

ТРУДЫ ВСЕРОССИЙСКОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Санкт-Петербург — 2020

ТРУДЫ ВСЕРОССИЙСКОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ



ПОЛИТЕХ-ПРЕСС
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

Санкт-Петербург
2020

Труды Всероссийской акустической конференции. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2020. — 723 с.

В сборнике трудов представлены доклады российских и зарубежных специалистов с результатами последних разработок и достижений в области акустики, полученные в ведущих научных центрах России. III Всероссийская акустическая конференция организуется Научным советом РАН по акустике. В докладах отражены новые результаты, полученные в области физической и технической акустики, геоакустики, аэроакустики, архитектурной акустики, акустики живых организмов, акустики океана, а также в смежных с другими науками направлениях, таких как метаматериалы, биомедицинские приложения. Сборник трудов представляет интерес для научных работников и инженеров, специализирующихся в области акустики, а также для специалистов других направлений исследований, использующих акустические данные и методы. Сборник полезен аспирантам и студентам соответствующих специальностей.

Конференция проводилась на средства по гранту 20-02-20004, предоставленного РФФИ.

Конференция проводилась в Санкт-Петербурге с 21 по 25 сентября 2020 г.

Организаторы конференции
Российская академия наук
Научный совет РАН по акустике
Институт океанологии им. П. П. Ширшова Российской академии наук (ИО РАН), Москва

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ СПИСОК

Председатель программного комитета

Руденко Олег Владимирович, д.ф.-м.н., профессор, академик РАН, МГУ, Москва, Россия — председатель

Заместитель председателя программного комитета

Есипов Игорь Борисович, д.ф.-м.н., профессор, РГУ нефти и газа, Москва, Россия

Петронюк Юлия Степановна, к.ф.-м.н., ИБХФ РАН, Москва, Россия — ученый секретарь

Андреев Валерий Георгиевич, к.ф.-м.н., доцент, МГУ, Москва, Россия

Бобровницкий Юрий Иванович, д.ф.-м.н., профессор, ИМАШ РАН, Москва, Россия

Егерев Сергей Викторович, д.ф.-м.н., АКИН, Москва, Россия

Копьев Виктор Феликсович, д.ф.-м.н., профессор, ЦАГИ, Москва, Россия

Кравчун Павел Николаевич, к.ф.-м.н., доцент, МГУ, Москва, Россия

Кузнецова Ирен Евгеньевна, д.ф.-м.н., профессор, ИРЭ РАН, Москва, Россия

Куличков Сергей Николаевич, д.ф.-м.н., в.н.с., ИФА РАН, Москва, Россия

Ляксо Елена Евгеньевна, д.б.н., профессор, СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия

Малеханов Александр Игоревич, к.ф.-м.н., ИПФ РАН, Нижний Новгород, Россия

Миронов Михаил Арсеньевич, к.ф.-м.н., доцент, АКИН, Москва, Россия

Сапожников Олег Анатольевич, д.ф.-м.н., профессор, МГУ, Москва, Россия

Собисевич Алексей Леонидович, д.ф.-м.н., профессор РАН, член-корр. РАН, ИФЗ РАН, Москва, Россия

Хохлова Вера Александровна, д.ф.-м.н., профессор, МГУ, Москва, Россия

Чарная Елена Владимировна, д.ф.-м.н., профессор, СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия

Малый Владимир Владимирович, д.техн.наук, профессор, СПИИ РАН, Санкт-Петербург, Россия

ОРГКОМИТЕТ
«3-Я ВСЕРОССИЙСКАЯ АКУСТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ»

Председатель оргкомитета

Родионов Анатолий Александрович, засл. деятель науки РФ, д-р техн. наук, профессор (ИО РАН, директор Санкт-Петербургского филиала, Санкт-Петербург)

Заместитель председателя оргкомитета

Селезнев Игорь Александрович, д-р техн. наук, доцент (АО «Концерн «Океанприбор», научный руководитель, Санкт-Петербург)

Нигматулин Р. И., науч. руководитель ИО РАН, академик РАН;

Румянцев В. А., науч. руководитель ИНОЗ РАН, академик РАН;

Филатов Н. Н., директор ИВПС КарНЦ РАН, член-корреспондент РАН;

Барбанель Б. А., вице-президент НТО судостроителей им. академика А.Н. Крылова, канд. техн. наук;

Боровская А. В., ведущий специалист СПбФ ИО РАН;

Вертешев С. М., президент Псковский политехнический университет, д-р техн. наук, профессор;

Говорухин В. П., ст. науч. сотруд. Секции прикладных проблем при Президиуме РАН, канд. техн. наук;

Гурьев Ю. В., заведующий Кафедрой механики и гидромеханики ВУНЦ ВМФ ВМА, ВМИИ, д-р техн. наук, профессор;

Гурьев А. В., ст. науч. сотрудник СПбФ ИО РАН, к-т техн. наук;

Долин Л. С., глав. науч. сотрудник ИПФ РАН, к-т физ.-мат. наук;

Емельянов В. Н., зав. кафедрой «Плазмогазодинамика и теплотехника» БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, д-р техн. наук, профессор;

Зенченко С. С., начальник сектора ФГУП «Крыловский научный центр», д-р техн. наук;

Зимин А. В., зав. лабораторией СПбФ ИО РАН, д-р географ. наук, доцент;

Иванов М. П., заведующий лабораторией СПбГУ, канд. биолог. наук, доцент;

Каверинский А. Ю., нач. отделения АО «ЦКБ МТ «Рубин», канд. техн. наук;

Кедрова Е. В., инженер 1-й категории АО «Концерн «Океанприбор»;

Покровская Н. Е., ведущий инженер СПбФ ИО РАН;

Легуша Ф. Ф., зав. кафедрой СПбГМТУ, д-р физ.-мат. наук, профессор;

Максимов В. В., ученый секретарь, АО «Концерн «Океанприбор», д-р техн. наук, профессор;

Малый В. В., ведущий научный сотрудник АО «СПИИРАН – Научно-техническое бюро высоких технологий», д-р техн. наук, профессор;

Погудин К. Г., ученый секретарь АО «Концерн «МПО-Гидроприбор», канд. техн. наук;

Попов В. А., начальник отдела АО «Концерн «Океанприбор», канд. техн. наук, доцент;

Смирнов С. А., помощник Генерального директора по внешнеэкономической деятельности АО «Концерн «Океанприбор», канд. физ.-мат. наук, доцент;

Тукиянен А. Н., АО «СПМБМ «Малахит»;

Черницкий В. В., ст. науч. сотрудник СПбФ ИО РАН, канд. техн. наук, доцент;

Щеголихин В. П., главный научный сотрудник ЦНИИ КиВ ВУНЦ ВМФ ВМА, д-р техн. наук, профессор.

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Гладилин А.В.</i> Академик Николай Николаевич Андреев — основатель Акустического института (к 140-летию со дня рождения)	10
--	----

ФИЗИЧЕСКАЯ АКУСТИКА

<i>Васильев Б.П., Пугачев С.И., Разрезова К.В., Чижов Г.В.</i> Исследование процесса излучения звука в жидкую среду термоакустическими источниками	12
<i>Дембелова Т.С., Макарова Д.Н., Бадмаев Б.Б., Очиров Б.Д.</i> Акустическое исследование нелинейности сдвиговой упругости наносупензий	17
<i>Кирпичников В.Ю., Петров А.А.</i> О потерях колебательной энергии в вязком несжимаемом слое с одной колеблющейся и другой жёсткой границами	23
<i>Козабаранов Р.В., Борисенко В.А., Диденкулов И.Н., Буркацкий А.С., Егоров А.С., Литвинов Д.А., Чернов В.В.</i> Сонолюминесценция в пьезокерамическом резонаторе	29
<i>Котельникова Л.М., Николаев Д.А., Цысарь С.А., Сапожников О.А.</i> Определение упругих свойств твердотельного шара по результатам рассеяния на нем акустического пучка	34
<i>Легуша Ф.Ф., Маслов В.Л., Попов Ю.Н., Чижов В.Ю.</i> Исследования взаимодействия акустической добавки к температуре среды со сферической полостью, взвешенной в жидкости	39
<i>Легуша Ф.Ф., Никущенко Д.В., Попов Ю.Н., Рытов Е.Ю.</i> Механизм дополнительного излучения звука при взаимодействии бегущей звуковой волны с границей жидкость-газ.	45
<i>Максимов А.О., Половинка Ю.А.</i> Деформационные колебания газового пузырька вблизи межфазной поверхности.	50
<i>Микушев В.М., Чарная Е.В.</i> Изменение ядерной спиновой релаксации в условии акустического и магнитного насыщения линии ядерного магнитного резонанса в кристаллах	58
<i>Першин С.М., Брысев А.П., Гришин М.Я., Бункин А.Ф., Леднев В.Н., Клопотов Р.В.</i> Оптическая диагностика профиля акустического давления в фокусе ультразвукового пучка в воде	63
<i>Пирозерский А.Л., Смирнова О.И., Недбай А.И., Шевцова О.Д.</i> Особенности процессов плавления и кристаллизации водных растворов диметилсульфоксида в условиях ограниченной геометрии	67
<i>Симаков И.Г., Базарова С.Б., Гулгенов Ч.Ж.</i> Акустическое исследование диэлектрических свойств адсорбированной воды	73
<i>Теплых А.А., Зайцев Б.Д., Бородин А.А., Семенов А.П.</i> Акустический резонатор с радиальным возбуждающим электрическим полем	78
<i>Чернов Н.Н., Вареникова А.Ю., Лагута М.В.</i> Разработка вычислительного алгоритма визуализации внутренних структур биообъекта на основе построения картины распределения акустического нелинейного параметра.	83
<i>Чуков В.Н.</i> Новые законы и физические явления в диффузном рассеянии волны Рэлея	87

НЕЛИНЕЙНАЯ АКУСТИКА

<i>Гусев В.А.</i> Трансформация акустических волн в слоистых средах с модульной нелинейностью	101
<i>Гусев В.А., Жарков Д.А.</i> Поля радиационных сил в вязкой жидкости	106
<i>Железный В.Б., Ивлиев С.В., Островский Д.Б.</i> Параметрический приемник Зверева-Калачева как устройство для определения и передачи значения звукового давления в воде	111
<i>Климчук Е.Г., Парахонский А.Л.</i> Осцилляции между регулярным и хаотическим режимами движения в фазовом пространстве акустической эмиссии ОСВС.	120
<i>Комаровский К.О., Гусев В.А.</i> Нелинейные волновые явления в узких трубках переменного сечения	128
<i>Коннова Е.О., Юлдашев П.В., Хохлова В.А.</i> Использование графических ускорителей при моделировании нелинейных ультразвуковых пучков на основе уравнения Вестервельта	134

УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

<i>Вьюгинова А.А., Лбов А.А., Новик А.А.</i> Ультразвуковое технологическое оборудование для обработки агрессивных сред при повышенных температурах и давлении.	141
<i>Елисеев Н.Ю.</i> Влияние ультразвука на структурно-механические свойства высоковязкой нефти	146
<i>Каримов А.Р., Рухман А.А., Задорожный В.С., Лопес М.М., Шиканов А.Е., Богданов В.К.</i> Изменение фазовых и химических свойств полимерных жидкостей в неравновесных условиях	153

<i>Кустов А.И., Деркачев И.С., Мигель И.А.</i> Определение электрических характеристик пьезокерамики амд-методами	157
<i>Марфин Е.А., Абдрашитов А.А.</i> Влияние ультразвукового воздействия на температурные зависимости вязкости масел	163
<i>Муллакаев М.С., Салтыков Ю.А., Салтыков А.А., Муллакаев Р.М.</i> Анализ опытно-промысловых испытаний ультразвуковой технологии на скважинах самотлорского месторождения.	171
<i>Муякшин С.И., Диденкулов И.Н., Вьюгин П.Н., Чернов В.В., Хабаров С.Э.</i> Применение волн Лэмба для обнаружения и локализации неоднородностей в композитных материалах.	174
<i>Петросян С.А., Николаев Д.А., Цысарь С.А., Свет В.Д., Сапожников О.А.</i> Звуковидение в жидкости с приемом эхо-импульсных сигналов посредством многоканального волновода и зеркально-линзовой акустической системы	179
<i>Хмелев В.Н., Барсуков Р.В., Нестеров В.А., Генне Д.В., Цыганок С.Н.</i> УЗ инструмент для реализации комбинированного воздействия в процессе бурения вземных объектов.	186
<i>Хмелев В.Н., Цыганок С.Н., Барсуков Р.В., Хмелев М.В.</i> Ультразвуковые аппараты для интенсификации процессов.	191
<i>Хмелев В.Н., Нестеров В.А., Шалунов А.В., Сливин А.Н.</i> Ультразвуковая коагуляция аэрозолей в стоячей волне	195
<i>Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Нестеров В.А., Терентьев С.А., Тертишников П.П.</i> Ультразвуковая сушка капиллярно-пористых материалов	203
<i>Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Нестеров В.А., Голых Р.Н.</i> Коагуляция субмикронных аэрозолей ультразвуковыми колебаниями	209

АКУСТООПТИКА

<i>Балакий В.И., Купрейчик М.И., Манцевич С.Н., Пожар В.Э.</i> Акустооптические устройства на основе двуосных кристаллов	215
<i>Марунин М.В., Поликарпова Н.В.</i> Исследование кристаллов α - BaV_2O_4 и β - BaV_2O_4 для применения в акустооптических приборах ультрафиолетового диапазона	220
<i>Поликарпова Н.В., Марунин М.В.</i> Необычные случаи поведения акустических волн на границе раздела в кристалле парателлурита	225

ОПТОАКУСТИКА

<i>Бункина А.Ф., Михалевич В.Г., Стрельцов В.Н.</i> Вынужденное рассеяние на упругих колебаниях наночастиц в оптическом резонаторе с нанодисперсным заполнением	230
<i>Кожушко В.В., Сергиенко В.П., Митюрин Г.С.</i> Определение модуля Юнга стальной проволоки оптико-акустическим методом	235

АКУСТОЭЛЕКТРОНИКА

<i>Бородина И.А., Зайцев Б.Д., Теплых А.А., Гулий О.И.</i> Датчик на основе резонатора с поперечным электрическим полем из пьезокерамики ЦТС для анализа бактериальных клеток в жидкости.	242
<i>Горбачев И.А., Смирнов А.В., Кашин В.В., Юдин С.Г., Анисимкин В.И., Колесов В.В.</i> Исследование структурных и пьезоэлектрических свойств плёнок ПВДФ, полученных методом Ленгмюра — Блоджетт	246
<i>Зайцев Б.Д., Семёнов А.П., Теплых А.А., Бородина И.А.</i> Влияние поперечных размеров пьезокерамических резонаторов с продольным и поперечным электрическим полем на особенности возбуждаемых акустических колебаний	252
<i>Зайцев Б.Д., Теплых А.А., Семенов А.П., Бородина И.А.</i> Влияние проводящей пленки с конечной толщиной на характеристики резонатора с поперечным электрическим полем	257
<i>Никитов С.А., Морозова М.А., Матвеев О.В., Садовников А.В.</i> Акустические и спиновые волны в магнитных, магнитоэлектрических и магнитоупругих гетероструктурах	262
<i>Плетнев О.Н., Бурков С.И., Турчин П.П., Золотова О.П.</i> Анализ влияния массовой нагрузки металлизации и начального механического давления на дисперсионные характеристики волны Лэмба в пластине ниобата лития	268

БИМЕДИЦИНСКИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

<i>Акимов А.Г., Егорова М.А.</i> Влияние широкополосного шума на слуховые вызванные потенциалы ствола мозга мыши	275
<i>Бибииков Н.Г., Низамов С.В., Пигарев И.Н.</i> Нейронные реакции коры мозга кошки на звуки, поступающие с фронтального направления (методические аспекты).	281

<i>Бритенков А.К., Машукова О.В., Боголюбов Б.Н., Силаков М.И., Речкин А.И.</i> Исследование влияния гидроакустических полей высокой интенсивности на морские светящиеся планктонные виды	285
<i>Бобина А.С., Росницкий П.Б., Хохлова Т.Д., Юлдашев П.В., Хохлова В.А.</i> Искажение и затухание сфокусированного ультразвукового пучка при прохождении через брюшную стенку в задачах неинвазивной хирургии абдоминальных гематом	289
<i>Егорова М.А.</i> Стимул-специфическая адаптация в реакциях нейронов высших слуховых центров мозга мыши	295
<i>Иванова А.Д., Крит Т.Б., Камалов Ю.Р.</i> Диагностика скелетных мышц методом эластографии сдвиговой волны	300
<i>Кравчук Д.А., Старченко И.Б., Орда-Жигулина Д.В., Воронина К.А.</i> Рассеяние оптоакустических сигналов на моделях эритроцитов в потоке жидкости с контрастными наноагентами	305
<i>Крохмаль А.А., Сапожников О.А., Кудан Е.В., Цысарь С.А., Петров С.В., Перейра Ф., Хесуани Ю.Д., Энгелькамп Х., Граннеман С., Миронов В.А., Парфенов В.А.</i> Акустическое манипулирование левитирующими в магнитном поле сферическими частицами	309
<i>Лупанова А.С., Егорова М.А.</i> Акустическая структура низкочастотных вокализаций домашней мыши (<i>Mus musculus</i>)	315
<i>Пестова П.А., Карзова М.М., Юлдашев П.В., Хохлова В.А.</i> Влияние траектории перемещения фокуса на равномерность температурного поля при импульсном воздействии мощного ультразвукового пучка на биологическую ткань	320
<i>Пономарчук Е.М., Хохлова В.А., Сапожников О.А., Хантер К., Хохлова Т.Д.</i> Пороги акустической атомизации коагулированной крови в импульсных ультразвуковых пучках с различными углами фокусировки.	326
<i>Силаева О.Л., Вараксин А.Н.</i> Анализ временной структуры сигналов бедствия некоторых видов птиц	332
<i>Ситдинов В.М., Гвоздева А.П., Андреева И.Г.</i> Дифференциальные пороги слуха при локализации движущихся и неподвижных источников звука для расстояний, типичных при коммуникации.	336
<i>Тимербулатов Ш.В., Хакимов А.Г.</i> Определение массового расхода крови в кровеносном сосуде по собственным частотам изгибных колебаний	340
<i>Чупова Д.Д., Хохлова В.А., Гаврилов Л.Р., Росницкий П.Б.</i> Влияние неоднородностей черепа человека на фокусировку ультразвукового пучка при транскраниальном облучении головного мозга на различной глубине	345

АКУСТИКА РЕЧИ

<i>Астапов С.С., Лаврентьев А.В., Кабаров В.И.</i> Применение полигармонических моделей для определения пространственных признаков речи	350
<i>Гутова С.Ю.</i> Певческая основа русской диалектной речи	356
<i>Кипяткова И.С., Марковников Н.М.</i> Исследование методов улучшения интегральных систем распознавания речи при недостатке обучающих данных	361
<i>Крейчи С.А., Кедрова Г.Е.</i> Акустика речи. Особенности консонантизма русскоговорящих иностранцев	368
<i>Маркитантов М.В., Карпов А.А.</i> Автоматическое распознавание пола и возраста человека с помощью нейронных сетей с временной задержкой на основе акустических признаков	374
<i>Огородникова Е.А., Пак С.П., Столярова Э.И., Лабутина О.В.</i> Особенности восприятия конкурирующих речевых сигналов в норме и при нарушениях слухоречевой функции	381
<i>Григорьев А.С., Городный В.А.</i> Влияние психофизиологических показателей испытуемых на успешность распознавания речевого материала в перцептивном эксперименте.	385
<i>Ляксо Е.Е., Григорьев А.С., Фролова О.В., Николаев А.С.</i> Использование спектрографического и электроглоттографического методов для определения значений частоты основного тона.	390
<i>Фролова О.В., Городный В.А., Ляксо Е.Е.</i> Распознавание эмоционального состояния детей по характеристикам речи.	395

АКУСТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И СТАНДАРТИЗАЦИЯ

<i>Вировлянский А.Л., Казарова А.Ю., Любавин Л.Я.</i> Калибровка источника звука в бассейне с отражающими границами с применением метода эквивалентных источников	400
<i>Исаев А.Е., Черников И.В.</i> Моделирование натуральных условий при воспроизведении и передаче единицы звукового давления	405
<i>Исаев А.Е., Матвеев А.Н.</i> Экспериментальное подтверждение корректности калибровки векторного приёмника по полю в реверберационном звуковом поле бассейна	410

<i>Канев Н.Г.</i> Методологические проблемы измерения вибрации рельсового транспорта и пути их решения.	415
<i>Кедринский В.К., Журавлева Е.С.</i> Структура сходящейся волны разрежения и развитие кавитации за ее фронтом в цилиндрическом слое многофазной жидкости	423
<i>Кустов А.И., Деркачев И.С., Мигель И.А.</i> Акустомикроскопические исследования упруго-механических параметров сталей после внешних воздействий	430
<i>Николаев Д.А., Цысарь С.А., Сапожников О.А.</i> Определение и компенсация перекося осей трёхкоординатных систем позиционирования с помощью метода акустической голографии	436

ЭЛЕКТРОАКУСТИКА И ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКАЯ АППАРАТУРА

<i>Александров В.А., Буянов А.П., Казаков Ю.В.</i> Мощные генераторы широкополосных сигналов для испытаний гидроакустических излучающих антенн	444
<i>Родионов А.А., Савельев Н.В.</i> Синтез планарных разреженных антенных решеток для обнаружения и пеленгации	450
<i>Шарфарец Б.П., Курочкин В.Е., Сергеев В.А.</i> Об акустоэлектрическом преобразователе, основанном на использовании электрокинетических явлений	454
<i>Шарфарец Б.П., Курочкин В.Е., Сергеев В.А., Дмитриев С.П., Телятник С.Г.</i> Об электроакустическом преобразователе, основанном на использовании электрокинетических явлений	460

АРХИТЕКТУРНАЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ АКУСТИКА

<i>Алешин А.Р., Гнутик А.П., Черезов М.И.</i> Связь между АЧХ и распределением модальных частот в задаче поиска акустических размеров помещения	466
<i>Канев Н.Г.</i> Голосники	475
<i>Кравчун П.Н.</i> Акустика и органы мальтийской капеллы и лютеранской церкви Святой Марии в Санкт-Петербурге	482
<i>Цукерников И.Е., Шубин И.Л., Невенчанная Т.О.</i> Система национальных стандартов по измерению и оценке звукоизоляции	486
<i>Щиржецкий Х.А., Алешкин В.М., Щиржецкий А.Х.</i> Особенности акустических требований к молельным залам канонических конфессиональных зданий и сооружений	490

ШУМЫ И ВИБРАЦИИ

<i>Бакланов В.С.</i> Парадоксы виброакустики самолетов с двигателями нового поколения (уменьшение шума на местности увеличивает шум в кабине)	498
<i>Берестовицкий Э.Г., Соловьев М.В.</i> Анализ схемно-конструктивных решений для создания и испытаний малозумных электрогидравлических приборов систем управления	503
<i>Волкова Н.В.</i> Современные эффективные виброизолирующие подвески трубопроводов рабочих сред	509
<i>Дымченко В.В., Ерофеев В.И., Монич Д.В.</i> Звукоизоляция каркасно-обшивных перегородок	514
<i>Зверев А.Я., Черных В.В.</i> Влияние косвенных путей передачи звуковой энергии на характеристики звукоизоляции тестовых панелей	517
<i>Кечик Д.А.</i> Оценка мгновенной частоты спектральных составляющих нестационарного виброакустического сигнала оконным методом Прони	522
<i>Московец М.Е., Канев Н.Г.</i> Защита здания от одновременного вибрационного воздействия трамваев и поездов метрополитена	529
<i>Хлопков Е.А., Смирнов В.В., Муравьев С.И., Вьюненко Ю.Н.</i> Сравнительное исследование эффективности индивидуальных средств защиты рук от вибрации	538

АКУСТИЧЕСКИЕ МЕТАМАТЕРИАЛЫ

<i>Асфандияров Ш.А.</i> Численный расчет поглотителя звука из АММ	544
<i>Бобровницкий Ю.И.</i> Метод волнового усреднения и эффективные параметры АММ	548
<i>Балашин Ю.А., Дамдинов Б.Б.</i> Фононный кристалл с переменными во времени параметрами его структуры	551
<i>Володарский А.Б., Кокшайский А.И., Ширгина Н.В., Одина Н.И., Коробов А.И.</i> Особенности распространения продольной акустической волны через фононный кристалл, помещенный в жидкую или резиноподобную среды.	556
<i>Карпов И.А., Гребенников А.С., Ким А.А.</i> Применение параметрического моделирования случайных процессов для определения потерь в линейных колебательных системах.	560

АЭРОАКУСТИКА

<i>Бойчук И.П.</i> Моделирование шума задней кромки ротора	565
<i>Вишняков А.Н., Макашов С.Ю.</i> Оценка влияния оборудования заглушенных камер на структуру звукового поля	573

<i>Гринек А.В., Бойчук И.П., Кондратьев С.И., Руденко В.В.</i> Экспериментальные акустические исследования винтов малого масштаба	578
<i>Денисов С.Л., Остриков Н.Н.</i> Особенности снижения шума авиационных силовых установок с помощью эффекта экранирования	585
<i>Крашенинников С.Ю., Бендерский Л.А., Семенёв П.А., Польшняков Н.А.</i> Анализ возможных механизмов шумообразования в турбулентных струях	589
<i>Мошков П.А., Остриков Н.Н., Самохин В.Ф.</i> О проблеме шума на местности винтовых беспилотных летательных аппаратов.	597

ГЕОАКУСТИКА

<i>Абрамович А.А., Бурлуцкий С.Б., Недбай А.И., Юша А.М.</i> Определение реологических свойств глин методом ультразвуковой спектроскопии	604
<i>Бубнов Е.Я.</i> Экспериментальные исследования волновой структуры сейсмоакустических полей железнодорожного транспорта в дальней зоне	609
<i>Дугаров Г.А., Дучков А.А., Манаков А.Ю.</i> Экспериментальное изучение акустических свойств угольных образцов, содержащих гидрат метана	615
<i>Дугаров Г.А., Колесников Ю.И., Федин К.В., Орлов Ю.А.</i> Акустические измерения на искусственных трещиноватых образцах, изготовленных по FDM технологии 3D-печати	621
<i>Заславский Ю.М., Заславский В.Ю.</i> 3D численное моделирование объемной и поверхностной волны, возбуждаемых в плавно стратифицированной осадочной донной толще	627
<i>Ковзель Д.Г., Борисов С.В., Гриценко В.А., Медведев И.В., Нечаюк В.Е.</i> Автономная донная акустическая станция со скалярно-векторным приемником «Краб-19»	631
<i>Котов А.Н., Преснов Д.А., Жостков Р.А.</i> Натурное изучение временных вариаций сейсмических шумов мегаполиса	635
<i>Лебедев А.В.</i> К решению задач акустического каротажа.	643
<i>Манульчев Д.С.</i> Особенности распространения сейсмоакустического импульса в бухте витьязь	648
<i>Сазонтов А.Г., Смирнов И.П.</i> Локализация источника в переменном по трассе волноводе с помощью адаптивной антенной решетки	653
<i>Щербина А.О., Солодчук А.А.</i> Оценка мощности источников геоакустической эмиссии, зарегистрированной в оз. Микижа (Камчатский край)	658

РАСПРОСТРАНЕНИЕ И ДИФРАКЦИЯ ВОЛН

<i>Злобина Н.В., Касаткин Б.А., Касаткин С.Б.</i> Корректная постановка граничной задачи Пекериса и ее решения в различных классах функций	663
<i>Vadiu M., Казначеева Е.С., Кузькин В.М., Малыхин А.Ю., Пересёлков С.А.</i> Частотно-временная структура звукового поля при наличии интенсивных внутренних волн на океаническом шельфе	669
<i>Королёв Ю.П.</i> Оперативный прогноз цунами на основе принципа взаимности.	673
<i>Кузнецов Г.Н., Кузькин В.М., Пересёлков С.А., Просовецкий Д.Ю.</i> Интерференционная структура шумового поля движущегося источника в высокочастотном диапазоне	678
<i>Кузькин В.М., Пересёлков С.А., Казначеев И.В., Ткаченко С.А.</i> Измерительные возможности интерферометрического метода локализации звукового источника в океане	682
<i>Куличков С.Н., Чунгузов И.П., Попов О.Е., Перепелкин В.Г.</i> Дальнее распространение инфразвуковых волн в атмосфере с анизотропными неоднородностями	686
<i>Папкина Ю.И.</i> Звуковое поле в морском волноводе с неоднородной скоростью звука по глубине и трассе	691
<i>Чунгузов И.П., Куличков С.Н., Перепелкин В.Г., Попов О.Е., Варданян А.А., Айвазян Г.Е.</i> Моделирование распространения и рассеяния инфразвуковых сигналов в атмосфере	700

АКУСТИКА ОКЕАНА

<i>Бибииков Н.Г., Попов О.Е., Кенигсбергер Г.В., Иванов М.П., Макушевич И.В., Нешенко И.П., Серебряный А.Н.</i> Мониторинг временного и пространственного распределения звуковой активности раков-шелкунов на шельфе черного моря	704
<i>Дбар Р.С., Бибииков Н.Г., Елистратов В.П., Есипов И.Б., Кенигсбергер Г.В., Серебряный А.Н., Попов О.Е.</i> Экспериментальный морской полигон для гидроакустических и океанологических работ у мыса Сухумский в Черном море	709
<i>Лебедев А.В.</i> Направленность излучения низкочастотного атмосферного звука, возбуждаемого источниками в воде.	717

А. Д. Иванова^{1,а}, Т. Б. Крит^{1,б}, Ю. Р. Камалов^{2,с}

*¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра акустики. Россия*

²ФГБНУ «РНЦХ им. акад. Б. В. Петровского». Россия

E-mail: ^аivanova.ad16@physics.msu.ru ^бtimofey@acs366.phys.msu.ru ^сkamalov53@yandex.ru

ДИАГНОСТИКА СКЕЛЕТНЫХ МЫШЦ МЕТОДОМ ЭЛАСТОГРАФИИ СДВИГОВОЙ ВОЛНЫ

С помощью стандартного ультразвукового оборудования измерены значения модуля сдвига в двуглавых мышцах плеч добровольцев при нагрузках от 0 до 50 Н. Измерения проведены методами ARFI и эластографии сдвиговой волны в клинике в соответствии с медицинским протоколом. Для создания нагрузки испытуемый доброволец удерживал спортивный снаряд известной массы. При помощи ультразвукового датчика в мышце возбуждалась сдвиговая волна на заданной глубине. Регистрировалась скорость распространения сдвиговой волны в сечении мышцы, определяемом положением датчика. Измеренный методом эластографии модуль сдвига мышечных волокон растёт при увеличении нагрузки от 10 до 60 кПа и возвращается к 10 кПа спустя 1 минуту после снятия нагрузки. Методом ARFI результат подтверждён.

Ключевые слова: ARFI, ультразвуковая диагностика, компрессионная эластография

Введение

Развитие неинвазивных методов измерений биомеханических параметров скелетных мышц организма представляет собой особый интерес для исследований в области клинической диагностики. Одним из самых перспективных направлений исследований является использование эластографии сдвиговой волны для изучения состояния тканей организма [1]. Эластография представляет собой ряд методик ультразвуковой диагностики, основанных на свойстве тканей менять свою эластичность в зависимости от патологических изменений организма и внешних факторов. В данной работе метод эластографии был использован, чтобы оценить нормальные физиологические параметры двуглавой мышцы плеча для дальнейшего практического применения эластографии в клинических обследованиях.

1. Теория

Современное медицинское ультразвуковое исследование выполняется в основном с использованием эхо-импульсного подхода и яркостного режима отображения (В-режима). Обычно только небольшая часть ультразвукового импульса возвращается в виде отраженного эха после достижения поверхности ткани тела, а оставшаяся часть импульса продолжает распространяться вдоль линии луча на большую глубину в ткани, поэтому измерения в В-режиме дают лишь качественные представления о состоянии ткани, и результат этих измерений не всегда является точным. Существуют более точные методы неинвазивной диагностики, основанные на том факте, что наличие в тканях неоднородностей и различных патологических изменений оказывает сильное воздействие на их сдвиговую упругость.

К таким методам относится эластография. Физической основой данного метода диагностики является модуль Юнга, характеризующий свойства мягких тканей сопротивляться растяжению и сжатию при упругой деформации. Он может быть рассчитан двумя способами, каждый из которых позволяет выделить две основные разновидности эластографии. В первой, основанной на уравнении

$$E = \sigma/\varepsilon, \quad (1)$$

упругость определяется отношением величины компрессии к относительной деформации столбика ткани. Этот вариант называют «компрессионной эластографией». Второе уравнение

$$E = 3\rho C^2 \quad (2)$$

позволяет вычислить модуль Юнга используя скорость распространения сдвиговой волны в веществе. Этот вариант носит название «эластография сдвиговой волны».

В данной работе были проведены исследования двуглавой мышцы плеча с использованием двух ультразвуковых методов эластографии: компрессионной эластографии и метод импульсной акустической радиационной силы (ARFI). С помощью компрессионной эластографии возможно производить оценку эластичности тканей путем сравнения изображений до и после приложения статической силы к тканям. Методика ARFI предполагает использование акустических радиационных импульсов давления, создаваемых ультразвуковыми сигналами, сфокусированными на разную глубину, с использованием оценки скорости сдвиговых волн [2].

2. Эксперимент

Измерения проводились в лаборатории ультразвуковой диагностики Российского Научного Центра Хирургии им. акад. Б. В. Петровского РАМН врачом, имеющим многолетний опыт работы с ультразвуковым диагностическим оборудованием на аппарате Siemens Acuson S2000 на частоте 8 МГц. Двуглавая мышца плеча измерялась при последовательной нагрузке от 0 кг до 4 кг в двух положениях в режиме ARFI. Режим ARFI, доступный в системе Acuson S2000, реализован в виде функции Virtual Touch™. Данная функция, во-первых, позволяет получать соноэластографические изображения, аналогичные тем, которые могут быть получены при обычной соноэластографии. Этот режим используется, прежде всего, для характеристики и визуализации повреждений в тканях. Система Siemens ACUSON S2000 позволяет измерять значение скорости сдвиговой волны на заданной глубине. В изотропных средах, где модуль сдвига ткани одинаков во всех направлениях, значение модуля сдвига можно определить, измерив скорость сдвиговой волны [3]. Изначально испытуемый принимает положения сидя, рука при этом расположена так, что кости плеча и предплечья образуют угол равный 90°, при этом локоть опирается на жесткую подставку. Для данной конфигурации был оптимизирован существующий метод измерений [4]: при отсутствии релаксационного времени для мышцы между сериями испытаний сохранялся вид зависимости изменения модуля сдвига бицепса от приложенной нагрузки, что позволяет сократить время проведения измерений примерно в 1,5 раза.

Для проведения исследования исходя из полученного способа оптимизации был подготовлен соответствующий протокол. Первый раздел протокола содержит анкетные данные испытуемого. В этот раздел входят фамилия, имя, отчество, рост и вес. Во второй раздел заносятся данные измерений скоростей сдвиговых волн при положении датчика вдоль волокон методом ARFI при разных нагрузках на глубине, соответствующей середине короткой головки двуглавой мышцы. Эта глубина фиксируется для каждого испытуемого и впоследствии не меняется при изменении нагрузки. При каждой нагрузке проводится серия из трёх измерений. Затем результаты измерений усредняются. В третьем разделе датчик помещается поперек волокон мышцы, затем повторяется последовательность действий описанная во втором разделе.

В ходе измерений было получено, что в данном положении затруднено получение точных результатов для пациентов с слаборазвитой мускулатурой. Для рассмотрения был предложен дополнительный метод измерения, в котором рука располагалась вдоль тела

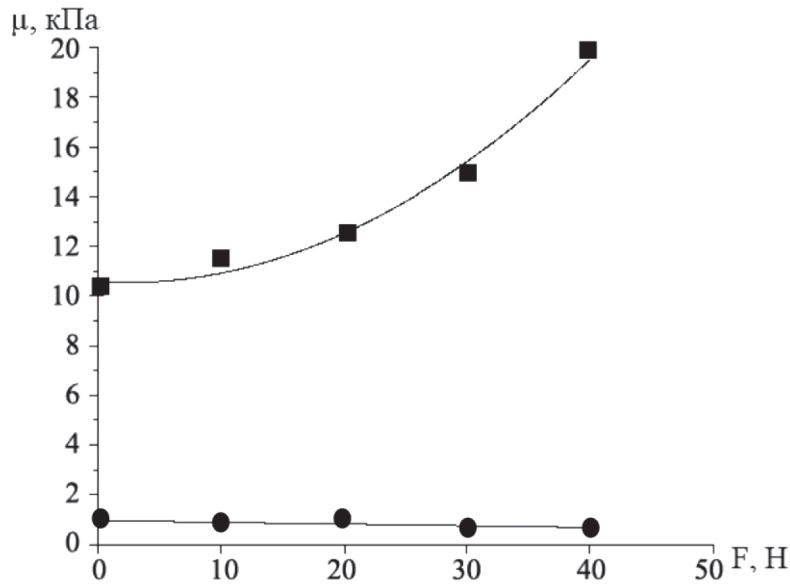


Рис. 1. Измеренные зависимости модуля сдвига от нагрузки на двуглавую мышцу на глубине, соответствующей середине короткой головки двуглавой мышцы. Кривыми показана зависимость вдоль волокон, квадратиками — против волокон

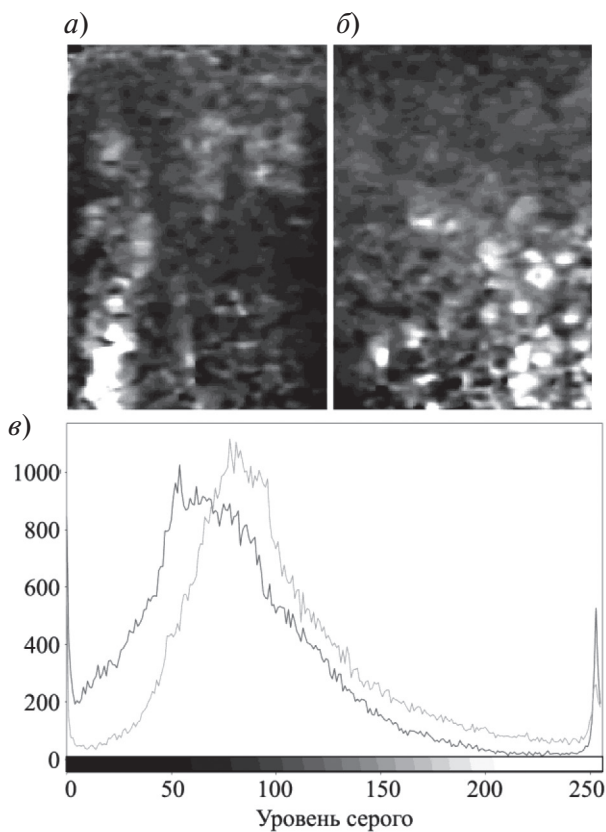


Рис. 2. Эластограмма бицепса на глубине 1 см в положениях сидя (а) и стоя (б); в — гистограмма по уровню серого в отсутствии нагрузки при поперечных измерениях в положениях сидя (серым) и стоя (черным)

в положении стоя. Для проверки надежности метода были рассмотрены изображения, полученные с помощью квазистатической эластографии в обоих положениях руки. Эластограмма в квазистатическом случае представляет собой качественное изображение распределения эластичности мышцы в каждой точке получаемого изображения. Сравнительный анализ проводился с использованием графических пакетов Python для создания гистограмм по уровню серого.

Гистограмма по уровню серого свидетельствует об общей яркости и контрастности изображения, состоит по горизонтальной оси из 256 уровней яркости пикселей, по вертикальной соответствует количеству пикселей каждого уровня яркости [5]. Таким образом, ее анализ является ценным методом для оценки как количественных, так и качественных характеристик изображения. Для проведения сравнительной характеристики состояния двуглавой мышцы плеча в обоих положениях полученные эластограммы при одинаковых: ориентации датчика относительно волокон и нагрузке, анализировались попарно в одной шкале уровня серого.

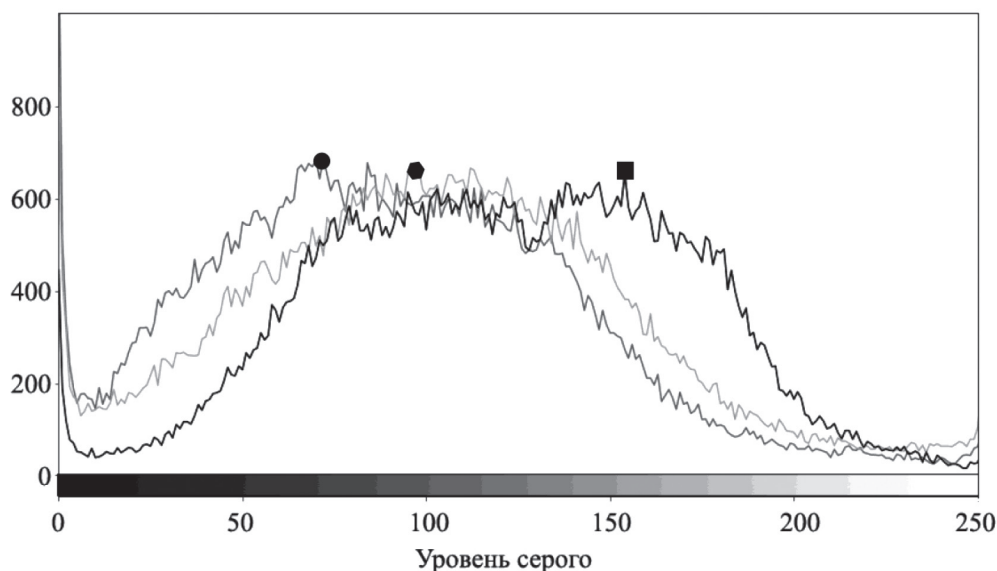


Рис. 3. Гистограммы по уровню серого для последовательной нагрузки двуглавой мышцы плеча в положении стоя. Кругом отмечено наибольшее значение при отсутствии нагрузки, шестиугольником при нагрузке 10Н, квадратом при нагрузке 20Н

Исследования графиков показали, что в общем случае пик гистограмм в положении стоя смещен в область белого цвета на оси абсцисс графика, имеющего значение 256, который соответствует областям наибольшей эластичности. Таким образом в этом положении в меньшей степени наблюдается напряжение бицепса, чем в положении сидя.

3. Результаты

При рассмотрении сравнительной характеристики различных нагрузок для положения стоя видно, что пики с увеличением нагрузки смещаются в сторону светлой области, соответствующую тканям с меньшей жесткостью. Предполагается, что, исходя из особенностей анатомии человека и результатов эксперимента, в этот момент нагрузка в большей степени передается на трицепс, что делает данный метод в большей степени точным относительно измерений трехглавой мышцы плеча, чем двуглавой мышцы плеча. Рассмотрение состояния трицепса также является исследованием с высоким потенциалом, так как большая часть травм получаемых при физических упражнениях приходится на мышцы плеча [6].

Заключение

Методологии, рассмотренные в данной работе, в будущем позволят разработать и уточнить методы эластографии мышц, применяемые для диагностирования патологий тканей для различных групп мышц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sarvazyan A. P., Rudenko O. V., Nyborg W. L.* Biomedical applications of radiation force of ultrasound: historical roots and physical basis // *Ultrasound Med. Biol.* 2010. V. 36. № 9. P. 1379–1389.
2. *Bryce Harmon, Michael Wells, David Park, Jing Gao,* Ultrasound elastography in neuromuscular and movement disorders // *Clinical Imaging* 2019;53;35–42.

3. *Андреев В. Г., Крит Т. Б., Сапожников О. А.* Стоячие волны в упругом слое, нагруженном конечной массой // Акуст. журн. 2010. Т. 56. № 2. С. 190–196
4. *Бегичева М. И., Крит Т. Б., Камалов Ю. Р., Андреев В. Г.* Диагностика напряженного состояния двуглавой мышцы плеча методом эластографии сдвиговой волны // 13-я международная научная конференция Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии — ФРЭМЭ'2018 — Владимир-Суздаль, Россия, Доклады, Книга 1, С. 116–120
5. *А. С. Осадчий, И. П. Королюк* Компьютерная обработка аналоговых рентгенологических изображений в дифференциальной диагностике очаговых поражений органов грудной клетки // Медицинская визуализация 2008;4;133–137
6. *В. Н. Хомяков* Анализ инвалидности вследствие травм верхних конечностей в Украине за 2011 год // Ортопедия, травматология и протезирование. 2013. № 1: 94–97

ТРУДЫ ВСЕРОССИЙСКОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
ОК 005-93, т. 2; 95 3004 – научная и производственная литература

Подписано в печать 04.09.2020. Формат 60×84/8. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 84,5. Тираж 20. Заказ 0371.

Отпечатано с готового оригинал-макета,
предоставленного организаторами конференции,
в Издательско-полиграфическом центре Политехнического университета.
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.
Тел.: (812) 552-77-17; 550-40-14.

