвиги в органе слуха при наличии и без СИЗ (наушников, шлемов, касок, вкладышей и т. п.). Более того, такая система регистрации физиологических сдвигов в организме человека позволит объективизировать процедуру получения субъективной оценки испытуемыми и шумозащитных шлемов и костюмов [1, 6].

Для шумозащитных шлемов и костюмов также не разработано общепринятых методов определения их акустической эффективности. Существующие методические приемы, основанные на сопоставлении результатов измерений в падающей и прошедшей за СИЗ волне, обладают некорректностью. Во-первых, измерения непосредственно перед СИЗ регистрируют суммарное поле, образованное падающей и отраженной от СИЗ волнами. Характеристики отраженной волны на разных частотах могут существенно отличаться. Амплитуда отраженной волны также зависит от угла падения на поверхность СИЗ. Во-вторых, невозможно подобрать два преобразователя давления (микрофона), у

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации по государственной поддержке ведущих научных школ Российской Федерации (НШ-122.2022.1.6)

которых круговая диаграмма направленности будет идентична. Разница может достигать до 5 дБ, в зависимости от угла падения проходящей волны [7]. Эти обстоятельства не позволяют использовать предложенную ранее методику измерений для определения оценки акустической эффективности шумозащитных шлемов и костюмов. А для использования одно микрофонной техники измерений, при которой акустическая эффективность определяется по разнице показаний одного микрофона с и без СИЗ, необходимо соблюдать требования идентичности акустических условий и равенства уровней звукового давления (УЗД) в падающей волне. Для этих целей необходим специальный испытательный стенд с воспроизводимыми и контролируруемыми акустическими условиями – информационно-измерительная система квалитрии СИЗ от авиационного шума.

### III. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Наличие широкополосного авиационного шума с усилением инфразвуковых компонент ставит новые задачи и перед субъективными методами определения акустической эффективности СИЗ [1, 8, 9]. Испытания противозвучных наушников субъективными методами основаны на определении величины смещения порогов слуха методом тональной аудиометрии. Метод тональной аудиометрии также успешно используется при определении эффективности шумозащитных шлемов субъективными методами (для шумозащитных костюмов, жилетов и комбинезонов ранее применяли метод измерения вибросензитивности в области живота).

Однако для инфразвукового диапазона кривая равной громкости уха человека имеет «завал» на 40-60 дБ, что делает невозможным использование метода тональной аудиометрии для субъективного определения эффективности наушников и шлемов. А метод измерения вибросензитивности не отражает физиологических реакций критических органов – дыхательной системы организма, которая подвергается воздействию вследствие звуковой вибрации грудной клетки. Поэтому необходимы объективные методы определения физиологических реакций критических систем организма, включая орган слуха и орган дыхания [1]. При этом определение физиологических реакций организма необходимо осуществлять, используя диагностический комплекс анализа акустического рефлекса органа слуха, и диагностический комплекс анализа состояния дыхательной системы. Эти методы должны быть включены в состав методического обеспечения информационно-измерительных систем квалитрии СИЗ.

Проведенные исследования показали, что *информационно-измерительная система квалитрии СИЗ от авиационного шума* должна включать пять компонентов.

1. Система генерации испытательного сигнала, содержащая блок генерации розового шума для испытаний в диффузном поле на частотах 63 Гц – 8 кГц и блок генерации низкочастотных и инфразвуковых сигналов для испытаний в поле плоской волны на частотах 25 Гц – 125 Гц.

2. Акустическая камера для формирования диффузного поля (63 Гц – 8 кГц) и акустический интерферометр, обеспечивающий формирование плоской бегущей инфразвуковой и низкочастотной волны (2 Гц – 125 Гц).

3. Измерительная система для контроля стабильности параметров воздействия, включающая четырехканальную измерительную систему формирования диффузного поля.

4. Измерительная система контроля условий формирования испытательного сигнала, содержащая двухканальную измерительную систему контроля условий формирования плоской бегущей инфразвуковой и низкочастотной волны.

5. Манекены для испытаний любых образцов СИЗ с встроенной измерительной системой, манекены для испытаний наушников с возможностью измерений в подчашечном пространстве, манекены для испытаний шлемов с возможностью измерений в подшлемном и подчашечном пространстве и манекены для испытаний шумозащитных костюмов с возможностью много канальных измерений на спине, груди и животе.

*Система генерации розового шума* включает акустический излучатель типа додекаэдра с усилителем и предназначена для формирования акустического поля с плавно убывающей спектральной плотностью сигнала от максимума на частоте 63 Гц до минимума на частоте 8 кГц. Спектральная плотность мощности розового шума обратно пропорциональна частоте, то есть он является равномерно убывающей в логарифмической шкале частот. Спектральная плотность розового шума по сравнению с белым шумом затухает на 3 децибела на каждую октаву.

*Блок генерации низкочастотных и инфразвуковых сигналов* состоит из комплекта низкочастотных громкоговорителей с усилителем низких частот, предназначен для формирования поля плоской волны с равномерным распределением спектральных компонент в диапазоне частот 2–125 Гц.

При испытаниях в условиях диффузного поля регламентируется процедура измерений и требования к условиям проведения испытаний. УЗД должны быть измерены при шести положениях ненаправленным микрофоном [7]. Ориентация микрофона должна поддерживаться в одном и том же положении при каждом измерении. Указанные шесть точек измерений должны находиться на расстоянии 150 мм от эталонной точки по осям, проходящим прямо вперед, слева направо и сверху вниз. Допуски УЗД должны составлять не более 2,5 дБ по отношению к эталонной точке. Разница в измеренных УЗД между положениями справа и слева не должна превышать 3 дБ. Кроме того, при испытаниях на среднегеометрических частотах выше 500 Гц УЗД в эталонной точке не должны превышать 5 дБ для любых двух направлений измерения энергии падающего звука.

В процессе работы на основе использования двухмикрофонной техники измерений, разработан математический аппарат и создано программное обеспечение по автоматической регистрации параметров звукового поля в заданном частотном диапазоне от 2 Гц до 8 кГц, включающих определение УЗД, амплитуды падающей волны, частотно-зависимого коэффициента

поглощения или отражения. Этот набор характеристик позволяет полностью контролировать условия формирования звукового поля, определять коэффициент бегущей волны и амплитуду отраженной волны.

Устройство для проведения акустических испытаний вносит искажение в формирующееся звуковое поле и изменяет параметры испытательного сигнала. Для учета этих эффектов разработана специальная программа, где, по измерениям УЗД в двух точках, расположенных до испытуемого образца, и разности фаз между микрофонами, расчетным путем определяется УЗД в третьей точке. Третья точка находится в плоскости расположения центрального микрофона встроенного в устройство для проведения акустических испытаний. Таким образом, сопоставляя результаты расчетов с результатами измерений на центральном и дополнительном микрофоне, оценивается влияние самого устройства и разрабатываемых СИЗ, и с учетом этих поправок определяется акустическая эффективность.

В процессе испытаний сначала регистрируют, обрабатывают и запоминают сигналы с микрофонов в отсутствие разрабатываемых СИЗ. Затем над центральным микрофоном устанавливают испытуемый образец СИЗ и измерения повторяют. Если разность уровней сигнала для незащищенного (дополнительного) микрофона в каждой из тринадцати октавных полос не превышает 2 дБ, то воздействующий на средство сигнал считается неизменным, а разность уровней сигналов в октавных полосах, зарегистрированных центральным микрофоном, определяет соответствующую акустическую эффективность испытуемого защитного средства в дБ. Процедуру повторяют три раза с соответствующим усреднением.

Испытательное звуковое поле должно отвечать следующим требованиям. УЗД сигнала должен быть подобран таким образом, чтобы измеренный микрофоном с наложенным противошумом звук превышал пороговый шум не менее чем на 10 дБ. УЗД в двух точках, близких к центрам торцов устройства для испытаний, не должны отличаться более чем на 2 дБ при любом тестовом сигнале по частоте несущей в пределах заданного частотного диапазона при угле падения  $0^\circ$  по отношению к микрофону в каждом положении. При несоблюдении этого условия используют поправки, определенные методом двух микрофонов.

Для проверки стабильности испытательного сигнала в процессе измерений каждый раз определяли разность уровней сигнала для незащищенного (дополнительного) микрофона в каждой из тринадцати октавных полос в течение 30 с. Эта разница не должна превышать 1 дБ, при таких условиях в акустическом интерферометре формируется стабильный испытательный сигнал, а разность уровней сигналов в октавных полосах, зарегистрированных центральным микрофоном, определяет соответствующую акустическую эффективность испытуемого защитного средства (в дБ).

*Акустический интерферометр* состоит из 9 секций внешним размером (высота-ширина-глубина) 1200×1000×750 мм. Общая длина интерферометра составляет 6,75 м. Каркас отдельных секций изготавливается из металлических уголков, выполняющих функцию ребра жесткости.

Дополнительно на каждой боковой поверхности секции, перпендикулярно максимальному размеру крепится ребро жесткости. Каркас секции обшит слоеной фанерой, а снаружи – шумоизолирующими блоками, изготовленными из базальтового волокна. Секции стыкуются между собой болтовыми соединениями через резиновую прокладку, образуя герметичный волновод. Секция излучателей с громкоговорителями установлена на торцевой поверхности.

В акустическом интерферометре реализованы условия для формирования диффузного акустического поля с розовым шумом диапазоне частот от 63 Гц до 8 кГц и для формирования плоской бегущей инфразвуковой и низкочастотной волны в диапазоне частот от 2 Гц до 125 Гц. Система управления акустическим интерферометром состоит из: цифроаналогового преобразователя; программного обеспечения; блока формирования широкополосного, тонального и сигнала специальной формы; блока переключения каналов; генератора сигналов розового шума; третьоктавных фильтров; источника звука и усилителей для формирования тестового сигнала; компьютера со специализированным программным обеспечением и модулем оценивания результирующего значения А-корректированных УЗД при использовании СИЗ. Специализированное программное обеспечение включает программные модули ввода (аналогово-цифровой преобразователь) и обработки данных (акустические характеристики, база данных).

Требования к испытательному сигналу, формируемому в акустическом интерферометре:

а) УЗД в двух точках, представляющих положения, обычно занятые центрами торцов устройства для испытаний, не должны отличаться более чем на 2 дБ при любом тестовом сигнале по частоте несущей в пределах определенных частот при  $0^\circ$  падения по отношению к микрофону в каждом положении.

б) Звуковое поле плоской бегущей волны должно соответствовать по качеству целям ГОСТ Р 12.4.213-99, с контролем коэффициента стоячих волн.

в) Уровень фонового шума в месте проведения испытания, измеренный в полосе в одну треть октавы, должен составлять уровень, по крайней мере, на 10 дБ меньше, чем УЗД испытательного сигнала, причем измерительный микрофон должен быть помещен в эталонной точке.

*Измерительная система для контроля стабильности параметров воздействия* включает четыре микрофонных канала для одновременной регистрации параметров поля, необходимых для контроля характера диффузного поля.

*Измерительная система для контроля формирования испытательного сигнала* включает двухканальную интенсивметрическую измерительную систему контроля условий формирования плоской бегущей инфразвуковой и низкочастотной волны.

*Манекены для испытаний СИЗ* разрабатываются с учетом специфики образцов СИЗ.

Так в манекене для испытаний противошумов (наушников) имеется встроенная одноканальная измерительная система: измерительный микрофон

установлен в подчашечном пространстве. Манекен изготовлен из немагнитного металла цилиндрической формы с горизонтальной осью  $145 \pm 1$  мм между центрами торцевых концов. Диаметр цилиндра составляет  $135 \pm 5$  мм. Углы каждого из обоих торцов выполнены наклонными и имеют угол  $4,5^\circ \pm 0,5^\circ$  по отношению к вертикальной плоскости. Микрофон расположен таким образом, что его центральная ось совпадает с центральной осью цилиндра и с центром его диафрагмы в плоскости одного из торцов по центральной линии цилиндра. Микрофон закрывается герметичным колпачком, устанавливаемым в плоскости на торцевой поверхности цилиндра.

Манекен для испытаний шумозащитных шлемов со встроенной двухканальной измерительной системой в подшлемном и подзаглушечном пространстве включает микрофон, установленный заподлицо на поверхности теменной части манекена. Внутренняя полость манекена плотно заполнена наполнителем, так чтобы исключить наличие резонансных полостей.

Манекен для испытаний шумозащитных костюмов содержит встроенную многоканальную систему регистрации параметров акустического воздействия с микрофонами, установленными на спине, груди и животе.

Однако если для противושумных наушников, касок и шлемов существуют стандартизированные методики определения акустической эффективности, то для шумозащитных костюмов таких методик нет. Их необходимо разработать, причем для всего заданного диапазона частот. Известные методики, применяемые на практике, позволяют производить измерения акустической эффективности только в слышимом диапазоне частот (125 Гц – 8 кГц). Поэтому необходимо адаптировать методики к требованиям практики, а также создать новые стенды и манекены.

Для корректного сравнения защитных свойств двух образцов СИЗ разработан метод, учитывающий специфические характеристики авиационных шумов во всем нормируемом диапазоне частот [12]. Этот метод дополняет известные стандартизированные методы и позволяет определять акустическую эффективность любых образцов СИЗ во всем диапазоне частот, заданном санитарными нормами (от 2 Гц до 8 кГц).

Последующие исследования акустической эффективности СИЗ (противошумы, шлемы и шумозащитные костюмы) продемонстрировали высокое качество квалитрии.

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный облик информационно-измерительной системы квалитрии СИЗ от авиационного шума обеспечивает корректное решение комплекса задач определения соответствия СИЗ предъявляемым требованиям на всех этапах их жизненного цикла.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Солдатов С.К., Зинкин В.Н., Богомолов А.В., Драган С.П., Кукушкин Ю.А. Фундаментальные и прикладные аспекты авиационной медицинской акустики. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2019. 216 с.
- [2] Zhdanko I.M., Zinkin V.N., Soldatov S.K., Bogomolov A.V., Sheshegov P.M. Fundamental and applied aspects of preventing the adverse effects of aviation noise // *Human Physiology*. 2016. Vol. 42. No 7. Pp. 705-714. DOI: 10.1134/S0362119716070227
- [3] Рыжиков М.А., Яковенко Н.И., Яковлева А.А., Климов М.Р. Оценка шумозаглушающей эффективности современных средств индивидуальной защиты органа слуха военнослужащих // *Известия Российской военно-медицинской академии*. 2020. Т. 39. № S3-1. С. 151-154.
- [4] Драган С.П., Солдатов С.К., Богомолов А.В., Дроздов С.В., Поляков Н.М. Оценка акустической эффективности средств индивидуальной защиты от экстрааурального воздействия авиационного шума // *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2013. Т. 47. № 5. С. 21-26.
- [5] Богомолов А.В., Драган С.П., Зинкин В.Н., Алехин М.Д. Информационная система мониторинга экологической безопасности по акустическому фактору // *Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям*. 2019. Т. 1. С. 313-316.
- [6] Dragan S.P., Bogomolov A.V. A method for acoustic impedance spectroscopy of the respiratory tract // *Biomedical Engineering*. 2016. Vol. 49. No 5. Pp. 278-282. DOI: 10.1007/s10527-016-9548-8
- [7] Богомолов А.В., Драган С.П., Зинкин В.Н., Ларкин Е.В. Анализ неопределенности акустических измерений при различных углах падения акустических волн на измерительный микрофон // *Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям*. 2020. Т. 1. С. 268-272.
- [8] Харитонов В.В., Жданько И.М., Филатов В.Н., Шешегов П.М. Требования к средствам индивидуальной защиты от шума для специалистов инженерно-авиационной службы государственной авиации // *Проблемы безопасности полетов*. 2020. № 6. С. 12-28.
- [9] Ушаков И.Б., Богомолов А.В., Драган С.П., Солдатов С.К. Методологические основы персонализированного акустического мониторинга // *Безопасность труда в промышленности*. 2020. № 10. С. 33-39. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-10-33-39
- [10] Драган С.П., Богомолов А.В. Метод оценивания акустической безопасности человека // *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*. 2021. Т. 13. № 1. С. 259-278. DOI: 10.12731/2658-6649-2021-13-1-259-278
- [11] Dragan S.P., Drozdov S.V., Zinkin V.N., Bogomolov A.V., Soldatov S.K. Efficiency of acoustic noise protection // *Biomedical Engineering*. 2013. Vol. 47. № 3. Pp. 150-152.
- [12] Драган С.П. Метод расчета интегральной оценки акустической эффективности средств индивидуальной защиты от шума // *Безопасность жизнедеятельности*. 2013. № 2 (146). С. 10-17.