

Интеллектуальная информационно-измерительная система исследования акустического рефлекса

С. П. Драган¹, И. В. Оленина², А. В. Богомолов³
Государственный научный центр РФ – Федеральный
медицинский биофизический центр им. А.И.Бурназяна
ФМБА России

¹s.p.dragan@rambler.ru, ²a.v.bogomolov@gmail.com,
³i.olenina@yandex.ru

Е. В. Ларкин

Тульский государственный университет
elarkin@mail.ru

Аннотация. Представлена интеллектуальная информационно-измерительная система ипсилатерального исследования акустического рефлекса, обеспечивающая автоматизированное формирование тестового полигармонического сигнала и управление амплитудой стимулирующего сигнала, определение резонансных характеристик наружного слухового прохода при помощи модифицированного метода двух микрофонов и расчет частотно зависимых коэффициентов отражения, коэффициенты поглощения и компоненты акустического импеданса наружного слухового прохода.

Ключевые слова: акустический рефлекс; биомедицинская инженерия; импеданс наружного слухового прохода; двухмикрофонный метод

I. ВВЕДЕНИЕ

Для дифференциальной диагностики многих заболеваний органа слуха информативным является исследование акустического рефлекса (АР), который характеризуется порогом, определяемым самой низкой интенсивностью звукового сигнала, который вызывает непроизвольное сокращение барабанной или стременной мышцы [1]. Этот порог зависит от индивидуальных особенностей и типа стимула: у взрослого человека с нормальным слухом для раздражителя в виде чистого тона стимулов порог АР находится в диапазоне 80–85 дБ [1–3].

Исследование АР основывается на измерении акустического импеданса наружного слухового прохода (НСП). С этой целью применяют акустическую импедансометрию и многочастотную тимпанометрию, недостатками которых являются невозможность нивелирования методических погрешностей, обусловленных искусственно создаваемым повышенным давлением в НСП [4, 5].

Для устранения указанных недостатков разработана интеллектуальная информационно-измерительная система ипсилатерального исследования АР, позволяющая определить импедансные характеристики НСП по результатам анализа прямых и отраженных полигармонических звуковых сигналов.

Цель работы – создание аппаратуры для объективного определения порога АР с ориентацией на применение при проведении масштабных скрининговых исследований представителей социо-профессиональных групп населения, профессиональная деятельность которых сопряжена с воздействием транспортного, промышленного и производственного шума [6–9].

II. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Теоретической основой разработанной интеллектуальной информационно-измерительной системы ипсилатерального исследования АР является модифицированный метод двух микрофонов [10–13]. В волноводе, герметично соединенном с НСП, формируются звуковые волны. При падении звуковой волны на НСП происходит вибрация барабанной перепонки (БП), вызывающая АР. Характеристики отраженной звуковой волны определяются состоянием БП: отраженные звуковые колебания имеют меньшую амплитуду и сдвинуты по фазе относительно падающей звуковой волны. Частотно-зависимый сдвиг фаз и соотношение амплитуд давлений в разных сечениях волновода зависит от геометрических характеристик НСП и от положения БП, а также от её жёсткости. Путем измерения амплитуд давления в двух точках волновода и сдвига фаз между ними на каждой частоте, можно вычислить импедансные частотно-зависимые характеристики НСП, определить резонансную частоту и, в зависимости от уровня стимулирующего звукового сигнала, оценить порог АР.

Аппаратная часть комплекса включает волновод, один конец которого оборудован перфорированной панелью и трубкой с ушным вкладышем для герметичного сочленения с НСП, а другой конец оборудован громкоговорителем, соединенным с генератором полигармонического сигнала звуковой частоты и усилителем-формирователем стимулирующего сигнала переменной амплитуды. В волновод заподлицо его поверхности герметично встроены два стандартных полудюймовых конденсаторных микрофона с предусилителями напряжения и блоком питания. При выборе конструктивных размеров волновода учитывали физиологические особенности НСП.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации по государственной поддержке ведущих научных школ Российской Федерации (НШ-2553.2020.8)

Герметичное сочленение волновода с НСП достигается за счет использования силиконовых ушных вкладышей, внутренний диаметр которых составляет 3 мм. Поэтому на границе «волновод – ушной вкладыш» обязательно присутствует скачок сечения. Устройство соединения волновода с НСП и БП можно представить как резонатор Гельмгольца: волновод заканчивается перфорированной панелью с диаметром отверстия 3 мм, горлом резонатора Гельмгольца является узкая трубка длиной 8 см с внутренним диаметром 3 мм, один конец которой соединен с перфорированным отверстием в волноводе, а на другом конце крепится ушной вкладыш. Объемом резонатора Гельмгольца является НСП, заканчивающийся БП. При проявлении АР БП натягивается, изменяя свое положение (и соответственно объем НСП), и тем самым изменяя собственную резонансную частоту и другие акустические характеристики резонатора Гельмгольца, на основании чего оценивается порог АР [10–14].

Расчет резонансной частоты НСП, как резонатора Гельмгольца осуществляется по известным формулам по значениям объема НСП, площади и длины горла резонатора [10–14].

Волновод изготовлен в виде металлической трубы с квадратным внешним сечением 28×28 мм. При помощи переходника, выточенного в виде концентратора, волновод состыкован с громкоговорителем диаметром 46 мм. Над громкоговорителем установлена заглушающая коробка цилиндрической формы. Длина волновода выбрана равной 95 мм, размеры внутреннего поперечного сечения 11×8 мм. К окончанию волновода при помощи накидной шайбы пристыковывается горло резонатора с силиконовым ушным вкладышем.

В двух точках боковой поверхности волновода в специальные гнезда установлены измерительные микрофоны конденсаторного типа. Гнездо первого микрофона расположено на расстоянии 26 мм от входа в волновод – такое удаление от точки перехода сечений (более трех калибров) позволяет пренебречь фазовыми искажениями звукового поля. Гнездо второго микрофона расположено на расстоянии 50 мм от первого и 41 мм от перфорированной панели (более 10 калибров от горла резонатора), что минимизирует возможность фазовых искажений звукового поля.

Измерительные микрофоны соединены с компьютером посредством аналого-цифрового преобразователя: НСП пациента посредством стандартного ушного вкладыша герметично соединяется с волноводом, другая часть волновода оснащена миниатюрным громкоговорителем, имеется усилитель формирователь звуковых частот; цифро-аналоговый преобразователь для формирования тестового и стимулирующего сигналов, два микрофонных тракта, устанавливаемые заподлицо боковой стенки волновода и аналого-цифровой преобразователь для подачи электрических сигналов с микрофонов в компьютер.

При помощи ЦАП посредством программного обеспечения задаются частотные и амплитудные характеристики тестового и стимулирующего сигнала.

Тестовый сигнал представляет собой набор тональных сигналов в частотном диапазоне от 330 до 570 Гц с шагом 30 Гц. Формирование полигармонического сигнала осуществляется методом прямого и обратного комплексного преобразования Фурье (с предварительным созданием комплексного аналитического сигнала с помощью преобразования Гильберта) [15–17].

Для автоматизации процесса измерения импеданса во всем заданном диапазоне частот в волноводе необходимо сформировать звуковое поле, обеспечивающее идентичность зондирующего сигнала для всех процедур измерения, причем спектр зондирующего сигнала не должен содержать резких выбросов (то есть должен быть сглаженным) [18, 19]. С этой целью программным образом создан генератор полигармонического сигнала в заданном диапазоне частот. Для устранения явления биения (непрерывного циклического изменения уровня звукового давления, обусловленного арифметическим суммированием большого числа гармоник) введены фазы сигнала на каждой его гармонике. Фазы каждой гармоники полигармонического сигнала устанавливаются случайным образом в диапазоне от 0 до 360°.

Таким образом, генератором полигармонического сигнала в волноводе формируется стационарное звуковое поле с приблизительно равными амплитудами во всем заданном диапазоне частот. Выравнивание амплитуд полигармоник обеспечивается за счет использования специального программного обеспечения коррекции амплитудно-частотной характеристики источника звука в заданном диапазоне частот. Используемый алгоритм позволяет уменьшить межчастотные искажения, а также эффект эха. Время одного измерения резонансных характеристик НСП составляет 10 с. Уровни полигармоник находятся в диапазоне 57–69 дБ. Общий уровень полигармонического сигнала не превышает 76 дБ. Уровень полигармонического сигнала установлен с учетом требования, чтобы не вызывать АР у обследуемых без патологий органа слуха.

Стимулирующий сигнал подается ипсилатерально – в то же ухо, в котором измеряется импеданс НСП. В качестве стимулирующего сигнала используется тональный сигнал на частоте 1 кГц. В процессе регистрации АР уровень стимулирующего сигнала изменяется в диапазоне от 70 дБ до 98 дБ ступенчато с шагом 7 дБ, одновременно осуществляется процесс измерения импедансных характеристик НСП тестирующим сигналом. Величина шага и диапазон изменения амплитуды стимулирующего сигнала задаются и регулируются с помощью программного обеспечения.

Переход с одного уровня громкости стимулирующего сигнала на другой реализуется в течение 1 с помощью алгоритма мягкого перехода, исключающего щелчки. Вся процедура регистрации АР на одном ухе занимает не более 1 мин. Для одновременной подачи на громкоговоритель тестирующего и стимулирующего сигнала используется стереовыход звуковой карты персональной ЭВМ: генерация стимулирующего сигнала производится на

левый, а измерительного сигнала – на правый канал звуковой карты.

Применение модифицированного метода двух микрофонов предполагает использование микрофонных трактов, обладающих стабильной фазочастотной характеристикой и отсутствием фазового смещения между каналами, поэтому АПК оснащен специальным калибровочным устройством фазочастотной градуировки микрофонов [10–14].

Измерение акустического импеданса осуществляется на основе модифицированного метода двух микрофонов, обеспечивающего определение импеданса НСП с БП в широком частотном диапазоне. При помощи двух измерительных конденсаторных микрофонов, установленных стационарно на боковой поверхности волновода, измеряют уровни звукового давления и разность фаз между ними на каждой частоте. По этим данным на основании точного решения уравнения распространения падающей и отраженной от препятствия звуковой волны рассчитывают комплексный коэффициент отражения и компоненты импеданса НСП, размещенного в конце волновода.

Для реализации метода необходимо обеспечить стабильность амплитудно-фазочастотных характеристик микрофонных измерительных трактов: отклонения между фазочастотными характеристиками не должны превышать $0,3^\circ$, а между амплитудно-частотными – $0,2$ дБ. Это требование достигается путем учета амплитудно-фазочастотной градуировки, выполняемой на основании таблицы калибровочных коэффициентов.

Расчет резонансных характеристик НСП осуществляется в соответствии с [10–14]. Компоненты импеданса резонатора Гельмгольца через коэффициент и угол отражения для каждой частоты рассчитывают в соответствии с [10–14].

При монохроматическом зондировании БП необходимо провести измерения во всем информативном диапазоне частот, плавно изменяя частоту зондирующего сигнала. Такая процедура исследования АР одного уха может занять несколько минут. Поэтому типовой алгоритм усовершенствован в интересах сокращения времени исследования до нескольких секунд.

С целью расширения возможностей метода для измерений звуковых полей полигармонического сигнала, представим мгновенные значения амплитуд звукового давления в измерительных точках в виде решений уравнения Эйлера (уравнения распространения плоской звуковой волны) с учетом временного множителя и значений фаз для каждого микрофона [10–14, 18, 19].

Программное обеспечение включает драйвер АЦП, программу AcousticReflex, библиотеку Lusbapi.dll. Программная часть комплекса реализует обработку информации, получаемой с измерительных микрофонов, обеспечивает управление исследованиями и документирование их результатов. Обработывая информацию с измерительных микрофонов для каждой частоты полигармонического сигнала, определяют

амплитуду (уровни звукового давления) и разность фаз сигналов, регистрируемых измерительными микрофонами в двух точках волновода. По результатам измерений вычисляют импедансные характеристики НСП для каждой частоты в соответствии с [10–14].

Процедура измерений проводится следующим образом:

1) АЦП считывает сигналы по двум каналам. Затем на сигнал накладывается стандартное окно FlatTop и выполняется дискретное преобразование Фурье получившегося сигнала по алгоритму быстрого преобразования. Полученный спектр переводится в полярные координаты, амплитуда спектра умножается на чувствительность микрофона, а амплитуда и фаза спектра сигнала со второго микрофона умножается на калибровочные значения, рассчитанные с применением линейной аппроксимации (метода наименьших квадратов) таблицы калибровочных коэффициентов;

2) Измеренные амплитуды и фазы усредняются с предыдущими значениями для конкретной частоты по средним арифметическим значениям измеренных точек и отображаются на графиках во время и после измерения. Вычисляются параметры усредненных сигналов на выбранных частотах.

3) Рассчитанные импедансные характеристики НСП выводятся на график в зависимости от частоты и сохраняются в базе данных.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование АР проводилось у сорока испытуемых (37 мужчин и 3 женщины), включая опытную и контрольную группу (10 человек). В опытной группе испытуемые подвергались сверхнормативному звуковому воздействию, моделирующему авиационный шум с УЗД, равным 125 дБ, в течение 10 мин. У каждого человека было проведено по три измерения АР на каждом ухе: до, сразу после воздействия и через сутки после воздействия.

При обработке полученных данных часть результатов была исключена из-за выявленных технических сбоев при регистрации АР. В итоге для анализа использовано 166 измерений характеристик АР – 83 на левом и 83 на правом ухе. Анализ данных проводился без разделения на правое и левое ухо, поэтому все результаты обработки основаны на общем количестве обследованных ушей.

Испытуемых усаживали на стул, в его НСП устанавливали ушной вкладыш, герметично сочлененный с концом волновода. С выхода генератора сигналов звуковой частоты в громкоговоритель подавали полигармонические звуковые сигналы с частотным диапазоном от 330 Гц до 570 Гц, образованные набором тональных сигналов с шагом по частоте 30 Гц. Процедура одного исследования составляла не более одной минуты. Затем ушной вкладыш устанавливали в другое ухо и выполняли те же действия. В результате для каждого уха получены значения импедансных характеристик НСП, включая данные о резонансной частоте, о максимуме коэффициента поглощения и зависимости активной компоненты импеданса от частоты.

В опытной группе увеличенный порог АР до опытов зарегистрирован у 29 % испытуемых, после воздействия количество испытуемых с увеличенным порогом возросло до 57 %. Затем, к концу срока наблюдения вернулось к первоначальному состоянию (29 % испытуемых с порогом АР выше 84 дБ). В контрольной группе также у части добровольцев (23 %) зарегистрировано кратковременное увеличение порога АР, который затем вернулся в исходное состояние (0 %).

Зарегистрированное изменение порога АР у некоторой части испытуемых сохраняющееся сразу после воздействия, свидетельствует о перспективах использования метода исследования АР и реализующего ее аппаратно-программного комплекса для оценки условий труда персонала, профессиональная деятельность которого сопровождается воздействием высокоинтенсивного транспортного, промышленного и производственного шума.

Возможность управлять частотным диапазоном используемых полигармонических сигналов и шагом образующих их тональных сигналов обеспечивает возможность исследования АР с любым шагом в любом поддиапазоне звукового диапазона частот.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная интеллектуальная информационно-измерительная система исследования АР продемонстрировала функциональность и гибкость и может быть применена как для фундаментальных исследований слухового анализатора, так и в прикладных (диагностических) целях, в частности для определения условий безопасного труда по акустическому фактору [6, 7, 16, 20–22].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Dragan S.P., Bogomolov A.V., Kotlyar-Shapiro A.D., Kondrat'eva E.A. A method for investigation of the acoustic reflex on the basis of impedance measurements // *Biomedical Engineering*. 2017. Vol. 51. № 1. Pp. 72-76.
- [2] Прокопенко Л.В., Курьеров Н.Н., Лагутина А.В. Исследование экспозиционно-временной зависимости формирования избыточного риска потерь слуха // *Медицина труда и промышленная экология*. 2019. Т. 59. № 9. С. 728-729. DOI: 10.31089/1026-9428-2019-59-9-728-729
- [3] Dragan S.P., Bogomolov A.V., Kotlyar-Shapiro A.D., Kondrat'eva E.A. Experimental study of displays in contralateral acoustic reflex auditory stimulation // *Doklady Biochemistry and Biophysics*. 2016. Vol. 468. № 1. Pp. 224-225. DOI: 10.7868/S0869565216180250
- [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] Bogomolov A.V., Gan S.P., Zinkin V.N., Alekhin M.D. Acoustic factor environmental safety monitoring information system // *Proceedings of 2019 22nd International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2019*. 22. 2019. Pp. 215-218. DOI: 10.1109/SCM.2019.8903729
- [6] 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
- [7] Ушаков И.Б., Богомолов А.В., Драган С.П., Солдатов С.К. Методологические основы персонализированного гигиенического мониторинга // *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2017. Т. 51. № 6. С. 53-56. DOI: 10.21687/0233-528X-2017-51-6-53-56
- [8] Зинкин В.Н., Солдатов С.К., Кукушкин Ю.А., Афанасьев Р.В., Богомолов А.В., Ахметзянов И.М., Свидовый В.И., Пирожков М.В. Гигиеническая оценка условий труда работников "шумовых" профессиональных авиаремонтных заводов // *Медицина труда и промышленная экология*. 2008. № 4. С. 40-42.
- [9] Прокопенко Л.В., Курьеров Н.Н., Лагутина А.В., Почтарёва Е.С. Определение и оценка группового избыточного (атрибутивного) риска потерь слуха от шума // *Медицина труда и промышленная экология*. 2019. Т. 59. № 4. С. 212-218. DOI: 10.31089/1026-9428-2019-59-4-212-218
- [10] Dragan S.P., Bogomolov A.V. A method for noninvasive diagnostic examination of the tympanic membrane using probing polyharmonic sound signals // *Biomedical Engineering*. 2017. Vol. 50. № 6. Pp. 390-392. DOI: 10.1007/s10527-017-9662-2
- [11] Bogomolov A.V., Dragan S.P. Mathematical justification of the acoustic method for measuring the impedance of the respiratory tract // *Doklady Biochemistry and Biophysics*. 2015. Vol. 464. № 1. Pp. 319-321. DOI: 10.1134/S1607672915050130
- [12] Dragan S.P., Bogomolov A.V. A method for acoustic impedance spectroscopy of the respiratory tract // *Biomedical Engineering*. 2016. Vol. 49. № 5. Pp. 278-282. DOI: 10.1007/s10527-016-9548-8
- [13] Bogomolov A.V., Dragan S.P. A new approach to the study of impedance characteristics of tympanic membrane // *Doklady Biochemistry and Biophysics*. 2015. Vol. 464. № 1. Pp. 269-271. DOI: 10.1134/S1607672915050014
- [14] Bogomolov A.V., Dragan S.P., Erofeev G.G. Mathematical model of sound absorption by lungs with acoustic stimulation of the respiratory system // *Doklady Biochemistry and Biophysics*. 2019. Vol. 487. № 1. Pp. 247-250. DOI: 10.31857/S0869-5652487197-101
- [15] Bychkov E.V., Bogomolov A.V., Kotlovanov K.Yu. Stochastic mathematical model of internal waves // *Bulletin of the South Ural State University. Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software*. 2020. Vol. 13. № 2. Pp. 33-42. DOI: 10.14529/mmp200203
- [16] Богомолов А.В., Драган С.П., Зинкин В.Н., Алёхин М.Д. Информационная система мониторинга экологической безопасности по акустическому фактору // *Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям*. 2019. Т. 1. С. 313-316.
- [17] Iskhakova A.O., Alekhin M.D., Bogomolov A.V. Time-frequency transforms in analysis of non-stationary quasi-periodic biomedical signal patterns for acoustic anomaly detection // *Information and Control Systems*. 2020. Vol. 104. № 1. Pp. 15-23. DOI: 10.31799/1684-8853-2020-1-15-23
- [18] 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.
- [19] Драган С.П., Богомолов А.В., Дроздов С.В., Котляр-Шапиров А.Д. Исследование погрешности акустических измерений при различных углах падения акустических волн на измерительный микрофон // *Датчики и системы*. 2020. № 3 (245). С. 32-38. DOI: 10.25728/datsys.2020.3.4
- [20] 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. № 7. Pp. 705-714. DOI: 10.1134/S0362119716070227
- [21] Dragan S.P., Dроздов 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.
- [22] Прокопенко Л.В., Курьеров Н.Н., Лагутина А.В. Избыточный риск потерь слуха от шума: проблема выбора показателей и критериев // *Вестник оториноларингологии*. 2020. Т. 85. № 6. С. 27-33. DOI: 10.17116/otorino20208506127