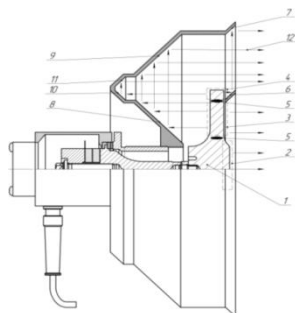
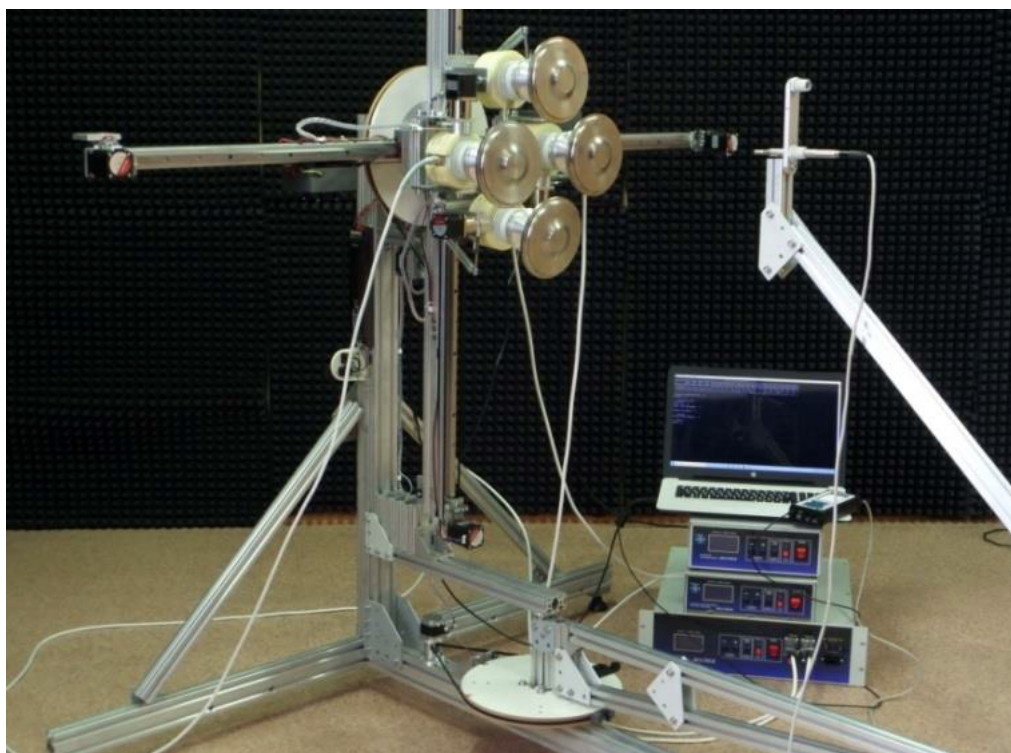


СЕКЦИЯ УЛЬТРАЗВУК И УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ



[назад к Содержанию](#)

СОДЕРЖАНИЕ СЕКЦИИ УЛЬТРАЗВУК И УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

1. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ АППАРАТУРЫ НА МАГНИТОСТРИКЦИОННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ Рухман А.А., Задорожный В.С., Рухман Е.П.....	1120
2. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ ДРЕВЕСИНЫ ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОГО ХРАНЕНИЯ Вьюгинова А.А., Вьюгинов С.Н., Леонтьев Л.Л., Новик А.А.	1126
3. УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ОБЪЕМНОЙ МИКРОСТРУКТУРЫ УГЛЕПЛАСТИКОВ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ ИЗГИБНЫХ НАГРУЗКАХ Володарский А.Б., Морокhov Е.С	1134
4. РАЗВИТИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СВАРКИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ИЗДЕЛИЙ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ Хмелев В.Н., Барсуков Р.В., Нестеров В.А., Генне Д.В., Цхе А.В.	1135
5. РЕАЛИЗАЦИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО РАСПЫЛЕНИЯ Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Терентьев С.А.	1143
6. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В ВОЗДУХЕ ДЛЯ СОЗДАНИЯ МОЩНОЙ МНОГОЭЛЕМЕНТНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ Лапина А.В., Цысарь С.А., Росницкий П.Б., Сапожников О.А.	1150
7. ИЗЛУЧАТЕЛИ ИЗГИБНОГО ТИПА ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ В ГАЗОВЫХ СРЕДАХ Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Цыганок С.Н.	1152
8. УЛЬТРАЗВУКОВОЕ РАЗРУШЕНИЕ ДЫМА Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Цыганок С.Н.	1160
9. РЕАЛИЗАЦИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ДЛЯ СУШКИ МАТЕРИАЛОВ Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Терентьев С.А.	1168
10. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЧАСТОТЫ И АМПЛИТУДЫ ПУЛЬСАЦИЙ ГАЗОВОГО ПОТОКА НА ПРОЦЕСС СУШКИ СФЕРИЧЕСКОЙ ПОРИСТОЙ ЧАСТИЦЫ Зайнутдинова Д.А., Павлов Г.И., Горбунова О.А., Теляшов Д.А.	1175
11. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ НИЗКОЧАСТОТНОГО ТРЕХСЛОЙНОГО ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ ГЕОФИЗИЧЕСКОГО КАРОТАЖА НЕФТЯНЫХ СКВАЖИН Наседкин А.В., Наседкина А.А., Павленко М.В., Рыбьянец А.Н.	1181
12. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УПРУГИХ СВОЙСТВ ОБРАЗЦОВ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ПО ХАРАКТЕРИСТИКАМ УПРУГИХ ВОЛН Голуб М.В., Канищев К.К., Арсенов М.А., Еремин А.А., Ханазарян А.Д., Дорошенко О.В., Шилько С.В., Панаи А., Румянцев И.А., Емельянов В.А.	1187

- 13. ЧИСЛЕННЫЕ И НАТУРНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ДИСПЕРСИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НОРМАЛЬНЫХ УПРУГИХ ВОЛН В ПРОТЯЖЕННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ СЛОЖНОГО СЕЧЕНИЯ**
Емельянов В.А., Румянцев И.А., Еремин А.А., Панаи А.....1193
- 14. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ СИСТЕМЫ «ПЬЕЗОАКТУАТОР – СЛОИСТЫЙ АНИЗОТРОПНЫЙ ВОЛНОВОД»**
Варелджан М.В., Еремин А.А., Глушков Е.В., Глушкова Н.В.....1199
- 15. ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД МЕТОДОМ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**
Краснова М.А., Белобородов Д.Е.1206
- 16. ФИЗИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО СКЛЕИВАНИЯ**
Пугачев С.И., Рытов Е.Ю.....1211
- 17. УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ИНТЕНСИФИКАЦИЯ МАССООБМЕНА В ГАЗОЖИДКОСТНЫХ СИСТЕМАХ**
Барсуков А.Р., Голых Р.Н., Хмельёв В.Н., Маняхин И.А.1217
- 18. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ СФЕРИЧЕСКИХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ИЗ ПОРИСТОЙ И СПЛОШНОЙ ПЬЕЗОКЕРАМИК**
Леднов А.С., Наседкин А.В., Швецов И.А., Рыбьянец А.Н.....1224
- 19. ИЗМЕРЕНИЕ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ВОЗДУШНОГО УЛЬТРАЗВУКА, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В КАЧЕСТВЕ ЭЛЕМЕНТОВ АНТЕННЫХ РЕШЁТОК**
Петров Е.А., Лапина А.В., Цысарь С.А., Гогмачадзе Н., Сапожников О.А.1230
- 20. ОБЗОР ПРИМЕНЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ДОБЫЧИ НЕФТИ В СЛОЖНЫХ КОЛЛЕКТОРАХ**
Дамдинов Б.Б., Пригожих В.А.....1232
- 21. АНОМАЛЬНАЯ УПРУГАЯ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ ДИСПЕРСИЯ В ПОРИСТОЙ ПЬЕЗОКЕРАМИКЕ**
Швецова Н.А., Луговая М.А., Швецов И.А., Колпачева Н.А., Рыбьянец А.Н.1236
- 22. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ФОКУСИРУЮЩИХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**
Луговая М.А., Швецов И.А., Петрова Е.И., Константинова М.Г., Рыбьянец А.Н.....1244

УДК: 621.3

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39670

Перспективы развития ультразвуковой аппаратуры на магнитострикционных преобразователях

А.А. Рухман^{1,a*}, В.С. Задорожный В.С.^{2,b}, Рухман Е.П.^{2,c}

^{1.} ООО «Ультразвук-генераторы», Москва, Россия

^{2.} ООО «Ультра-Резонанс», Екатеринбург, Россия

E-mail: ^a aruhman@yandex.ru ^b zadorozhniy.vasily@yandex.ru ^c ruhman.e@yandex.ru

Аннотация: В статье производится обзор существующей и применяемой более 65 лет ультразвуковой аппаратуры (УЗА) на магнитострикционных преобразователях (ПМС). Одна из особенностей ПМС заключается в их большой массивности, а, значит, в существенной реактивной энергии, запасаемой в резонансном режиме. При изменении акустической нагрузки ПМС переходит из режима вынужденных колебаний (двигательного) в режим свободных колебаний, сопровождающийся генерацией ЭДС в питающей цепи (генераторный); поэтому ультразвуковой генератор (УЗГ) должен обеспечивать рекуперацию энергии, генерируемой ПМС, и иметь встроенную защиту выходных каскадов от перенапряжения. Также УЗГ должен автоматически подстраивать частоту в режимах с низкой добротностью ПМС и при смещении резонансной частоты при изменении параметров среды (плотность, температура, давление, содержание газа и т.п.). Многие производства требуют установки УЗГ и ПМС на значительном удалении друг от друга. При этом увеличиваются потери мощности и проявляются волновые свойства кабеля. Для снижения электрических потерь, упрощения конструкции УЗГ (отказ от блоков подмагничивания) разработаны ПМС на постоянных магнитах. Разработанная аналоговая система управления УЗГ позволяет осуществлять двухстороннюю связь системы управления УЗГ с цеховой АСУТП и индцировать основные параметры режима работы генератора на его мониторе. Эти технические решения позволили выйти на разработку нового поколения УЗА, произвести подготовку крупносерийного производства УЗА, обеспечивающего ответственные производства дешевыми и надежными УЗГ и ПМС. В этом направлении продолжаются интенсивные НИОКР.

Ключевые слова: ультразвуковая аппаратура, ультразвуковой генератор, магнитострикционный преобразователь подмагничиваемый постоянными магнитами, УЗГ, ПМС.

Ultrasonic equipment using magnetostrictive transducers development prospects

A.A. Ruhman^{1,a}, V.S. Zadorozhny^{2,b}, E.P. Ruhman^{2,c}

^{1.} *Ltd «Ultrasonic generators», Moscow, Russia*

^{2.} *Ltd «Ultra-Rezonans», Ekaterinburg, Russia*

E-mail: ^a aruhman@yandex.ru ^b zadorozhniy.vasily@yandex.ru ^c ruhman.e@yandex.ru

Annotation: In this article we present an overlook of ultrasonic equipment (USE) incorporating magnetostrictive transducers (MSTs), existing and being in use for over 65 years. One of the features of magnetostrictive transducers is their large mass, and, therefore, high reactive energy accumulated at the resonance. With acoustic load variance the MST mode can change from forced to free oscillation, producing high-voltage EMF in power supply circuits, thus ultrasound generator (USG) must be capable to recuperate the MST reactive energy and have an overvoltage protection of its output. USG must also be capable to automatically adjust the output frequency in low Q-factor modes of MST operation and within resonance frequency shifts caused by environment parameters change (density, temperature, pressure, gas content etc.). In many installations USG and MST must be separated by a large distance. The connection cable in this case causes the power loss increase; long-line effects also appear. MSTs with permanent magnets were developed aiming to decrease power loss and to simplify the design (elimination of magnetizing circuits). Analog USG control system enables two-way communication with plant automated process control system and incorporates a display indicating main parameters of generator operation mode. Technical design described led to the development of a novel set of ultrasonic devices, allowed to prepare the USE mass production, thus providing customers with affordable and durable US generators and MSTs. Further R&D continues in this direction.

Keywords: ultrasonic equipment, ultrasonic generator, magnetostrictive transducer with permanent magnets, USG, UST.

Введение

Ультразвуковая аппаратура (УЗА) включает в себя ультразвуковой генератор (УЗГ), устройства связи (кабели, фильтры, компенсирующие элементы), преобразователь магнитострикционный (ПМС), инструмент – акустический волновод, согласовывающий магнитостриктор со средой, увеличивающий амплитуду колебаний, фокусирующий механическое воздействие и т.д., оснастку (направляющие, ванны и другие вспомогательные изделия для получения требуемой интенсивности ультразвука, позиционирования обрабатываемого изделия и среды по отношению к инструменту)[1-5].

1. Ультразвуковые генераторы

В СССР в 1960г. по постановлению Совмина организация серийного производства УЗА

была поручена Московскому радиотехническому заводу (МРТЗ). Было организовано производство генераторов УЗГ10 (ламповый), УЗГ1, УЗГ2, УЗГ3 (тиристорные). Крупной серией был выпущен генератор УЗГ3-4. Он был спроектирован по блочной схеме, обладал высокой помехоустойчивостью, надежностью и возможностью работы со всеми типами магнитострикторов. Известны случаи эксплуатации данного вида генераторов до сих пор, более 40 лет (Ярославский завод дизельной аппаратуры). Небольшими сериями выпускались УЗГ16 (на полевых транзисторах, разработки ВНИИТВЧ, г. Ленинград)[6], УЗГ2, УЗГ5, УЗГ10 (на полевых транзисторах JBT, разработка Уральского политехнического института). В настоящее время прогнозируется потребность в УЗА для опасных производств, работ в условиях высоких давлений, температур, механических нагрузок и при существенном удалении инструмента от УЗГ. На начальной стадии НИОКР находится УЗГ3000. В нем используется блочная конструкция (как в УЗГ3-4), аналоговая система управления (позволяет добиться высокой помехоустойчивости, оптимизировать режимы работы силовых транзисторов, обеспечить безусловную защиту от короткого замыкания).

2. Магнитострикционные преобразователи, особенности согласования с УЗГ

На заводе МРТЗ было организовано серийное производство ПМС типа ПМС6-22, ПМС15, ПМС1 и т.д., сопровождение которых выполняла лаборатория 113 КБ МРТЗ. Эти изделия имели магнитопроводы в виде пакетов пластин из пермендюра массой от 0,7 кг до 3 кг, а с присоединёнными акустическими трансформаторами становились ещё более массивными.

Работа излучателя (ПМС и инструмента) в резонансных режимах в жидкой среде приводит к превышению порога дегазации, особенно при работе в средах с высоким содержанием растворенного газа (газовым фактором). Выделение газа вокруг излучателя вызывает резкое падение акустической нагрузки, что переводит излучатель из двигательного режима в генераторный режим. При этом запасенная ранее реактивная энергия (до 10 кВт) повышает напряжение на выводах ПМС до нескольких киловольт. Это напряжение возвращается выходным трансформатором УЗГ на полупроводниковые элементы инвертора (транзисторы или тиристоры), что может приводить к выходу их из строя.

Для предотвращения возникновения аварии при резком изменении акустической нагрузки были использованы схемы инверторов со встречными диодами, которые частично защищали транзисторы. Для усиления защиты тиристоров УЗГ3-4 были применены высокочастотные диоды, ограничивающие перенапряжение на нагрузке (ПМС). В том же генераторе были установлены дополнительные диоды в инверторе, рекупирующие излишнюю колебательную энергию в конденсатор фильтра [7]. В современных УЗГ эти

средства защиты используются опционально, в случае разработки УЗА, работающей на резко переменную акустическую нагрузку.

Описанные выше критические режимы резкого снижения акустической нагрузки (образование газовой среды вокруг излучателя) приводят к существенному обострению амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), повышению резонансной частоты излучателя на величину до 300 Гц и быстрому сильному увеличению его добротности. При восстановлении акустической нагрузки («сдувании газовой «подушки» с излучателя) происходит быстрое снижение добротности и резкое «уплощение» АЧХ. Для работы в таких условиях была разработана система автоматического регулирования частоты со специальными характеристиками. Эта система управления, с одной стороны, позволяет осуществлять быстрый поиск резонансной частоты при резком падении акустической нагрузки (при появлении газовой среды вокруг излучателя); с другой стороны, она обеспечивает точную перестройку резонансной частоты при возвращении акустической нагрузки в норму (при «сдувании газовой «подушки» с излучателя) и ее стабильное поддержание. Система управления основывается на алгоритме экстремального регулирования.

3. Оптимизация работы УЗА

При некоторых технологических процессах приходится располагать УЗГ и излучатель на расстоянии до нескольких километров. Связь между ними обеспечивается специальными электрическими кабелями, которые должны работать в условиях высоких температур, высоких давлений, агрессивной химической среды и при высоком радиоактивном излучении. Такие кабели изготавливают по принципу витой пары с экранирующим бронированием и применением полимерных материалов с низкой диэлектрической проницаемостью. Во время работы УЗА эти длинные кабели проявляют свойства электрических элементов с распределенными параметрами. Для учета влияния этих параметров определяют погонные значения индуктивности, емкости и активного сопротивления. По этим характеристикам производят расчеты в соответствии с теорией длинных линий. Определяют волновые параметры кабеля (волновое сопротивление, фазовая задержка, волновая длина). Эти параметры сильно зависят от частоты передаваемого возбуждения и характеристик внешней среды. В случае рассогласованного режима работы такого кабеля с излучателем определяется степень отражения электрической энергии от конца кабеля, рассчитываются потери, согласовываются режимы возбуждения ПМС. Также при длине кабеля в несколько километров имеется опасность возникновения четвертьволнового режим этого кабеля на основной частоте возбуждения ПМС. Нами разработаны технические решения выделения основной гармоники возбуждения излучателя и подавления высокочастотных гармоник в

электрическом сигнале, проходящем по кабелю. Применяются схемы искусственного увеличения волновой длины реального кабеля. Компенсируются изменения волновых характеристик кабеля от воздействий внешней среды при эксплуатации кабеля.

При работе в среде с низкой плотностью остро стоит задача максимизации передаваемой энергии [1-5]. По закону прохождения волны через границу раздела сред с разной плотностью происходит увеличение энергии отраженной при росте отношения плотностей сред. Так, акустическая энергия, передаваемая менее плотным титановым волновым инструментом, существенно выше энергии, передаваемой стальным инструментом в среду низкой плотности – воду. Для перехода на использование титановых инструментов была отработана технология пайки пермендюрного пакета к титановому волноводу с использованием индукционного нагрева.

Другим аспектом оптимизации работы УЗА при вынужденном удалении излучателя от УЗГ является уменьшение токовой нагрузки на жилы кабеля. Согласно общепринятой схеме питания магнитостриктора, по кабелю пропускается ток подмагничивания и ток возбуждения. Ток подмагничивания выводит ПМС в рабочую точку магнитострикционной характеристики. При протекании этого тока через медные жилы кабеля происходят большие активные потери с выделением тепла. Существуют теоретические разработки конструирования ПМС, обеспечивающие подмагничивание ПМС с помощью постоянных магнитов. Это решение позволяет исключить необходимость пропуска тока подмагничивания по кабелю и упрощает конструкцию УЗГ (убирается блок подмагничивания). Данное техническое решение принесет существенную экономию при выходе на серийное производство УЗА. Проработан вопрос организации выпуска необходимых постоянных магнитов в РФ.

4. Система управления УЗГ

Наиболее важным узлом УЗГ является система управления силовыми транзисторами инвертора. Эта система управления должна обладать высокой помехоустойчивостью (точность включения и выключения транзистора). Система управления должна обеспечивать эффективное управление силовыми транзисторами: точно формировать импульс с крутым фронтом для открытия транзистора и импульс для закрытия транзистора. Цифровые элементы часто имеют погрешность пропуска одного или нескольких импульсов. Это может приводить к сбою работы УЗГ и выходу его из строя. На наш взгляд более надежной, гарантированно выдающей импульс управления транзисторами является аналоговая схема генератора, управляемого напряжением (ГУН). Изменение управляющего напряжения ГУН производится с помощью цифро-аналогового преобразователя. Он располагается в микроконтроллере, исполняющем функцию управления частотой и мощностью УЗГ. Сбор информации о режиме работы УЗА (тока, напряжения) производится встроенным в микроконтроллер аналого-

цифровым преобразователем. Индикация этих параметров производится на собственном мониторе, установленном на лицевой панели УЗГ. Также этот микроконтроллер осуществляет двухстороннюю связь с программно-логическим комплексом (ПЛК) верхнего уровня АСУТП УЗА.

ПЛК управляет режимами работы УЗГ, управляет его состояниями (включен, выключен, повторный запуск, перезагрузка), получает необходимую технологическую информацию (температура, давление, плотность, скорость протока среды, в которой находится излучатель). На основе этих данных ПЛК, используя запрограммированный локальный алгоритм управления, формирует команды управления УЗГ. Через блок GSM-связи, встроенный в ПЛК, УЗА подключается к центральному диспетчерскому пункту управления. Протоколирование собранной информации позволяет оценивать эффективность работы каждого комплекта, оценивать работоспособность и планировать работы по обслуживанию УЗА.

Заключение

Изложенные выше технологии и усовершенствования УЗА, основанной на магнитострикционном эффекте, позволяют повысить ее КПД и приблизить его к КПД УЗА на пьезокерамике. Надежность и прочность магнитострикционного инструмента позволяет использовать его в условиях высоких давлений, температур, механических нагрузок и при существенном удалении инструмента от УЗГ.

Список литературы:

1. *Бергман Л.* Ультразвук и его применение в науке и технике. М.: ИИЛ, 1957.
2. Сб. Источники мощного ультразвука. *Под редакцией Л.Д.Розенберга.* М., «Наука», 1968.
3. *Теумин И.И.* Ультразвуковые колебательные системы. Москва: Машгиз, 1959.
4. *Донской А.В., Келлер О.К., Кратыш Г.С.* Ультразвуковые электротехнологические установки. Ленинград. Энергоиздат. Ленинградское отделение, 1982.
5. Мощный ультразвук в металлургии и машиностроении / *Под ред. Абрамова О.В. и Приходько В.М.* – М.: Янус –К, 2006.
6. *Петушко И.В.* Оборудование для ультразвуковой обработки, Санкт-Петербург, 2005г.
7. Авторское свидетельство №997205 (СССР). Последовательный автономный инвертор. *В.В. Шипицын, В.И. Лузгин, А.А. Рухман и др.*

УДК: 534.2

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39671

Анализ результатов ультразвуковой модификации поверхности древесины после длительного хранения

А.А. Вьюгина^{1,a}, С.Н. Вьюгинов^{2,b}, Л.Л. Леонтьев^{3,b}, А.А. Новик^{2,b}

¹ СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 197022, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, д. 5.

² ООО «ИНЛАБ - Ультразвук», 194044, Санкт-Петербург, ул. Чугунная, д. 20.

³ СПбГЛТУ им. С.М. Кирова, 194021, Институтский пер. 5, Санкт-Петербург

E-mail: aavyuginova@etu.ru, inlab@utinlab.ru, leontyev-lta@mail.ru

Аннотация: Рассматриваемая технология ультразвуковой модификации древесины позволяет получить значительное улучшение характеристик поверхностного слоя – плотности и твердости – с использованием ультразвукового оборудования проходного типа, обеспечивающего возможность непрерывной обработки. В данной работе анализируется стабильность во времени результатов ультразвуковой обработки древесины осины (*Populus tremula*) после длительного хранения в течение нескольких лет в условиях отапливаемого помещения, рассмотрены образцы, отличающиеся степенью модификации. Исследование макро- и микро-свойств модифицированной поверхности древесины показало их стабильность во времени, отсутствие значимых релаксационных процессов во время хранения для всех образцов – при увеличении значений твердости поверхности после ультразвуковой обработки в 2-4 раза снижение твердости после хранения не превышает нескольких процентов, обоснован механизм ультразвуковой модификации древесины, включающий пластификацию лигнина. Полученные результаты подтверждают потенциал рассматриваемой технологии ультразвуковой модификации поверхности древесины.

Ключевые слова: модификация древесины; твердость древесины; плотность древесины; ультразвуковая технология; мощный ультразвук

Analysis of the results of wood surface ultrasonic modification after long-term storage

A.A. Vjuginova^{1,a}, S.N. Vjuginov^{2,b}, L.L. Leontyev^{3,b}, A.A. Novik^{2,b}

¹ *Department of Electroacoustics and Ultrasonic Engineering, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", 5 Professora Popova street, St. Petersburg, 197376, Russia*

² *LLC «INLAB - Ultrasonic», 20 Chugunnaya st., St. Petersburg, 194044, Russia*

³ *Department of Wood Science and Forest Protection, Saint Petersburg State Forest Technical University, 5 Institute per., St. Petersburg, 194021, Russia*

E-mail: ^aaavyuginova@etu.ru, ^binlab@utinlab.ru, ^cleontyev-lta@mail.ru

Abstract: The considered technology of ultrasonic modification of wood allows to obtain a significant improvement in the characteristics of the surface layer – density and hardness – using ultrasonic equipment of the pass-through type, providing the possibility of continuous processing. In this work, the stability in time of the results of ultrasonic processing of aspen wood (*Populus tremula*) after long-term storage for several years in conditions of a heated room is analyzed, samples differing in the degree of modification are considered. The study of the macro- and micro-properties of the modified wood surface showed their stability over time, the absence of significant relaxation processes during storage for all samples – with an increase in the surface hardness values after ultrasonic processing by 2-4 times, the decrease in hardness after storage does not exceed a few percent, the mechanism of ultrasonic modification of wood, including lignin plasticization, is substantiated. The obtained results confirm the potential of the considered technology of ultrasonic modification of the wood surface.

Keywords: wood modification; wood hardness; wood density; ultrasonic technology; power ultrasound

PACS: 43.35.Zc

Введение

Древесина – широкодоступный природный возобновляемый ресурс, с древнейших времен человечество использовало древесину для изготовления различных объектов необходимых для повседневной жизни и деятельности и, конечно, для строительства и внутреннего обустройства своих домов.

Переход к расширению использования возобновляемых природных ресурсов и внедрение более экологичных методов их обработки имеет большое значение для устойчивого развития общества [1]. Древесина как природный ресурс и строительный, отделочный материал обладает как рядом общеизвестных достоинств, таких как возобновляемость,

относительные простота обработки и использования, приемлемая стоимость, также имеет и известные недостатки, такие как недостаточные в ряде случаев прочность, плотность и твердость, химическая и биологическая стойкость и др., которые можно преодолеть с помощью различных методов модификации – их подробный анализ представлен в [2-3].

Различные технологии модификации, обработки и пропитки позволяют изменить структуру материала и улучшить физико-механические свойства древесины – повысить плотность, твердость, прочность, износостойкость, истираемость, снизить водопоглощение, повысить пожаро- и биостойкость материала, улучшить его декоративные свойства [4-7]. Отдельный интерес представляют технологии модифицирования малоценной древесины мягких пород [8], которые могут стать эффективным способом восполнения дефицита высококачественной менее доступной и более дорогой древесины, позволят уменьшить проблему нехватки древесины с заданными свойствами.

Одна из задач модификации древесины – повышение плотности и твердости поверхностного слоя для изделий из недорогих пород. Задача повышения качества поверхности древесины стоит во всем мире, с целью разработать соответствующие технологические процессы проведено и проводится множество исследований. Исследователи отмечают, что технология поверхностного уплотнения должна быть высокоскоростной, экономичной и энергоэффективной [2], такими свойствами могут обладать устройства, реализующие принцип непрерывной обработки. В этом случае, в том числе, стоимость конечного продукта не будет выходить из категории доступных материалов. Именно о технологии непрерывной ультразвуковой обработки поверхности древесины идет речь в данной работе.

В работе исследуется стабильность результатов ультразвуковой модификации древесины после длительного хранения: для образцов осины (*Populus tremula*), поверхность которых была подвергнута ультразвуковой обработке в трех различных режимах, повторно измерялась твердость поверхности после хранения в течение более 5 лет. Результаты исследования важны для определения возможностей использования изделий из древесины, модифицированных ультразвуковым методом.

1 Метод ультразвуковой модификации поверхности древесины

Воздействие мощных ультразвуковых колебаний в сочетании с механическим давлением на поверхность древесины создает на ее поверхности слой с улучшенными свойствами – увеличенными плотностью и твердостью. Рассматриваемая ультразвуковая технология для осуществления уплотнения, модификации и улучшения качества поверхностного слоя древесины осуществляется с помощью ультразвукового устройства проходного типа: изделие

из древесины с плоскопараллельными поверхностями подается гидравлической транспортной системой в модуль ультразвуковой обработки, где верхняя и нижняя поверхность изделия подвергаются воздействию мощных ультразвуковых колебаний, создаваемых расположенными друг напротив друга ультразвуковыми волноводами, и механического давления (рис. 1). При этом технология не требует нагрева или использования химических пропиток, важно, что технология реализуется за один проход через устройство при скорости обработки несколько метров в минуту [9-12]. Ранее возможности применения мощных ультразвуковых полей в сочетании с давлением для воздействия на древесину были описаны в нескольких патентах, например, для круглой цельной древесины [13-14], при этом в ранее описанных вариантах ультразвуковые колебания воздействовали на матрицу или фильеру.

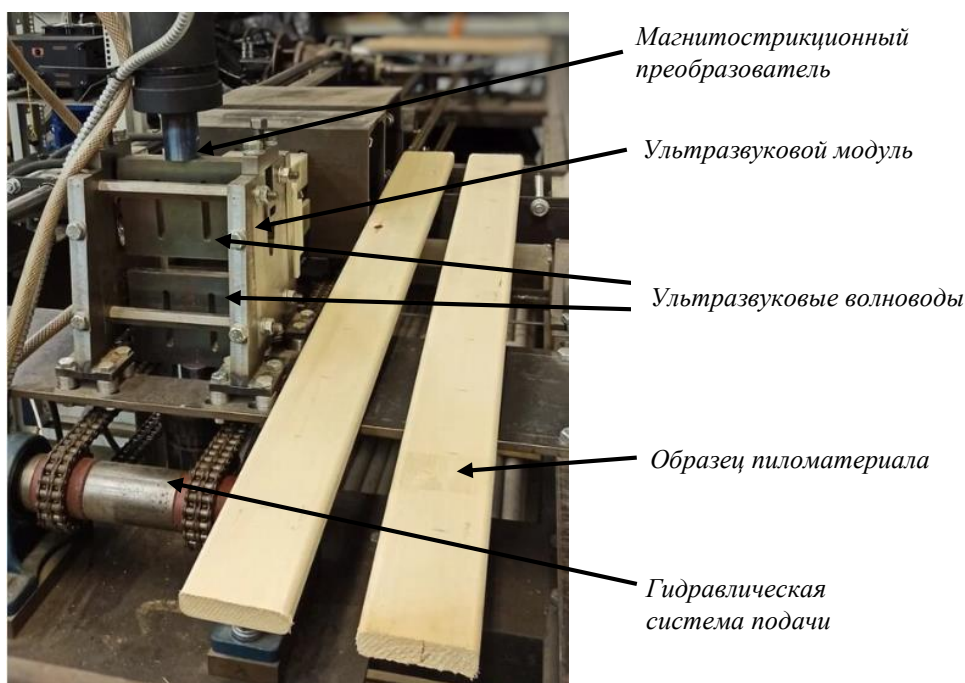


Рис. 1. Ультразвуковое оборудование для обработки древесины

Ультразвуковой модуль рассматриваемого ультразвукового устройства, представляющий собой два ультразвуковых волновода, находящихся с непосредственным контакте с поверхностью древесины – что обеспечивает высокоинтенсивное воздействие с высокой амплитудой, имеет регулируемый зазор. В процессе обработки зазор имеет меньшую толщину, чем толщина заготовки. Разница между этими значениями является параметром обработки Δ , характеризует ее степень. После обработки на обеих поверхностях заготовки образуются модифицированные слои, которые имеют повышенную плотность, твердость, уменьшенную пористость.

2 Образцы и способы их оценки

При хранении обработанных пиломатериалов основным фактором внешней среды,

который может повлиять на их свойства, является влажность. Поскольку одно из возможных направлений применения технологии ультразвуковой модификации поверхности древесины – это улучшение качества строительных и отделочных материалов, которые используются для внутренней отделки помещений, то важным является подтверждение долговременной стабильности результатов модификации при нахождении в помещении. Для проведения экспериментов была выбрана осина, как одна из наиболее подходящих пород для осуществления уплотнения.

Изначально были подготовлены три полноразмерных образца осины (*Populus tremula*) влажностью 12%, длиной 2.5 м, толщиной 27.8 мм и шириной 90 мм. Они были подвергнуты ультразвуковой обработке с помощью описанного ультразвукового оборудования с параметрами обработки $\Delta = 1.8$ мм, 2.8 мм и 3.8 мм и скоростью обработки 4 м/мин. Твердость поверхности оценивалась вдоль образцов до и после обработки по продольной координате L с шагом 100 мм, для каждой координаты измерение проводилось в трех точках, затем результаты этих трех измерений усреднялись.

Для подтверждения стабильности полученных результатов повышения твердости поверхности после ультразвуковой обработки была повторно измерена твердость образцов после более 5 лет хранения в отапливаемом помещении при относительной влажности воздуха $55 \pm 15\%$, в условиях, которые соответствуют ряду стандартов (например, ГОСТ 862.1-2020).

Для измерения твердости поверхности использовался прибор для определения твердости MET-UD, основанный на методе Либа (ASTM A956-02), который подходит для измерения твердости поверхностного слоя толщиной 1-2 мм без повреждений. По методу Либа определяется соотношение скорости бойка до (V_0) и после (V_1) столкновения с поверхностью, значение твердости при этом определяется как $HL = 1000 \cdot V_1/V_0$. Таким образом, данный метод позволяет оценить относительное изменение твердости поверхности древесины.

Для изучения внутренней структуры образцов древесины после хранения использовался сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) Hitachi TM4000Plus. Срез представлял собой полный поперечный срез из средней части образцов с минимальной ($\Delta = 1.8$ мм) и максимальной ($\Delta = 3.8$ мм) степенью ультразвуковой обработки.

3 Результаты

Полученные результаты измерений твердости приведены в табл. 1, более подробное описание результатов представлено в [15]. Как видно для образца с наименьшим параметром обработки, $\Delta = 1.8$ мм, в среднем увеличение твердости после ультразвуковой обработки составляет 2.4 раза, а снижение после хранения – 6.6%. Для образца с $\Delta = 2.8$ мм в среднем увеличение составляет 3.2 раза, а снижение после хранения – 3.4%. Для образца с наибольшим

параметром обработки, $\Delta=3.8$ мм, в среднем увеличение составляет 3.7 раза, а снижение после хранения – 2.4%. Таким образом, наблюдается незначительное снижение твердости поверхности древесины после длительного хранения. Это снижение меньше для образцов с более высокой степенью ультразвуковой обработки. Полученные результаты подтверждают стабильность полученной твердости поверхности древесины в данных условиях.

Таблица 1

Результаты измерения твердости

Δ , степень обработки – разница между толщиной образца и толщиной зазора (мм)	Исходная твердость (НЛ)	Твердость после ультразвуковой обработки (НЛ)	Твердость после хранения (НЛ)
1.8	113±13	271±25	253±13
2.8	119±18	379±16	366±13
3.8	113±16	414±23	404±17

Ниже представлены результаты исследований внутренней структуры образцов после хранения с использованием СЭМ для двух вариантов параметров обработки: минимального ($\Delta = 1.8$) – рис. 2, а, и максимального ($\Delta = 3.8$) – рис. 2, б.

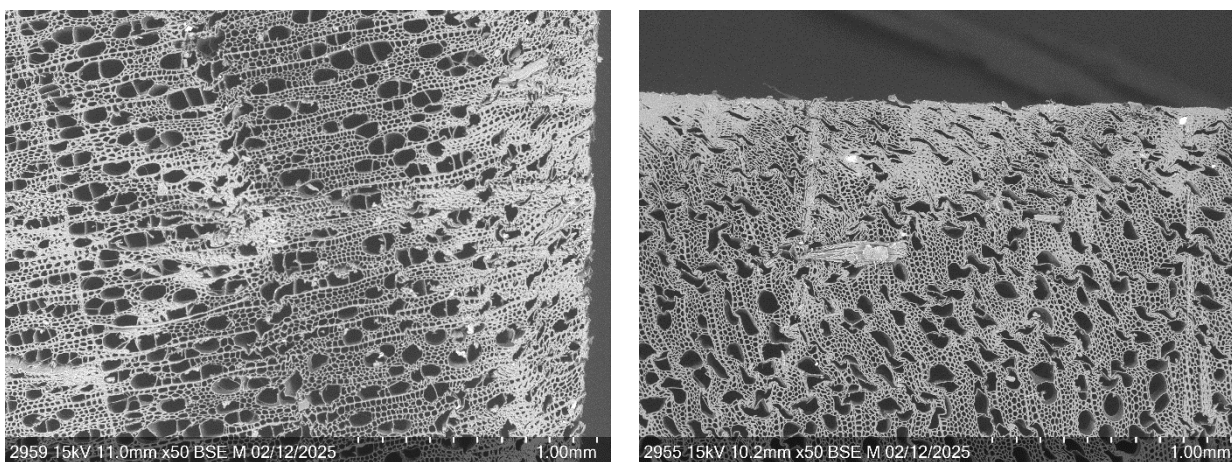


Рис. 2. СЭМ-изображения срезов образцов: а – $\Delta = 1.8$; б – $\Delta = 3.8$.

По результатам изучения внутренней структуры образцов видно, что деформации в образцах древесины после длительного хранения сохраняются. В образце с минимальным параметром обработки наблюдается значительная поперечная деформация клеток на глубину до 0.7 мм со смещением в сторону наклона сердцевинных лучей, частичная деформация на глубине 1.0 мм под слоем недеформированных клеток. В образце с максимальным параметром обработки наблюдается значительная поперечная деформация клеток на глубину до 3-3.5 мм со смещением в сторону наклона сердцевинных лучей, а при перпендикулярном к поверхности направлении лучей – с зигзагообразным смятием. При этом аналогично для обоих образцов полости сосудов и волокон независимо от поперечного размера клетки в поверхностной зоне

образца практически исчезают или принимают щелевидную форму без разрыва клеточных оболочек, сердцевинные лучи искривляются и загибаются.

Анализ СЭМ-изображений позволяет сделать важный вывод о том, что структура клеточных стенок древесины не повреждается при ультразвуковой обработке, видимые повреждения структуры после хранения также отсутствуют. Повреждения внутренней структуры приводили бы к снижению прочности и ухудшению механических свойств древесины. В данном случае все деформации носят пластический характер и сохраняются при хранении. Этот факт подтверждает, что механизм ультразвуковой модификации включает в себя режим пластификации лигнина, что позволяет зафиксировать сжатый поверхностный слой древесины. Кроме того, обработанная поверхность имеет пониженную пористость, что также уменьшает влияние внешних факторов. Эти результаты для микроструктуры обеспечивают стабильность макроскопических свойств поверхности древесины при хранении.

Заключение

Была исследована стабильность результатов ультразвуковой модификации поверхности древесины после длительного хранения. Твердость поверхности образцов осины (*Populus tremula*) была измерена после обработки и повторно после хранения в течение более 5 лет в отапливаемом помещении при относительной влажности $55 \pm 15\%$. Показано, что снижение твердости после хранения незначительно и не превышает нескольких процентов.

Показано, что клеточные стенки древесины не повреждаются при ультразвуковой обработке, видимые повреждения структуры после хранения отсутствуют. Этот факт подтверждает, что механизм ультразвуковой модификации включает в себя режим пластификации лигнина. Все наблюдаемые деформации в поверхностном слое древесины имеют пластическую природу и сохраняются при хранении. Эти результаты для микроструктуры древесины обеспечивают стабильность макроскопических характеристик твердости поверхности при хранении без заметных релаксационных изменений.

Полученные результаты подтверждают потенциал ультразвукового метода для модификации поверхности древесины, поскольку внутренняя структура и твердость поверхности характеризуются стабильностью во времени.

Список литературы

1. Olivetti E.A, Cullen J.M. Toward a sustainable materials system // Science. 2018. **360**. P. 1396.
2. Sandberg D., Kutnar A., Karlsson O., Jones D. Wood Modification Technologies: Principles, Sustainability, and the Need for Innovation. Boca Raton: CRC Press, 2021.
3. Hill C.A.S. Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Processes. Chichester, UK: Wiley and Sons, 2006.

4. *Zelinka S.L., Altgen M., Emmerich L., Guigo N., Keplinger T., Kymäläinen M., Thybring E.E., Thygesen L.G.* Review of Wood Modification and Wood Functionalization Technologies // *Forests*. 2022. **13**. P. 1004.
5. *Zhang B., Pizzi A., Petrissans M., Petrissans A., Colin B.* A melamine–dialdehyde starch wood particleboard surface finish without formaldehyde // *J. of Renewable Materials*. 2023. **11**. P. 3867.
6. *Mubarok M., Gérardin-Charbonnier C., Azadeh E., Akong F.O. et al.* Modification of wood by tannin-furfuryl alcohol resins–effect on dimensional stability, mechanical properties and decay durability // *J. of Renewable Materials*. 2023. **11**. P. 505.
7. *Hill C.A.S., Altgen M., Rautkari L.* Thermal modification of wood – a review: chemical changes and hygroscopicity // *J. of Materials Science*. 2021. **56**. P. 6581.
8. *Sandberg D., Kutnar A., Mantanis G.* Wood modification technologies – a review // *iForest*. 2017. **10**. P. 895.
9. *Иванов В.А., Новик А.А., Новик А.А., Новик А.А.* Устройство для ультразвуковой обработки древесины. Патент RU2419537, 2011.
10. *Вьюгинова А.А., Вьюгинов С.Н.* Устройство для ультразвуковой обработки пиломатериалов. Патент RU130909, 2013.
11. *Vjuginova A.A., Novik A.A., Vjuginov S.N., Ivanov V.A.* Ultrasonic modification for improvement of wood-Surface properties // *Wood Material Science & Engineering*. 2023 (online: 2021). **18**. P. 193.
12. *Вьюгинова А.А., Вьюгинов С.Н., Новик А.А.* Устройство для ультразвуковой модификации пиломатериалов. Патент RU213732U1, 2022.
13. *Базаров С.М., Гурьянов А.В., Легуша Ф.Ф., Пугачев С.И.* Способ уплотнения и формообразования изделий из цельной древесины и устройство для его осуществления. Патент RU2089385, 1997.
14. *Sun-Tae An.* Method and apparatus for increasing the hardness and intensity of wood. Patent WO2000013865A3, 2000.
15. *Vjuginova A.A., Leontyev L.L.* Ultrasonic Modification of Wood Surface: Study of Macro and Micro Properties after Long-Term Storage // *J. of Renewable Materials*. 2025. **13**. P. 1819.

УДК: 534.8.081.7

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39672

Ультразвуковая визуализация объемной микроструктуры углепластиков при циклических изгибных нагрузках

Володарский А.Б.^a, Мороков Е.С.^b

Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля Российской академии наук, Москва.

E-mail: ^asashavolodarski@gmail.com, ^b es_morokov@yahoo.com

Аннотация: В углепластиковом композите исследована эволюция внутренних повреждений при изгибном нагружении. Сравнены результаты, полученные для образцов с одинаковой укладкой волокон, но различными полимерными матрицами. Для исследования морфологии дефектов применялся метод сканирующей ультразвуковой акустической микроскопии. Было выявлено, что тип матрицы определяет характер и динамику накопления повреждений, существенно влияя на стойкость материала к изгибному нагружению.

Ключевые слова: акустическая микроскопия, углепластик, изгибное нагружение, визуализация микроструктуры.

Ultrasonic visualization of the volume microstructure of carbon fiber reinforced plastics under cyclic bending loads

A.B. Volodarskii^a, E.S. Morokov^b

*Emanuel Institute of Biochemical Physics of Russian Academy of Sciences. Moscow 119334,
Russia.*

E-mail: ^asashavolodarski@gmail.com, ^b es_morokov@yahoo.com

Abstract: The evolution of internal damage under bending loading was studied in a carbon fiber composite. Results obtained for samples with the same fiber arrangement but different polymer matrices were compared. Scanning ultrasonic acoustic microscopy was used to study the defect morphology. It was found that the matrix type determines the nature and dynamics of damage accumulation, significantly affecting the material's resistance to bending loading.

Keywords: acoustic microscopy, carbon fiber, bending loading, microstructure visualization

PACS: 43.58.Ls

УДК: 534-13.

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39673

Развитие ультразвуковой сварки при производстве изделий медицинского назначения

В.Н. Хмелев^{1,a}, Р.В. Барсуков^{1,b}, В.А. Нестеров^{1,c}, Д.В. Генне^{1,d}, А.В. Цхе^{2,e}

¹⁾ Бийский технологический институт, г. Бийск

²⁾ ООО «Профит-фарм», г. Москва;

E-mail: ^avnh@u-sonic.ru, ^broman@u-sonic.ru, ^cnva@u-sonic.ru, ^dgdv@u-sonic.ru,
^ealex414@mail.ru.

Аннотация: Одним из востребованных направлений применения ультразвуковой сварки является производство изделий медицинского назначения, к которым относятся гибкие полимерные пакеты, используемые хранения различных медицинских препаратов, забора и хранения крови, а так же и ее производных компонентов. Существующее оборудование для производства таких изделий на базе ТВЧ технологии имеет ряд недостатков, таких как: большие энергозатраты, требовательность к свойствам свариваемых материалов и окружающим условиям, проблемы при сварке разнородных материалов, относительно большое время формирования сварного соединения.

Исследования возможностей применения УЗ сварки для производства подобных изделий медицинского назначения позволили разработать технологии для: сварки листовых материалов (двух- трехслойные конструкции), сваривания элементов различной конфигурации (сваривание, так называемых, портов в тело полимерного пакета), сварки разнородных материалов (например, приваривание к основному материалу изделия паропрозрачных мембран и т.п.), формирования линейных и криволинейных протяженных сварных швов, сварных швов с замкнутым периметром, герметизации трубчатых магистралей гемоконтейнеров. В результате проведенных исследований создано оборудование для производства полимерных пакетов различного назначения, используемых службами крови, а так же УЗ оборудования для герметизации гемоконтейнеров, которое отличается высокой производительностью, экономичностью и обеспечивает требуемое качество продукции.

Ключевые слова: ультразвук, сварка, контроль, качество, кровь.

Development of ultrasonic welding in the production of medical products

V.N. Khmelev^{1,a}, R.V. Barsukov^{1,b}, V.A. Nesterov^{1,c}, D.V. Genne^{1,d}, A.V. Tche^{2,e}

¹⁾ Biysk Technological Institute, Biysk;

²⁾ ООО «Profit-farm», Moscow;

E-mail: ^avnh@u-sonic.ru, ^broman@u-sonic.ru, ^cnva@u-sonic.ru, ^dgdv@u-sonic.ru,

^ealex414@mail.ru.

Abstract: One of the most popular applications of ultrasonic welding is the production of medical devices. These include flexible polymer bags used to store various medications, blood collection and storage, and blood derivatives. Existing high-frequency welding equipment has several drawbacks. These include high energy consumption, high demands on the properties of the materials being welded and environmental conditions, problems when welding dissimilar materials, and a relatively long weld formation time. Research in ultrasonic welding has enabled the development of equipment and refined technologies for: welding sheet materials (two- and three-layer structures), welding elements of various configurations (welding so-called ports into the body of a polymer bag), welding dissimilar materials (for example, welding vapor-permeable membranes to the base material of the product, etc.), forming linear and curved extended welds, and welds with a closed perimeter. As a result of the research conducted, equipment was created for the production of polymer bags for various purposes used by blood services, which is characterized by high productivity, cost-effectiveness, and quality.

Keywords: ultrasound, welding, control, quality, blood.

PACS: 07.64.+z

Введение

Ультразвуковая сварка (УЗ) популярна в различных отраслях промышленности. Технология позволяет создавать прочные неразъемные соединения металлов и пластмасс без нагрева до температуры плавления. Основными преимуществами ультразвуковой сварки перед другими видами сварки являются: повышенная производительность, высокая прочность соединения; широкий диапазон соединяемых материалов различной толщины, высокая стабильность, минимальная деформация заготовок; сварка без очистки загрязненных поверхностей, отсутствие вредного воздействия на экологию и необходимости в дополнительных расходных материалах; небольшая мощность оборудования и, как следствие, низкое энергопотребление. Одним из перспективных и востребованных направлений применения ультразвуковой сварки является производство изделий медицинского назначения, к которым относятся гибкие полимерные пакеты (гемоконтейнеры), используемые для хранения различных медицинских препаратов, забора и хранения крови и ее компонентов. Существующее оборудование для производства таких изделий на базе ТВЧ технологии имеет ряд недостатков, таких как: большие энергозатраты, необходимость использования материалов только с определенными свойствами, необходимость создания определенных условий по влажности на производстве, сложности соединения разнородных материалов, относительно большое время формирования сварного соединения.

Углубленные исследования механизмов УЗ сварки, а так же исследования возможностей применения УЗ сварки для производства подобных изделий медицинского назначения позволили отработать технологии и создать оборудование для: сварки листовых материалов (двух- трехслойные конструкции), сваривания элементов различной конфигурации (сваривание, так называемых, портов в тело полимерного пакета), сварки разнородных материалов (например, приваривание к основному материалу изделия паропрозрачных мембран и т.п.), формирования линейных и криволинейных протяженных сварных швов, сварных швов с замкнутым периметром. Кроме того, в результате проведенных теоретических и практических исследований удалось создать оборудование, предназначенное не только для производства изделий, используемых службами крови (пластиковые гемоконтейнеры), но и оборудование для его непосредственного использования службами крови, например, для герметизации трубчатых магистралей гемоконтейнеров при заборе, хранении или переработки крови и ее компонентов.

Результаты теоретических и практических исследований УЗ сварки

Для проведения теоретических исследований влияния УЗ энергии на реологические свойства полимерных материалов и выявления оптимальных условий и режимов реализации УЗ сварки была построена нелинейная математическая модель распространения акустических

колебаний в расплавах полимеров [6]. Анализ модели позволил подтвердить возможность возникновения кавитации в расплавах полимерных материалов, которая может являться одним из главных интенсифицирующих факторов диффузионных процессов.

Кроме того, работа с моделью позволила установить, что на границах свариваемых материалов возможно возникновение капиллярных волн, позволяющих увеличивать межфазную поверхность до 1,5 раз и более, тем самым ускоряя скорость взаимопроникновения материалов при сварке.

Наличие кавитационных явлений в расплавах полимеров было экспериментально подтверждено с помощью разработанного оптикоэлектронного измерительного стенда, в основу которого, в частности, положен принцип [7] рассеяния оптического излучения на неоднородностях, находящихся в ней. Кавитационные пузырьки выступают в качестве неоднородностей в прозрачных расплавах полимеров. Были получены спектры (см. рис. 1, а) рассеянного излучения, на выходе оптического датчика при просвечивании прозрачного расплава полимерного материала в присутствии УЗ полей высокой интенсивности. Яркие пики на спектральной картине свидетельствуют о том, что в расплаве полимеров возникают условия для кавитационных явлений (зарождения пульсирующих газовых пузырьков).

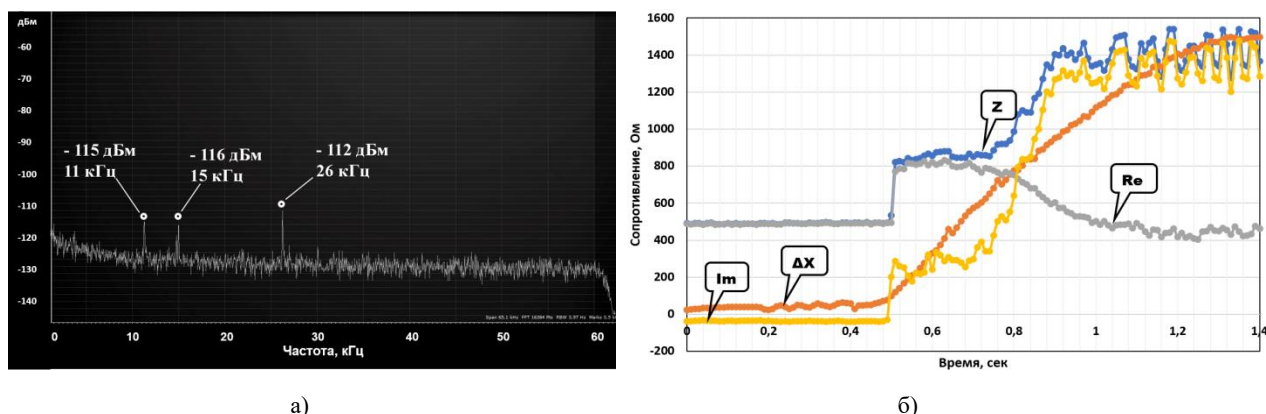


Рисунок 1 - Спектр рассеянного сигнала а); зависимость импеданса УЗ излучателя б).

При этом, с одной стороны, кавитация в полимере содействует процессу сварки, ускорения диффузионные процессы на границе соединения материалов, но, с другой стороны, наличие вырожденных пузырьков (не коллапсирующих при УЗ воздействии), может приводить к образованию газовых полостей, которые ослабляют сварной шов после его остывания.

В связи с этим, возникает необходимость контроля процесса сварки с учетом необходимости формирования в полимере кавитационного процесса, но исключения, при этом, режима формирования резонансных долгоживущих пузырьков, образующих нежелательные полости при завершении процесса.

Полученные в ходе воздействия на расплав полимера спектры были сопоставлены с электрическими измерениями импеданса УЗ излучателя Z [8], его действительной Re и

мнимой Im составляющих (см. рис. 1, б), и совокупностью данных о прочности формируемых сварных соединений. Это позволило выявить условия необходимого и достаточного воздействия на полимер (точку на спадающем склоне зависимости $Re = f(t)$, где t – время). Из серии тестовых сварок образцов в количестве 250 шт. и проверки их на разрыв было установлено, что при реализации выбранных условий и режимов сварки, количество сварок, прочность соединения материалов в которых составляет не менее 80% от прочности исходного материала, составляет 89.6%.

Результаты исследований, а также выявленный критерий оптимальности УЗ воздействия на процесс сварки были положены в основу созданного УЗ оборудования.

Использование результатов теоретических и практических исследований

На рис. 2 представлено фото созданного автономного ультразвукового запаивателя, предназначенного для герметизации трубчатых медицинских магистралей. Потребность в таких устройствах особенно актуальна для условий, где затруднен доступ к питающей электрической сети, а так же для полевых условий. Так же на рис. 2 показано фото рабочей части УЗ головки запаивателя с установленной трубчатой магистралью, и фото образца формируемого герметизирующего шва.

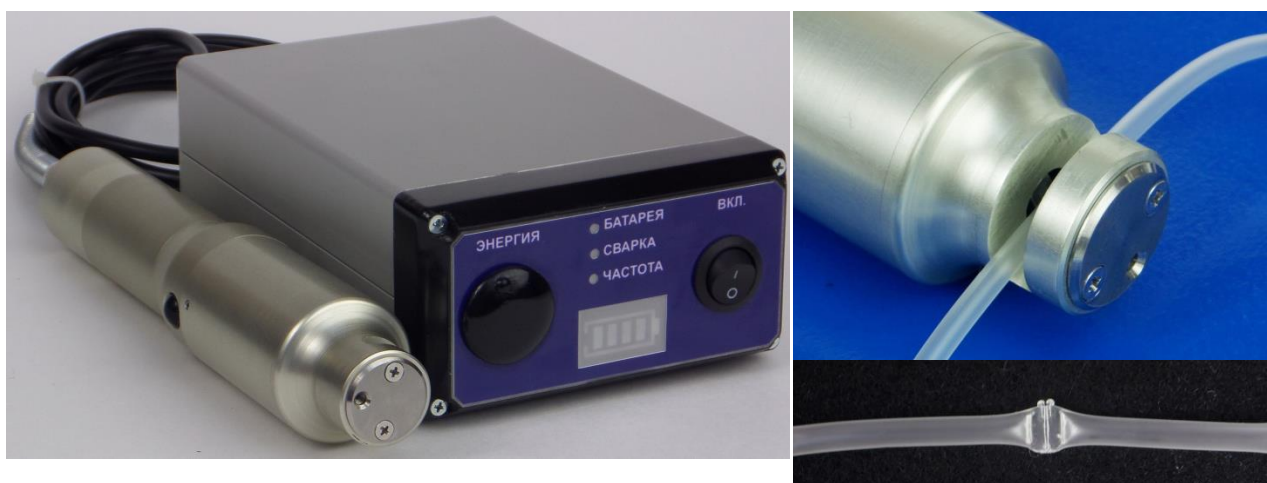


Рисунок 2 - Фото ручного автономного ультразвукового запаивателя с образцом формируемого герметизирующего шва

Автономный ультразвуковой запаиватель имеет следующие технические характеристики и особенности: область применения - службы крови, смежные отрасли; принцип сварки - ультразвуковой; частота ультразвукового воздействия - 44 кГц; тип питания - встроенный аккумулятор; режим работы – полуавтоматический; диаметр свариваемых трубок - от 3 до 5 мм; время сварки - до 2 сек; максимальное количество сварок – не менее 700; масса всего аппарата - 1000 г; масса сварочной головки - 400 г.

На рис. 3, а показано фото производственной линии, предназначенной для производства пластиковых контейнеров для забора и сушки компонентов крови. Линия содержит четыре независимые сварочные УЗ установки и электронные блоки управления, смонтированные на

единой стойке. При помощи созданной установки реализуются следующие операции: приваривание паропрозрачной мембраны к одной из стенок гемоконтейнера; вваривание двух диаметрально расположенных портов (штуцер для подачи/слива препаратов крови в/из гемоконтейнер) между стенками формируемого гемоконтейнера; формирование двух поперечных и двух продольных швов, образующих герметичный замкнутый периметр гемоконтейнера. На рис. 3, б показано фото изготовленных пластиковых пакетов для забора и сушки компонентов крови.

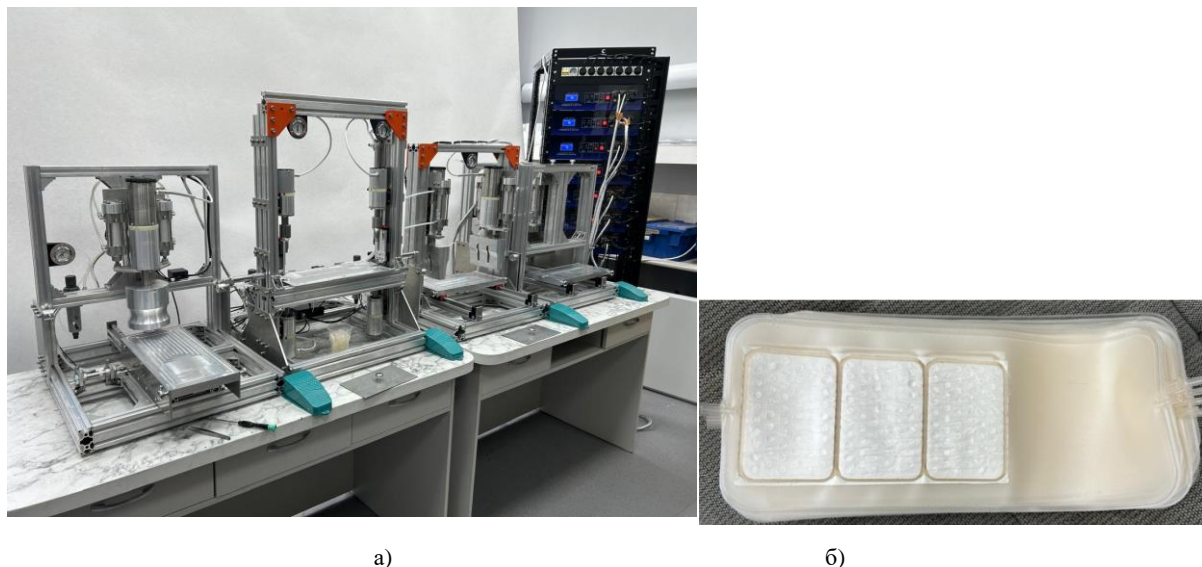


Рисунок 3 - Фото установок для изготовления пластиковых контейнеров для забора и сушки компонентов крови

Линия, представленная на рис. 3, а, имеет следующие технические характеристики и особенности: тип питающей сети – однофазная 220 Вольт; суммарная потребляемая мощность (в режиме одновременной работы всех сварочных узлов) – 3000 Вт; время выполнения одной операции сварки - от 0.5 сек до 1.5 сек.; требование к пневматической сети – давление не менее 6 атм, расход сжатого воздуха 10 л/мин; количество требуемых операторов линии – от 1 до 4. Линия предназначена для работы с ПВХ материалами. Имеется возможность регулировки параметров УЗ сварки при использовании различных свариваемых материалов (время сварки, амплитуда ультразвукового воздействия, сила сжатия свариваемых материалов).

На рис. 4, а показано фото производственной линии, предназначенной для изготовления пластиковых контейнеров для забора и хранения компонентов крови, лекарственных препаратов и т.п. Для изготовления пластикового контейнера последовательно реализуется ряд операций, между которыми заготовки гемоконтейнера перемещаются автоматически. Расходные материалы (заготовки стенок гемоконтейнера, порты), которые используются для изготовления гемоконтейнера, оператор размещает в соответствующих позициях вручную.



Рис. 4 Линия для производства гибких полимерных гемоконтейнеров.

Установка реализует следующие операции: вваривание портов между стенками гемоконтейнера в его верхнюю часть (количество и разновидностей портов может быть от 1 до 5); вваривание портов между стенками гемоконтейнера в его нижнюю часть (количество портов может быть от 0 до 1); формирование двух поперечных и двух продольных швов, образующих замкнутый и герметичный контур гемоконтейнера. На рис. 4, б показано фото одного из вариантов формируемого гемоконтейнера с установленными портами.

Установка, представленная на рис. 4, а имеет следующие технические характеристики и особенности: тип питающей сети – однофазная 220 вольт; суммарная потребляемая мощность (в режиме одновременной работы всех сварочных узлов) – 3000 Вт; производительность линии – 4 шт/мин; требование к пневматической сети – давление не менее 6 атм, расход сжатого воздуха 100 л/мин; количество требуемых операторов для работы с линией – один.

Заключение

Для оптимизации режимов и условий ультразвуковой сварки впервые доказано возникновение кавитационных явлений в расплавах полимеров на границе их соединения, что является одним из интенсифицирующих факторов, определяющих процесс формирования сварного соединения. Предложен новый способ управления процессом ультразвуковой сварки, основанный на непрерывном контроле акустических свойств соединяемых материалов в процессе формирования и развития в них кавитационных процессов. Создано и практически реализовано специализированное УЗ оборудование, предназначенное для формирования изделий из термопластичных материалов медицинского назначения, а так же ультразвуковое сварочное оборудование для непосредственного использования службами крови. Применение нового подхода к оптимизации ультразвукового воздействия обеспечило повышение качества

и надежности продукции за счет увеличения прочности формируемых соединений до 95% от прочности основного материала.

Список литературы

1. *Okhlopkova T.A., Borisova R.V., Nikiforov L.A., Spiridonov A.M., Sharin P.P., Okhlopkova A.A.* Technology of liquid-phase combination of ultra-high molecular weight polyethylene with nanoparticles of inorganic compounds under the influence of ultrasonic vibrations. // Russian Journal of Applied Chemistry. // 2016. **89**. N9. p. 1179-1186.
2. *Benatar A., Marcus M.* Ultrasonic welding of plastics and polymeric composites. Power Ultrasonics (Second Edition). 2023. p. 205-225.
3. *Unnikrishnan T.G., Kavan P.* A review study in ultrasonic-welding of similar and dissimilar thermoplastic polymers and its composites. // Materials Today Proceedings. 2015. **56**. N7. p. 3294-3300.
4. *Villegas I.F.* Ultrasonic welding of thermoplastic composites. // Frontiers in Materials. 2019. **6**. DOI: 10.3389/fmats.2019.00291.
5. *Titahun S.* A review on ultrasonic welding of various materials and their mechanical properties. // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2020. **988**, 012113.
6. *Р.В. Барсуков, Р.Н. Голых, А.Р. Барсуков, А.Н. Сливин, В.А.* Разработка модели влияния ультразвуковой энергии высокой интенсивности на реологические свойства полимерных Материалов. // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях (ИАМП-2025): Материалы XX юбилейной Всероссийской (с международным участием) научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Бийск, 22–24 октября 2025 года. – Бийск: Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. 2025. С. 45 - 46.
7. *Барсуков Р.В., Голых Р.Н., Барсуков А.Р., Маняхин И.А.* Стенд для оптических исследований кавитационных явлений в расплавах полимеров при воздействии на них ультразвуковыми колебаниями. // Механика композиционных материалов и конструкций. 2025. **31**. N4. С. 468-478.
8. *В. Н. Хмелев, Р. В. Барсуков, Д. В. Генне* Ультразвук. Принципы построения, алгоритмы и системы управления ультразвуковыми аппаратами. Бийск: Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, 2021.

УДК: 66.069.832:66.084.8

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39674

Реализация ультразвукового распыления

В.Н. Хмелев^a, А.В. Шалунов^b, С.А. Терентьев^c

*Бийский технологический институт (филиала) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный
технический университет им. И.И. Ползунова». 659305, Алтайский край, г. Бийск, ул. Героя
Советского Союза Трофимова, д. 27.*

E-mail: ^avnh@bti.secna.ru, ^bshalunov@bti.secna.ru, ^csergey@bti.secna.ru

Аннотация: Ультразвуковое распыление обладает уникальными преимуществами, такими как высокая однородность распыления, высокая степень использования материала и высокие экономические показатели. Однако, на сегодняшний день производительность ультразвукового распыления весьма низка. Для решения этой проблемы проведены комплексные исследования полного жизненного цикла искусственно формируемых аэрозолей, которые позволяют развить физические представления, выявить новые закономерности распространения и взаимодействия аэрозольного облака с поверхностями и взвешенными частицами и разработать принципы построения аппаратного оформления, обеспечивающего эффективное решение задач дезинфекции, пожаротушения, гидроулавливания (осаждение) пыли и других задач. На основе полученных теоретических исследований разработаны новые виды ультразвуковых аппаратов для распыления. Для уменьшения размеров формируемых частиц предложен и реализован способ многостадийного распыления, при котором происходит многократное дробление капель жидкости в поле стоячей ультразвуковой волны. Для увеличения производительности предложен и реализован гидроакустический распылитель, в котором для интенсификации процесса диспергирования на выходе жидкости из соплового отверстия в жидкости формируется кавитация. Для исключения кавитационного загрязнения распыляемых жидкостей или распыления высокотемпературных, агрессивных сред (расплавов металлов) разработаны бесконтактные УЗ излучатели, обеспечивающие диспергирование без контакта с колеблющейся поверхностью.

Ключевые слова: ультразвук, распыление, колебательная система, диспергирование.

Implementation of ultrasonic atomization

V.N. Khmelev^a, A.V. Shalunov^b, S.A. Terentiev^c

*Biysk Technological Institute (Branch) Altai State Technical University, 659305, Altai Territory,
Biysk, st. Hero of the Soviet Union Trofimov, 27.*

E-mail: ^avnh@bti.secna.ru, ^bshalunov@bti.secna.ru, ^csergey@bti.secna.ru

Abstract: Ultrasonic atomization offers unique advantages, such as high spray uniformity, high material utilization, and excellent economic performance. However, its current performance remains low. To address this issue, comprehensive studies of the full life cycle of artificially generated aerosols have been conducted. These studies have allowed for the development of physical concepts, the identification of new patterns in the propagation and interaction of aerosol clouds with surfaces and suspended particles, and the development of principles for constructing equipment that effectively addresses disinfection, fire extinguishing, dust hydro-trapping (sedimentation), and other tasks. New types of ultrasonic atomization devices have been developed based on the theoretical research. To reduce the particle size, a multi-stage atomization method has been proposed and implemented, involving multiple fragmentation of liquid droplets in the field of a standing ultrasonic wave. To increase performance, a hydroacoustic atomizer has been proposed and implemented, in which cavitation is generated at the liquid outlet from the nozzle orifice to intensify the dispersion process. To prevent cavitation contamination of sprayed liquids or the spraying of high-temperature, aggressive media (such as molten metals), contactless ultrasonic emitters have been developed that ensure dispersion without contact with the vibrating surface.

Keywords: ultrasound, atomization, vibrating system, dispersion.

PACS: 43.35.Zc

Введение

На практике используется большое количество технологических процессов, основанных на формировании аэрозолей с высокой дисперсностью капель и задаваемой производительностью. Например, в распылительной сушке это позволяет быстро и эффективно получать легко высушиваемые мелкодисперсные частицы с высокой поверхностной активностью [1], а при нанесении покрытий на большие обрабатываемые площади формирование аэрозолей обеспечивает равномерность слоя [2]. Очень высокие значения производительности распыления требуется при распылении дезинфицирующих средств на открытых пространствах и пожаротушении в закрытых помещениях.

Преимущества ультразвукового распыления в возможности создавать мелкие капли жидкости с узким распределением размеров, известная зависимость между параметрами

генератора и характеристиками получаемого распыла, а также минимальные энергозатраты на реализацию процесса [3, 4].

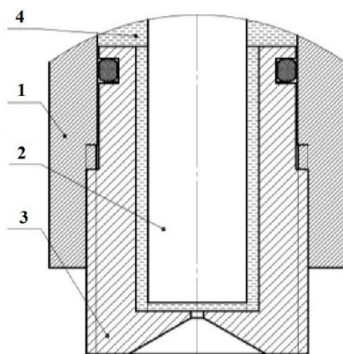
К сожалению, классическое ультразвуковое распыление (формирование капель на колеблющейся с ультразвуковой частотой поверхности) не позволяет формировать мелкие капли (средний размер в 70 мкм на частоте 22 кГц) с достаточно высокой производительностью (около 1.5 мл/(с*см²)), или является малопродуктивным (около 0.1 мл/(с*см²)) при повышении частоты до 200 кГц для формирования капель со средним размером 10 мкм.

Кроме того, формирование капель даже водных растворов на колеблющейся металлической поверхности излучателя приводит к загрязнению распыляемых частиц металлом, а распыление расплавов металлов или агрессивных сред просто разрушает излучатель.

Целью исследований, представленных далее, является разработка методов и оборудования, способных устранить недостатки классических способов УЗ распыления.

1 Гидроакустический распылитель

Для увеличения производительности распыления за основу взят гидравлический метод распыления, характеризующийся высокой производительностью, но не способный формировать узкий диапазон формируемых капель. Объединение преимуществ ультразвукового и гидравлического методов позволяет получать мелкодисперсные капли с высокой производительностью. Для обоснования возможности и эффективности такого способа в работе авторов [5] предложено математическое описание кавитационного распыления жидкости вблизи соплового отверстия, на основе анализа которого установлена зависимость диаметра получаемых капель жидкости от параметров УЗ воздействия и размеров распылителя. Это позволило предложить и разработать устройство, объединяющее преимущества гидравлического и ультразвукового распыления (рис. 1).



1 – технологический объем; 2 – УЗ рабочий инструмент; 3 – жиклер; 4 – распыляемая жидкость

Рис. 1. Эскиз гидроакустического распылителя

Гидроакустический распылитель представляет собой УЗ рабочий инструмент 2, располагающийся в технологическом объеме 1. Распыляемая жидкость 4 подается в

верхнюю часть технологического объема и выходит через жиклер 3, при этом отверстие жиклера находится напротив торцевой части излучателя. Жидкость в технологическом объеме находится при избыточном давлении и на выходе через отверстие жиклера испытывает воздействие УЗ колебаний от излучателя. Это обеспечивает формирование кавитационных пузырьков в каплях распыляемой жидкости. Попадая во внешнюю среду капли первичного аэрозоля за счет схлопывания кавитационных пузырьков дробятся на более мелкие. Разработка и изготовление практической конструкции распылителя с рабочей частотой УЗ излучателя 22.5 кГц и амплитудой колебаний 26 мки при диаметре отверстия жиклера 0.7 мм и расстоянии между жиклером и торцевой поверхностью УЗ рабочего инструмента 1.5 мм позволила провести экспериментальные исследования функциональных возможностей распылителя и получить зависимость размеров капель распыла от избыточного давления жидкости в технологическом объеме (рис. 2).

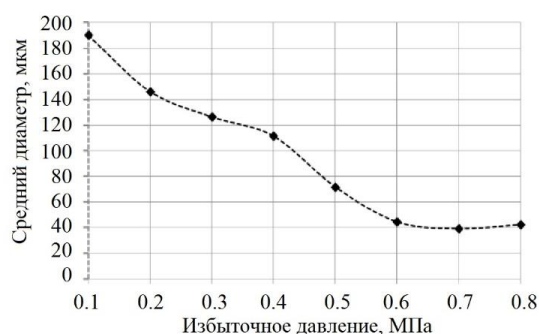


Рис. 2. Зависимость среднего размера частиц от избыточного давления в жидкости

Анализ результатов показал возможность уменьшения среднего диаметра получаемых капель с 70 мкм (для УЗ распыления) до 40 мкм при увеличении избыточного давления жидкости. При этом установлено, что увеличения давления более 0.6 МПа для реализованной амплитуды УЗ колебаний не приводит к уменьшению размеров формируемых капель. При этом было установлено, что рост давления жидкости приводит к монотонному росту производительности распыления (рис. 3). Из анализа двух выявленных зависимостей (рис. 2, 3) можно установить оптимальный режим работы гидроакустического распылителя.

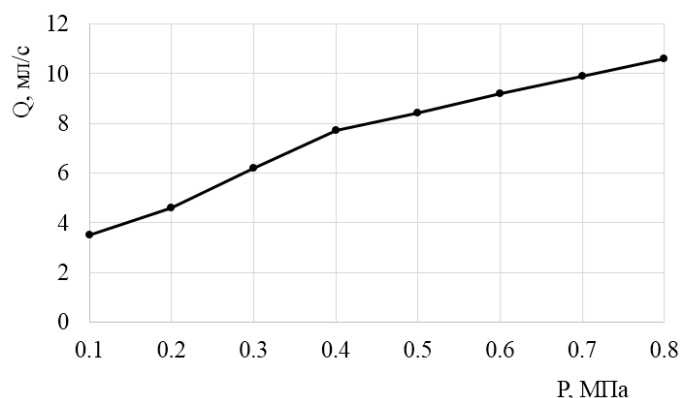


Рис. 3. Зависимость производительности распыления (Q) от давления (P)

2 Трубчатый распылитель

Для решения проблемы уменьшения размера формируемых капель без увеличения рабочей частоты излучателя предложено использовать вторичное разрушение капель жидкости в высокоинтенсивном звуковом поле. Возможность реализации такого способа основана на работе авторов [6], предложивших математическую модель процесса, которая показала возможность реализации распыления в несколько стадий за счет формирования определенных условий и значения уровня звукового давления УЗ колебаний. Это позволило предложить и разработать трубчатый распылитель с рабочей частотой 22 кГц (рис. 4).



Рис. 4. УЗ трубчатый распылитель

УЗ распылитель в виде трубчатого излучателя имеет переменный внешний и одинаковый внутренний диаметр. Внутри излучателя формируется стоячая волна, состоящая из трех максимумов с уровнем звукового давления на оси излучателя до 182 дБ.

Предварительно полученная любым известным способом аэрозоль с размерами капель 1-10 мм подается за счет потока газа внутрь трубчатого излучателя. В стоячих ультразвуковых полях аэрозоль претерпевает последовательные разрушения за счет потери устойчивости и деформации.

Были проведены эксперименты по распылению капель воды с начальным размером 1.5-2 мм при разных уровнях звукового давления на оси излучателя (рис. 5).

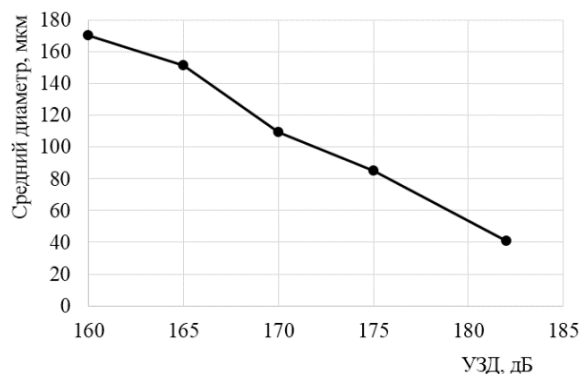


Рис. 5. Зависимость среднего диаметра аэрозоля от уровня звукового давления

Увеличение уровня звукового давления до 182 дБ позволило уменьшать средний диаметр формируемых на выходе излучателя капель до 41 мкм. Для определения производительности

формирования капель указанного размера выявлены зависимости от количества подаваемого в излучатель распыляемого материала (рис. 6)

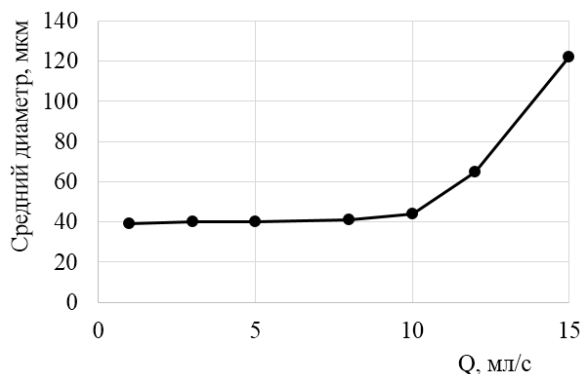


Рис. 6. Зависимость среднего диаметра капель получаемого аэрозоля от потока входящего аэрозоля (Q)

Следует отметить слабую зависимость среднего диаметра получаемых капель при потоке до 10 мл/с и стремительный рост размеров капель при дальнейшем увеличении скорости потока. Проблему видимо можно решить использованием гидроакустического излучателя (или нескольких) в качестве предварительных источников аэрозоля для последующего распыления. Основным преимуществом такого распылителя можно считать бесконтактность распыления.

Высокие интенсивности ультразвуковых колебаний и возможность бесконтактного распыления в трубчатом распылителе позволили провести эксперименты по распылению металлов. В качестве модельного образца (распыляемого металла) был использован сплав галинстан, который обладает температурой плавления 3°C , плотностью $6,4 \text{ г/см}^3$ и коэффициентом поверхностного натяжения 718 мН/м при температуре 20°C . Капля галинстана помещалась в область стоячей волны с уровнем звукового давления 182 дБ, где и происходило распыление. Средний диаметр полученных капель составил 53 мкм (рис. 7).

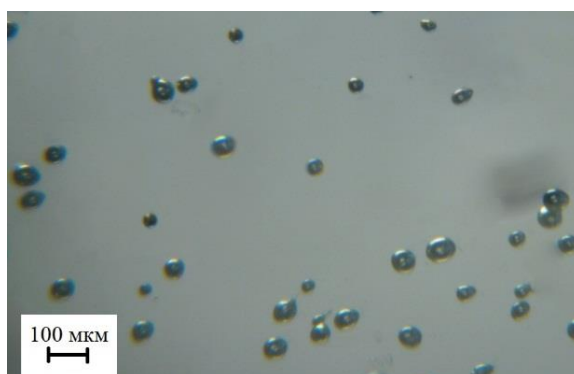


Рис. 7. Микрофотография частиц галинстана, распылённых при уровне звукового давления 182 дБ

Следует отметить что снижение уровня звукового давления до 165 дБ практически полностью исключало возможность дробления капель жидкого металла.

Заключение

В результате проведенных исследований устранены недостатки классического УЗ распыления с колеблющейся поверхности, разработаны новые виды ультразвуковых аппаратов для распыления жидких сред.

Для увеличения производительности распыления предложен и реализован гидроакустический распылитель, позволивший объединять в себе высокую производительность гидравлического метода (10 мл/с) с возможностью получения мелких капель распыла (40 мкм).

Для уменьшения размеров формируемых частиц предложен и реализован способ многостадийного распыления, при котором в поле стоячей ультразвуковой волны в трубчатом распылителе формируются частицы со средним диаметром 43 мкм при производительности 10 мл/с.

Для исключения кавитационного загрязнения распыляемых жидкостей или распыления высокотемпературных, агрессивных сред (расплавов металлов) реализовано многостадийное бесконтактное распыление металла со средним размером частиц 53 мкм.

Предложенные и реализованные способы распыления позволяют расширить возможности применения УЗ колебаний в технологических процессах.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда №23-19-00875-П.

Список литературы

1. *Nandiyanto A.B.D., Okuyama K.* Progress in developing spray-drying methods for the production of controlled morphology particles: From the nanometer to submicrometer size ranges. // *Adv. Powder Technol.* 2011. **22**. P. 1-19.
2. *Hanft D., Exner J., Schubert M., Stöcker T., Fuierer P., Moos R.* An overview of the aerosol deposition method: Process fundamentals and new trends in materials applications. // *J. Ceram. Sci. Technol.* 2015. **6**. P. 147-182.
3. *Guerra-Bravo E., Lee H.-J., Baltazar A., Loh K.J.* Vibration Analysis of a Piezoelectric Ultrasonic Atomizer to Control Atomization Rate. // *Appl. Sci.* 2021. **11**. P. 8350.
4. *Ramisetty K.A., Pandit A.B., Gogate P.R.* Investigations into Ultrasound Induced Atomization. // *Ultrason. Sonochem.* 2013. **20**. P. 254-264.
5. *Шалунов А.В., Кудряшова О.Б., Терентьев С.А., Хмелев В.Н.* Метод ультразвукового кавитационного распыления жидкостей. // *Инженерно-физический журнал.* 2025. **98**. № 5. С. 1294-1302.
6. *Кудряшова О.Б., Шалунов А.В., Нестеров В.А., Терентьев С.А.* Математическая модель процесса многостадийного дробления капель в ультразвуковом поле. // *Инженерно-физический журнал.* 2025. **98**. № 2. С. 525-534.

УДК: 534.2.

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39675

Исследование электроакустической эффективности пьезопреобразователей в воздухе для создания мощной многоэлементной антенной решетки

Лапина А.В.¹⁾, Цысарь С.А.¹⁾, Росницкий П.Б.¹⁾, Сапожников О.А.¹⁾

¹⁾ *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, г. Москва;
Тел.: +7 (495 9392952);
E-mail: lapinaav@my.msu.ru*

В работе исследована электроакустическая эффективность низкочастотных (30 – 40 кГц) пьезопреобразователей двух производителей, предназначенных для создания мощных многоэлементных антенных решёток в воздухе. В качестве основного использовался метод акустической голографии, а в качестве дополнительного – метод диаграммы направленности излучателей. В голографическом методе из измеренной голограммы рассчитывался угловой спектр поля давления и с его помощью для каждой частоты находилась мощность излучаемого акустического поля при заданной амплитуде электрического напряжения, подаваемого на элементы решётки. С использованием измеренного электрического импеданса решетки при указанном значении напряжения рассчитывалась электрическая мощность. Отношение полученных значений акустической и электрической мощностей использовалось в качестве электроакустической эффективности на разных частотах. В дополнительном подходе электрическая мощность рассчитывалась аналогичным способом, а для определения акустической мощности проводились измерения диаграммы направленности ультразвуковых датчиков в диапазоне углов поворота от -90° до 90° . Оба указанных подхода позволяют измерить электроакустическую эффективность в рабочем диапазоне частот. Показано, что для исследуемых ультразвуковых датчиков в рассматриваемом диапазоне частот эффективность может достигать 40%.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №25-12-00141.

Ключевые слова: электроакустическая эффективность, низкочастотный ультразвук, голография, диаграмма направленности

Investigation of the electroacoustic efficiency of piezoelectric transducers in air for the development of a high-power multi-element antenna array

Lapina A.V.¹⁾, Tsysar S.A.¹⁾, Rosnitskiy P.B.¹⁾, Sapozhnikov O.A.¹⁾

*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Moscow
E-mail: lapinaav@my.msu.ru*

This paper investigates the electroacoustic efficiency of low-frequency (30–40 kHz) piezoelectric transducers from two manufacturers, designed for the construction of high-power multi-element antenna arrays in air. Acoustic holography was employed as the primary research method, supplemented by the directivity pattern method. In the holographic approach, the angular spectrum of the pressure field was calculated from the measured hologram and used to determine the radiated acoustic power at a specified electrical voltage amplitude applied to the array elements. The electrical power was calculated based on the measured electrical impedance of the array at the given voltage. The ratio of the obtained acoustic power to the electrical power was defined as the electroacoustic efficiency at various frequencies. In the supplementary approach, the electrical power was calculated similarly, while the acoustic power was determined by measuring the directivity patterns of the ultrasonic sensors over an angular range from -90° to 90° . Both approaches allow for the measurement of electroacoustic efficiency across the operating frequency range. It is shown that for the ultrasonic sensors under study, the efficiency can reach up to 40% within the considered frequency range. This work was supported by the Russian Science Foundation (RSF) grant No. 25-12-00141.

Keywords: electroacoustic efficiency, low-frequency ultrasound, holography, directivity pattern
PACS: 43.35.Zc, 43.20.+g

УДК: 534-13.

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39676

Излучатели изгибного типа для генерации ультразвуковых колебаний в газовых средах

В.Н Хмелёв^{1а}, А.В. Шалунов¹, С.Н. Цыганок¹

¹ *Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный
технический университет им. И.И. Ползунова», г. Бийск, ул. Героя Советского Союза
Трофимова, 27.*

E-mail: ynh@bti.secna.ru

Аннотация: Формирование упругих колебаний ультразвуковой (УЗ) частоты (выше 22 кГц) в газовых средах представляет значительный практический интерес, поскольку они позволяют передавать информацию на большие расстояния в диапазоне, недоступном для восприятия человеком в сложных метеоусловиях, в условиях акустических, электромагнитных и световых помех. Кроме того, они обеспечивают очистку воздуха от твердых и жидких частиц, осаждение дыма при пожарах, позволяют выполнять низкотемпературную сушку, разрушение пен, нанесение покрытий и реализовать другие технологические операции без непосредственного контакта излучателей с обрабатываемой средой.

Основой современных УЗ излучателей для газовых сред сегодня являются металлические диски, совершающие изгибные колебания, поскольку их волновое сопротивление лучше согласуется с волновым сопротивлением газа.

Анализ колебательных процессов на второй и последующих изгибных модах позволил выявить ограничения существующих дисков и создать конструкции, обеспечившие увеличение уровня звукового давления ступенчато-переменного титанового диска диаметром 146 мм до 153.2 дБ (914 Па).

Применение передних фазовыравнивающих и тыльных отражательных рупоров позволило повысить уровень звукового давления на 6 дБ до 159.2 дБ (1824 Па).

Проведенные исследования дисковых УЗ-излучателей различных размеров подтвердили эффективность дисков, диаметром 146 мм и позволили рекомендовать применение массивов таких дисков для дальнейшего развития излучающих систем.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00900, <https://rscf.ru/project/24-19-00900/>.

Ключевые слова: излучатели ультразвуковые, газовые среды, уровень звукового давления.

Bending-type emitters for generating ultrasonic vibrations in gaseous media

V.N. Khmelev^{1,a}, A.V. Shalunov¹, S.N. Tsyganok¹

¹ *Biysk Technological Institute (branch) Polzunov Altai State Technical University, Biysk 659305,
Russia.*

E-mail: ^avnh@bti.secna.ru

Abstract: The formation of elastic vibrations of ultrasonic (US) frequency (above 22 kHz) in gas environments is of significant practical interest, since they allow information to be transmitted over long distances in a range inaccessible to human perception in difficult weather conditions, under conditions of acoustic, electromagnetic and light interference. In addition, they provide air purification from solid and liquid particles, smoke precipitation during fires, enable low-temperature drying, foam destruction, coating application, and other technological operations without direct contact between the emitters and the medium being processed.

The basis of modern ultrasonic emitters for gaseous media today are metal disks that perform bending vibrations, since their wave impedance is better matched to the wave impedance of the gas. An analysis of the oscillatory processes in the second and subsequent bending modes made it possible to identify the limitations of existing disks and create designs that ensured an increase in the sound pressure level of a step-variable titanium disk with a diameter of 146 mm to 153.2 dB (914 Pa).

The use of front phase-equalizing and rear reflective horns increased the sound pressure level by 6 dB to 159.2 dB (1824 Pa).

Studies of disc ultrasonic emitters of various sizes confirmed the effectiveness of 146 mm diameter discs and recommended the use of arrays of such discs for further development of radiating systems.

The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 24-19-00900, <https://rscf.ru/project/24-19-00900/>.

Keywords: ultrasonic emitters, gas environments, sound pressure level

PACS: 07.64.+z

Введение

Формирование упругих колебаний ультразвуковой (УЗ) частоты (выше 22 кГц) в газовых средах обеспечивает передачу информации в недоступном для восприятия человеком диапазоне, при сложных метеоусловиях, наличии радио и световых помех [1], а также позволяет осуществлять очистку воздуха от инородных частиц, осаждение дыма при

пожарах, низкотемпературную сушку пищевых, лекарственных и взрывчатых веществ, разрушение пен, нанесение покрытий и другие операции, в которых недопустимо или невозможно размещение излучателя в обрабатываемой среде. При этом, значительное увеличение эффективности УЗ воздействия достигается при использовании УЗ колебаний с уровнем звукового давления не ниже 135–145 дБ [2].

В течение многих десятилетий такие воздействия осуществлялись только газоструйными излучателями, эффективность (КПД) которых не превышала 15–20% при уровне звукового давления колебаний до 120–130 дБ. Ограничения газоструйных излучателей и необходимость повышения эффективности излучения стимулировали разработку твердотельных излучателей, использующих изгибные колебания металлических дисков, возбуждаемых пьезопреобразователями. Были созданы конструкции таких устройств, отличающихся размерами, формой, мощностью, направленностью [3].

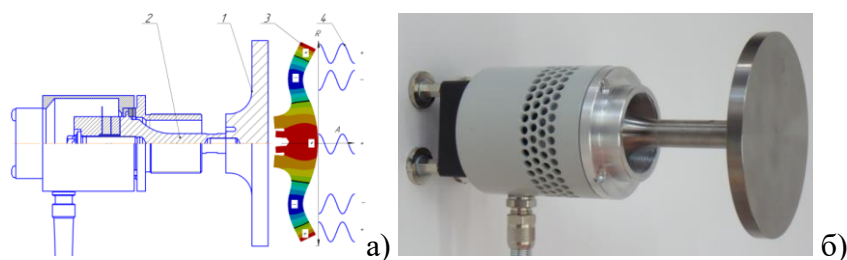
Однако, удовлетворить современные потребности по направленности и интенсивности они не всегда способны. Для повышения амплитуды колебаний, улучшения направленности, при снижении механические напряжений в материале и обеспечении равномерности колебаний по поверхности дисков [4] решались задачи выявления условий формирования УЗ колебаний с максимально возможным уровнем звукового давления и поиска конструктивных решений, обеспечивающих заданную площадь и равномерность ввода энергии в газовую среду для формирования излучения на удалении от излучателя.

1 Особенности построения и практические конструкции излучателей

Как отмечалось ранее, ключевым элементом УЗ излучателей, предназначенных для формирования УЗ колебаний в газовых средах, являются металлические диски, совершающие изгибные колебания. Это обусловлено тем, что волновое сопротивление такого излучателя лучше согласуется с волновым сопротивлением газа [5, 6].

На практике возникает необходимость использования дисковых излучателей различного диаметра. Поэтому, логичным решением задачи увеличения эффективности излучения является использование дисков большего диаметра, возбуждаемых на высших модах колебаний (второй, третьей и далее). Это позволяет увеличивать выход акустической энергии, излучаемой в газовую среду.

В связи с этим возникла необходимость разработки и исследования однотипных ультразвуковых излучателей, работающих на модах, начиная со второй. Для обеспечения максимальной эффективности излучения диска, колеблющегося на второй моде излучения был спроектирован и реализован излучатель с плоским диском диаметром 146 мм, соответствующей толщины, (рис. 1)



а – излучатель с диском диаметром 146 мм, б – внешний вид излучателя.

Рисунок 1 – Конструктивная схема, распределение колебаний и фото излучателя.

Как видно из распределения колебаний (рис. 1, а), одной из ключевых причин ограничения эффективности излучателей, работающих на высших модах, является наличие зон излучения на поверхности диска, колеблющихся в противофазе. Такие зоны излучают колебания, которые взаимно компенсируются на определенном расстоянии от излучающей поверхности, снижая суммарную энергию в рабочем объеме газа.

При этом, части диска, колеблющиеся в одной фазе, составляют 57% и 43%.

Для увеличения доли поверхности, участвующей в синфазном излучении колебаний, предложено **формирование ступенчато-переменной толщины диска**, при которой высота каждой кольцевой ступени компенсирует фазовый сдвиг между соседними зонами и **установка рупорных устройств** перед противофазно колеблющимися участками диска.

Для обеспечения излучения с одной фазой (синфазного излучения со всей поверхности) разработаны конструкции УЗ излучателей (рис. 2 и 3) с дисками различного размера, начиная со ступенчато - переменного диска диаметром 146 мм, колеблющегося на второй моде колебаний диска (рис. 2). Такое решение позволяет увеличить долю фронтальной поверхности, участвующей в синфазном излучении до 75%.

Поскольку дальнейшее увеличение площади эффективного излучения возможно только при использовании более высоких мод колебаний (третьей, четвертой и т.д.), на рис. 3 представлены фото излучателей с дисками диаметром 250, 320, 360 и 410 мм. Все они имеют переменную по радиусу толщину со стороны соединения с пьезопреобразователем, что позволяет максимально компенсировать фазовые сдвиги между зонами излучения и повысить эффективность излучения в газовую среду.

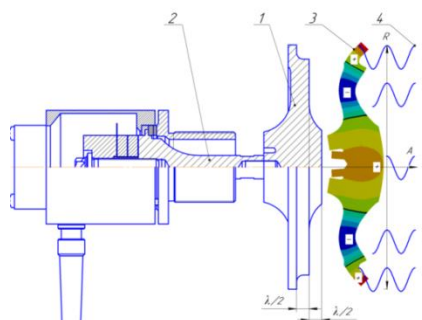


Рисунок 2 – Конструктивная схема и излучение колебаний ступенчато переменного диска диаметром 146 мм.

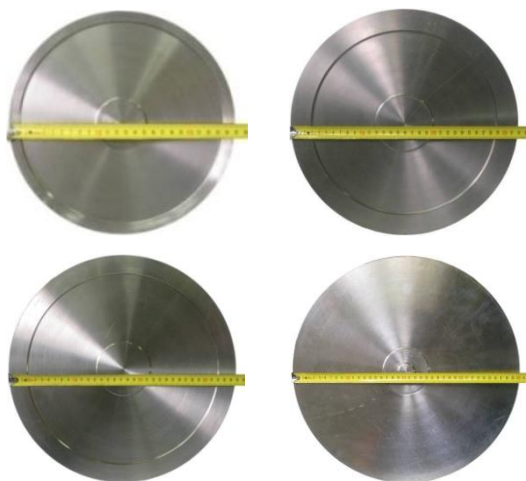


Рисунок 3 – УЗ излучатели с дисками диаметром 250, 320, 360 и 410 мм.

2 Измерение параметров излучателей и обсуждение результатов

Характеристики созданных УЗ излучателей для газовых сред приведены в Таблице 1.

Таблица 1

Технические характеристики

Диаметр диска, мм	146	250	320	360	410
Частота, кГц	22±1.85	22,5±1.85	30±2.2	29±2.3	27±2.0
Акустическая мощность, Вт	115±6	185±9	210±10	220±11	225±12
КПД, %	63	60	60	58	50
Удельная мощность Вт/см ²	0.68	0.40	0.26	0.21	0.17

Для подтверждения эффективности выполнения диска ступенчато переменным по толщине на рис. 4 представлены сравнительные диаграмма направленности двух дисков диаметром 146 мм: один из которых с плоской излучающей поверхностью (рис. 1), а второй (рис. 2) ступенчато переменный (для компенсации фазовых различий).

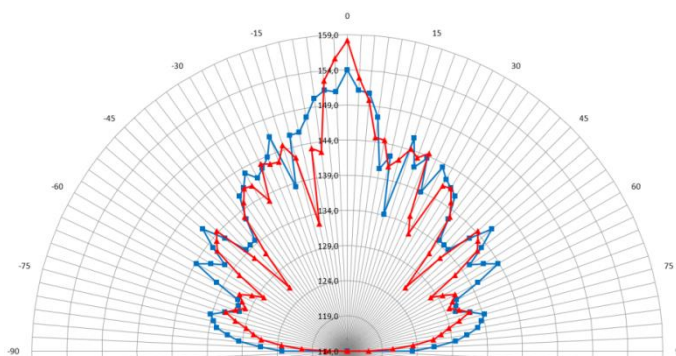


Рисунок 4 – Диаграммы направленности для двух дисков с диаметрами 146 мм – плоского (голубой) и разнотолщинного (красный).

Сравнение показывает, что уровень звукового давления плоского диска составляет 147.5 дБ (471 Па), а ступенчато-переменного – 153.2 дБ (914 Па), т.е. на 5.7 дБ больше.

Результаты измерения распределения звукового давления вдоль оси излучателя (рис. 5) свидетельствуют о том, что равномерный спад звукового давления начинается с расстояния 0.4–0.45 м (около 3 диаметров диска).

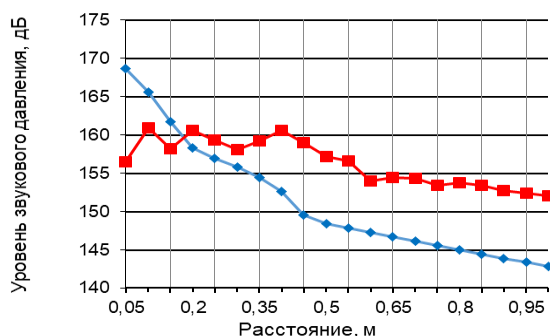


Рисунок 5 – Распределения звукового давления вдоль оси излучателя до расстояния 1 м для плоского (синий) и разнотолщинного (красный) дисков.

Диаграммы направленности излучателей с дисками диаметрами 250, 320, 360 и 410 мм, работающими на третьей, четвертой, пятой и шестой модах колебаний (рис. 6) показывают следующее: для диска диаметром 250 мм уровень звукового давления на расстоянии 1 м составляет 140 дБ (195 Па); диаметром 320 мм – 143 дБ (350 Па); диаметром 360 мм – 148 дБ (435 Па); диаметром 410 мм – 150 дБ (700 Па).

Таким образом, последовательное увеличение диаметра ступенчато переменных по толщине дисков до 250, 320, 360 и 410 мм позволяет повысить уровень звукового давления от 140 дБ (195 Па) до 150 дБ (700 Па). Однако полученные значения уступают результатам, достигнутым для диска диаметром 146 мм, работающего на второй моде. Увеличение диаметра приводит к расширению диаграммы направленности (из-за неравномерности распределения и частичной компенсации фаз колебаний отдельных колец).

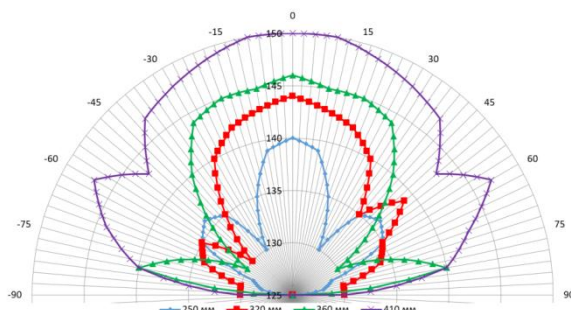


Рисунок 6 – Диаграммы направленности УЗ излучателей с дисками диаметрами 250, 320, 360 и 410 мм.

Из полученных данных следует, что увеличение диаметра диска эффективно лишь до определенного предела – в частности, до возможности работы на второй моде колебаний. Дальнейшее увеличение размеров и использование более высоких мод приводит к

замедлению роста эффективности, сопровождаемому значительными затратами на материалы, изготовление и энергообеспечение, потерей механической прочности.

Дальнейшие исследования были направлены на повышение эффективности излучателей диаметром 146 мм за счет рупорных устройств (рис. 7). Излучатель в виде плоского диска был снабжен передними фазовыравнивающими рупорами, а излучатель с профилированной ступенчато переменной поверхностью снабжался только тыльным отражателем, обеспечивающим компенсацию фаз колебаний зон обратной стороны диска.

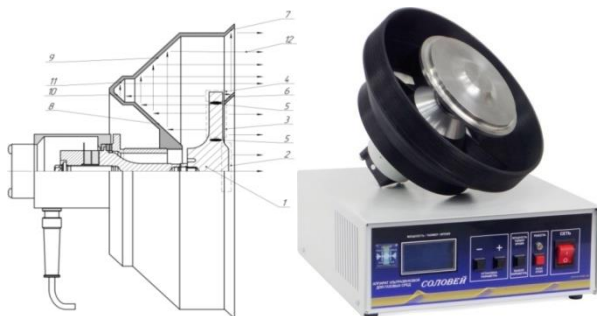


Рисунок 7 – УЗ излучатель с фазовыравнивающими рупорами.

Результаты измерения показали (рис. 8), что применение рупоров позволяет повысить эффективность излучения.

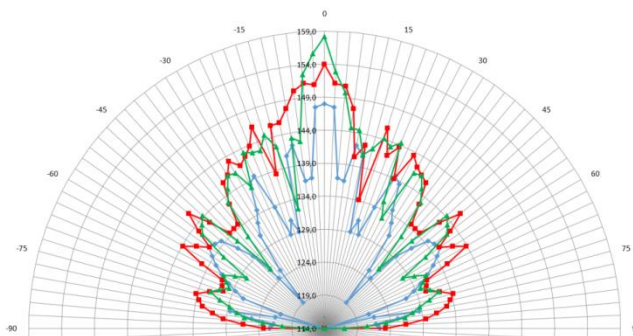


Рисунок 8 – Диаграммы направленности для дисков диаметром 146 мм (плоского – красный и разнотолщинного - зеленый) с рупорами и без них (синий).

Для плоского диска диаметром 146 мм звуковое давление возросло на 7.5 дБ до 155 дБ. Ступенчато-переменный по толщине диск того же диаметра обеспечил увеличение уровня звукового давления с 153.2 дБ (914 Па) до 159.2 дБ (1824 Па), т.е. на 6 дБ.

Заключение

1. Разработан ступенчато-переменный излучатель диаметром 146 мм, обеспечивающий излучение с уровнем звукового давления 153.2 дБ (914 Па).
2. Последовательное увеличение диаметра излучателей до 250, 320, 360 и 410 мм позволяет повышать уровень звукового давления до 150 дБ (700 Па), что уступает результатам, достигнутым для диска диаметром 146 мм.

3. Дальнейшее повышение эффективности излучения обеспечивается применением передних фазовыравнивающих и тыльных отражательных рупоров, позволяющих увеличить звуковое давление до 159.2 дБ (1824 Па), что соответствует приросту на 6 дБ.

Проведенные исследования подтвердили эффективность дисков, работающих на второй моде изгибных колебаний, а дальнейшее развитие излучающих систем может быть обеспечено созданием массивов на основе таких дисков.

Список литературы

4. V. N. Khmelev, A. V. Shalunov, R. V. Barsukov, S. N. Tsyganok Ultrasonic apparatus for drying. // Electronic Journal "Technical Acoustics". 2009. 6.
5. J. A. Gallego-Juárez, E. R-F. de Sarabia, G. Rodríguez-Corral, Th. L. Hoffmann, J. C. Gálvez-Moraleda, J. J. Rodríguez-Maroto, Fr. J. Gómez-Moreno, A. Bahillo-Ruiz, M. Martín-Espigares, M. Acha Application of acoustic agglomeration to reduce fine particle emissions from coal combustion plants // J. Environ. Sci. Technol. 1999. 33, 3843–3849.
6. F. Massa Ultrasonic transducers for use in air // in Proceedings of the IEEE. Oct. 1965. vol. 53, no. 10. P. 1363-1371.
7. V. N. Khmelev, V. A. Nesterov, A. V. Shalunov and S. A. Terentyev Identification of conditions for ultrasonic effect on gas-dispersed medium and creation of radiators to increase the efficiency of coagulation in devices with swirling flow // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2024. Vol. 335, N. 10. P. 238–252.
8. V. N. Khmelev, A. V. Shalunov, S. N. Tsyganok Smoke precipitation by exposure to dual-frequency ultrasonic oscillations // Fire. 2024. Vol. 7, No. 12. P. 476.
9. V. N. Khmelev, A. V. Shalunov, V.A. Nesterov Ultrasonic transducer with increased exposure power and frequency up to 100 kHz // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2021. 68(5). P. 1773–1782.

УДК: 534-13.

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39677

Ультразвуковое разрушение дыма

В.Н.Хмелев¹, А.В.Шалунов¹, С.Н.Цыганок^{1,а}

¹*Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный
технический университет им. И.И. Ползунова»,
г. Бийск, ул. Героя Советского Союза Трофимова, 27.*

E-mail: ^аgrey@bti.secna.ru

Аннотация. Для ускорения ультразвукового (УЗ) осаждения частиц дыма было предложено и реализовано воздействие УЗ колебаниями, формируемыми одновременно несколькими (не менее двух) излучателями, работающие на частоте 22 ± 1.65 кГц. Повышение эффективности обеспечено за счет изменения расстояния и направления акустической оси каждого излучателя для формирования заданной направленности излучения, формирования полосы формирования излучения и создания зон перекрытия акустических осей при работе излучателей на различных частотах.

Изменение межосевого расстояния между излучателями и изменение угла наклона акустической оси каждого из излучателей обеспечивает формирование УЗ поля с заданной конфигурацией и уровнем звукового давления. При перемещении УЗ излучателей и изменение угла наклона акустической оси формируются необходимые и достаточные для разрушения дыма колебания:

- на расстоянии в 1 м в виде полусферы, в которой уровень звукового давления будет не менее 145-146 дБ;
- на расстояние в 2 м в виде телесного угла (угол раскрытия 90°), в котором уровень звукового давления будет не менее 140-141 дБ.

Полученные результаты исследований свидетельствуют о возможности применения разработанного оборудования для оснащения специализированных частей средствами пожаротушения. При одновременном перемещении всего массива по замкнутому помещению будет осуществляться УЗ разрушение дыма во всем помещении.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00900, <https://rscf.ru/project/24-19-00900/>.

Ключевые слова: разрушение дыма, коагуляция, уровень звукового давления, двухчастотное воздействие, ультразвуковые колебания, ультразвуковой излучатель

Ultrasonic smoke destruction

V.N. Khmelev¹, A.V. Shalunov¹, S.N. Tsyganok^{1,a}

¹*Biysk Technological Institute (branch) Polzunov Altai State Technical University.*

Biysk 659305, Russia.

E-mail: ^agrey@bti.secna.ru

Abstract:To accelerate the ultrasonic (US) deposition of smoke particles, it was proposed and implemented to use ultrasonic vibrations generated simultaneously by several (at least two) emitters operating at a frequency of 22 ± 1.65 kHz. Increased efficiency is achieved by changing the distance and direction of the acoustic axis of each emitter to form a given radiation directionality, forming a radiation formation band and creating overlapping zones of the acoustic axes when the emitters operate at different frequencies.

Changing the interaxial distance between the emitters and changing the angle of inclination of the acoustic axis of each emitter ensures the formation of an ultrasonic field with a given configuration and sound pressure level. By moving the ultrasonic emitters and changing the angle of the acoustic axis, the necessary and sufficient vibrations for the destruction of smoke are generated:

- at a distance of 1 m in the form of a hemisphere, in which the sound pressure level will be at least 145-146 dB;
- at a distance of 2 m in the form of a solid angle (opening angle 90°), in which the sound pressure level will be at least 140-141 dB.

The obtained research results indicate the possibility of using the developed equipment to equip specialized units with fire extinguishing equipment. When the entire array moves simultaneously throughout a closed room, ultrasonic destruction of smoke will be achieved throughout the entire room.

The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 24-19-00900, <https://rscf.ru/project/24-19-00900/>.

Keywords: smoke destruction, coagulation, sound pressure level, dual-frequency action, ultrasonic vibrations, ultrasonic emitter

PACS:07.64.+z

Введение

Воздействие ультразвуковыми (УЗ) колебаниями является одним из наиболее эффективных способов осаждения твердых частиц в газовых средах. Ультразвуковое воздействие на дым обеспечивает улучшение видимости за счет снижения счетной концентрации дымовых частиц,

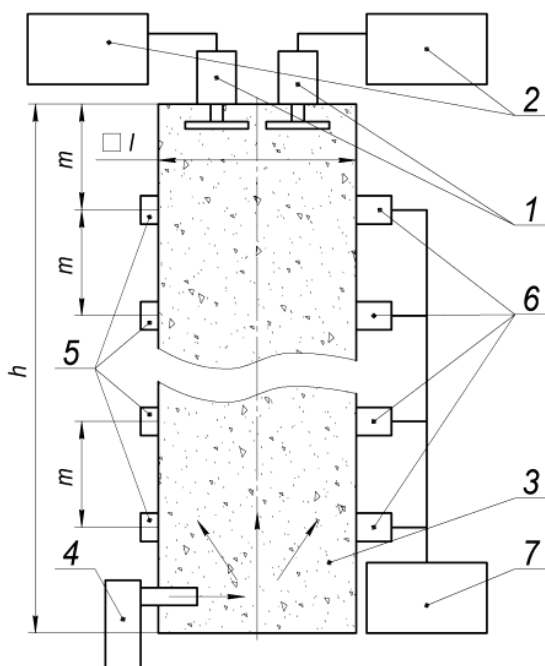
вовлекаемых в колебательное движение,повышающее вероятность их столкновения и объединения в агломераты,существенно превосходящие по размерам исходные дымовые частицы. Такое объединение приводит к дальнейшему объединению и гравитационному осаждению образованных агломератов [1-6].

Так как достаточно хорошо исследованное, традиционное,УЗ воздействие синусоидальными колебаниями имеет принципиальные ограничения, дальнейшее повышение эффективности осаждения дыма следует искать в создании новых, более эффективных условий воздействия, основанных на увеличении вероятности столкновений за счет инициирования, кроме колебательного,вращательного движения дымовых частиц.

Такое воздействие способно улучшить объединение мелких частиц за счет формирования УЗ полей сложной структуры, а одним из путей создание таких полей является излучение УЗ колебаний одновременно несколькими (минимум двумя) излучателями, работающими на близких частотах.

1 Эксперименты по ультразвуковому разрушению дыма при двухчастотном воздействии

Для подтверждения эффективности такого подхода к решению проблемы УЗ разрушения дыма создан стенд (рис. 1) для двухчастотного воздействия.



1 – УЗ излучатели; 2 – электронные генераторы; 3 – дымовая камера; 4 – дымогенератор;
5 – источник инфракрасного излучения; 6 – фотоприемник; 7 – ПК.

Рисунок 1 – Стенд для разрушения дыма.

Подача дыма в камеру осуществлялась с производительностью 50 л/мин. Дымовая камера имела открытые каналы для выхода продуктов, поэтому давление внутри установки не возрастало, а процесс носил проточный характер. Средний уровень звукового давления в дымовой камере составлял 145–150 дБ. Температура в дымовой камере составляла 10-12°C, при температуре окружающей среды около 5°C.

На рис. 2 приведены графики изменения коэффициента светопропускания при воздействии двумя излучателями, работающими на одной частоте (кривые 1, 2, 3), для работающих на разных частотах (кривые 4, 5, 6) и результаты естественного осаждения (кривая 7) без УЗ воздействия.

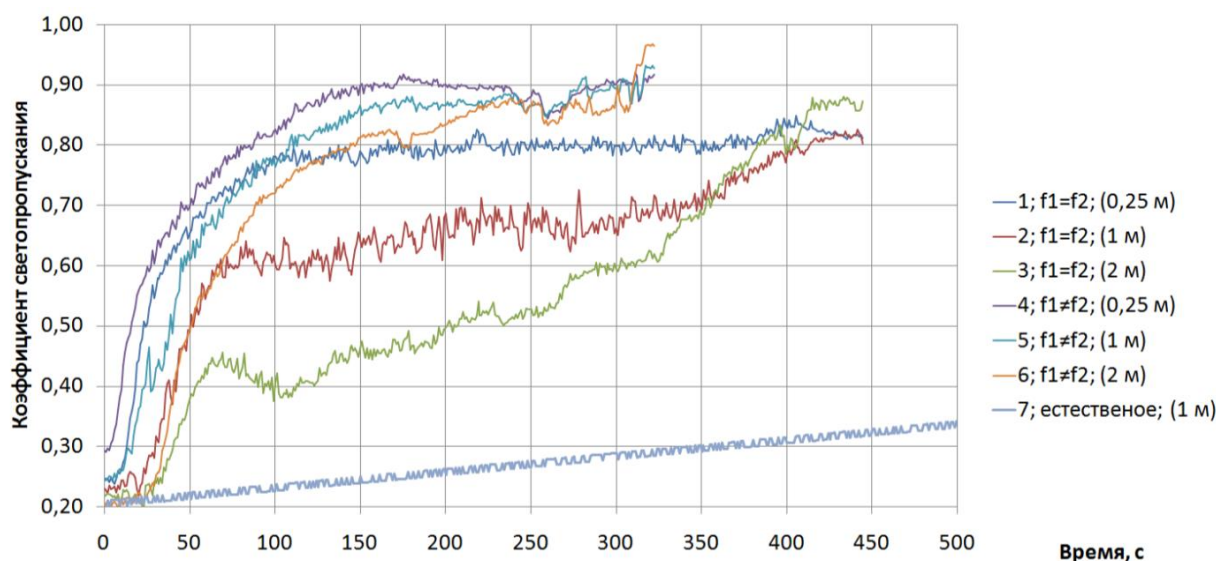


Рисунок 2 –Изменение коэффициента светопропускания от времени ультразвукового воздействия.

Коэффициент светопропускания (T) оценивался по формуле 1.

$$T = \frac{I_t}{I_0} \quad (1)$$

I_t – интенсивность излучения, прошедшая через частицы дыма; I_0 – исходная интенсивность излучения (в пустой камере, без дыма).

Двухчастотная УЗ коагуляция дыма обеспечила на расстоянии 1 м, коэффициент светопропускания 0,8, а на 2 м – 0,9 (в сравнении с одночастотным воздействием двумя излучателями 0,65 и 0,5), а при воздействии одним излучателем на расстоянии 2 м не более 0,6). Из полученных зависимостей следует, что скорость осаждения дыма увеличилась при использовании двух излучателей не менее чем в 6-7 раз при одночастотном УЗ воздействии и не менее чем в 9-11 при двухчастотном УЗ воздействии при создании акустических полей, с равными уровнем звукового давления 145– 150 дБ. При этом, полное осаждение дыма при двухчастотном УЗ воздействии происходило до двух раз быстрее, в сравнении с УЗ

воздействием аналогичными двумя излучателями, работающими на одной частоте. Это свидетельствует об эффективности воздействия на дымы УЗ полями сложной структуры.

2 Массив ультразвуковых излучателей для разрушения дыма

Для выявления условий максимально эффективного УЗ воздействия несколькими излучателями были проведены исследования на специальном стенде, позволяющем измерять уровень звукового давления в закрытом помещении при изменении межосевого расстояния между дисковыми излучателями и угла наклона акустической оси (рис. 3).

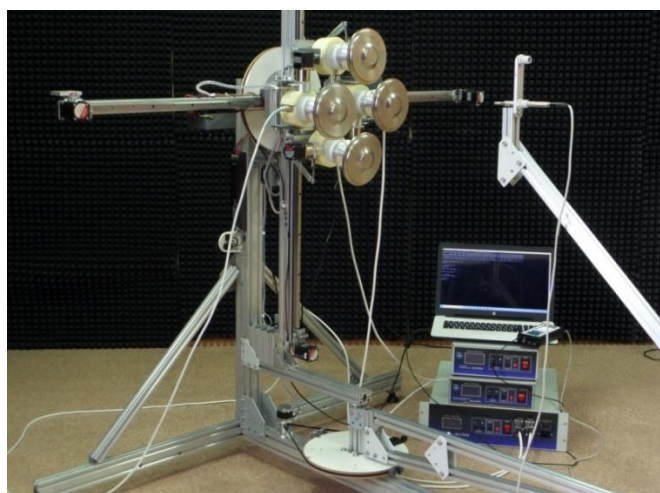
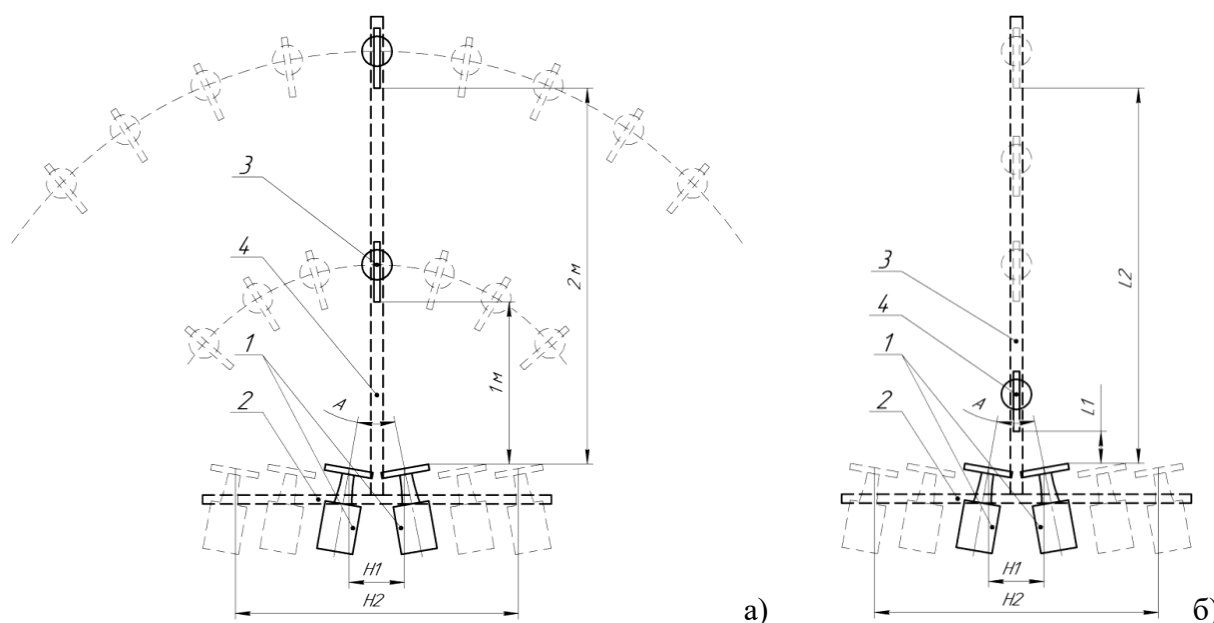


Рисунок 3 – Внешний вид измерительного стенда – с четырьмя УЗ излучателями и тремя электронными генераторами (один из них многоканальный).

На рис. 4 приведена структурная схема стенда, иллюстрирующая возможности контроля параметров УЗ воздействия.



1 – УЗ излучатели, 2 – механизм изменения межосевого расстояния и наклона акустической оси, 3 – микрофон шумомера, 4 – стойка перемещения микрофона шумомера.

Рисунок 4 – Структурная схема стенда для измерения диаграммы направленности (а) и погонного затухания (б) при изменении межосевого расстояния между УЗ излучателями от H_1 до H_2 и угла наклона A акустических осей УЗ излучателей.

Диаграммы направленности на расстоянии в 1 м при фиксированном межосевом расстоянии в 210 мм и изменении угла наклона акустических осей УЗ излучателей приведены на рис.5. Максимальный уровень звукового давления, равный 162 дБ достигался при угле наклона акустических осей в 10° .

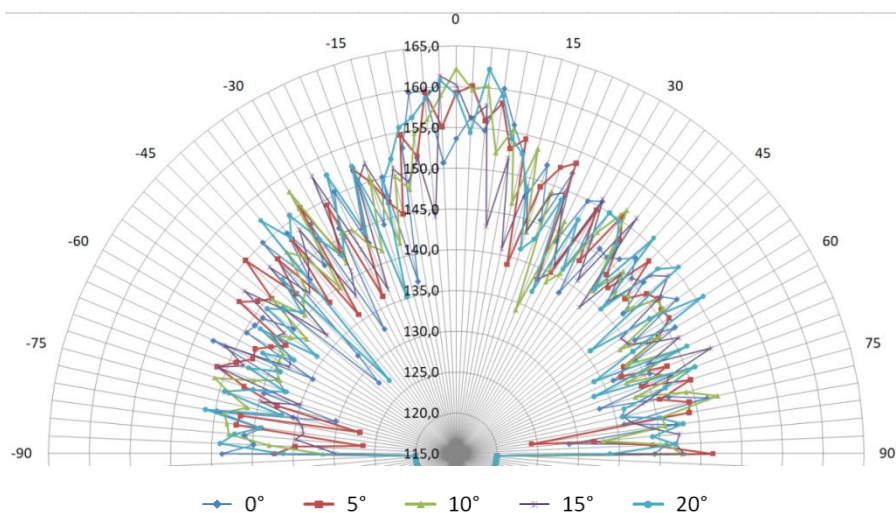


Рисунок 5 – Семейство диаграмм направленности (на расстоянии 1 м, межосевое расстояние 210 мм) при углах наклона акустических осей 0° , 5° , 10° , 15° и 20° .

При дальнейшем увеличении межосевого расстояния между УЗ излучателями увеличение уровня звукового давления отмечено не было.

Аналогичная картина наблюдалась при построении диаграммы направленности на расстоянии 2 м (рис. 6).

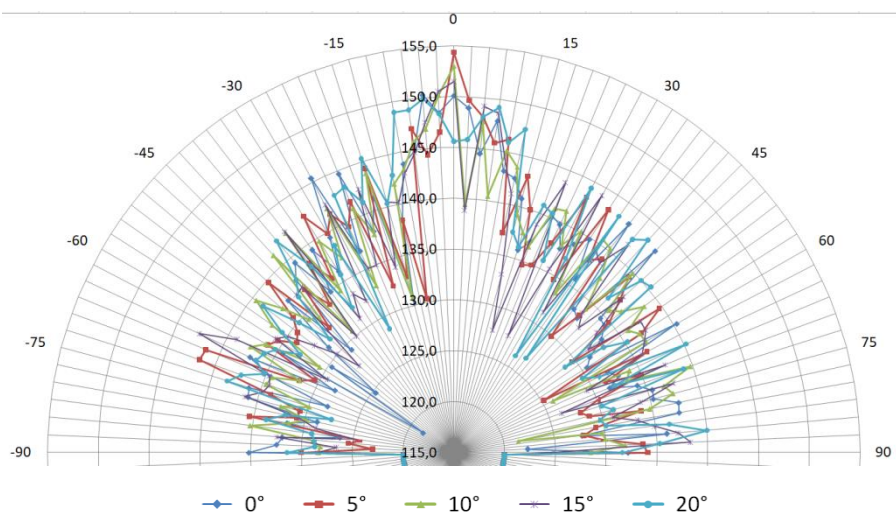


Рисунок 6 – Семейство диаграмм направленности (на расстоянии 2 м, межосевое расстояние 210 мм) при углах наклона акустических осей 0° , 5° , 10° , 15° и 20° .

Максимальный уровень звукового давления достигал 154-155 дБ при расстоянии между излучателями 210 мм и при угле наклона акустической оси в 5 градусов.

На рис. 7 приведены результаты измерения погонного затухания при изменении межосевого расстояния и фиксированного угла наклона акустических осей УЗ излучателей.

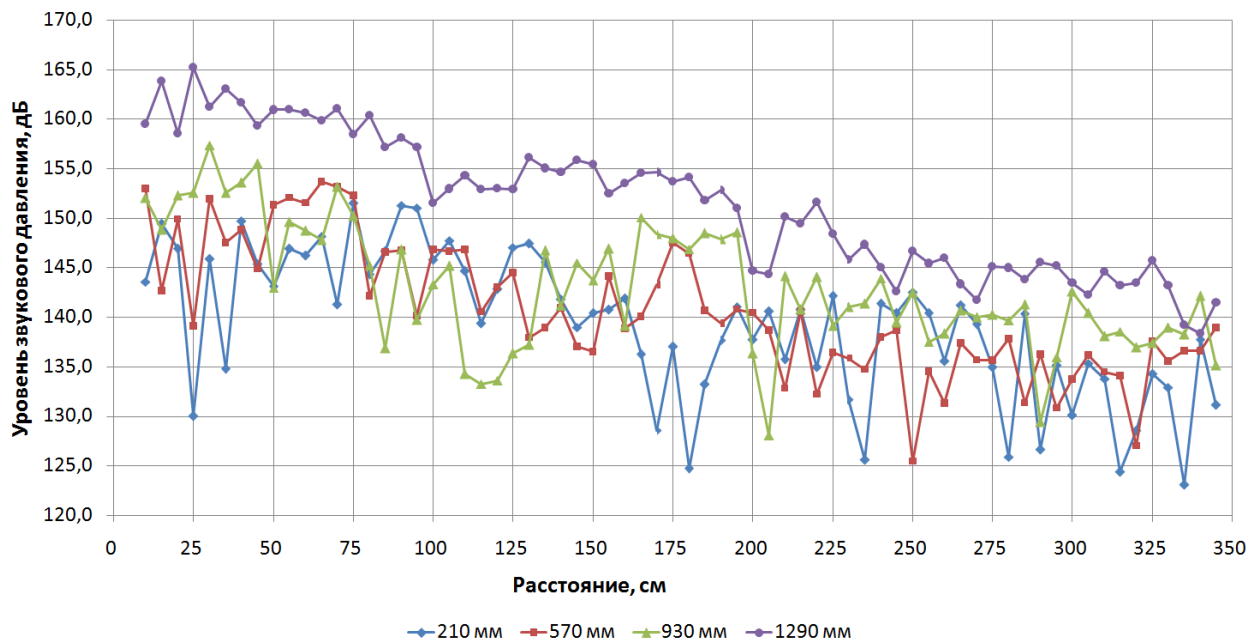


Рисунок 7 – Погонное затухание (угол наклона 0°).

Из анализа зависимостей следует, что минимальные колебания уровня звукового давления достигаются при межосевом расстоянии в 1290 между УЗ излучателями.

Зависимости погонного затухания от угла наклона акустической оси УЗ излучателей обнаружено не было (рис. 8).

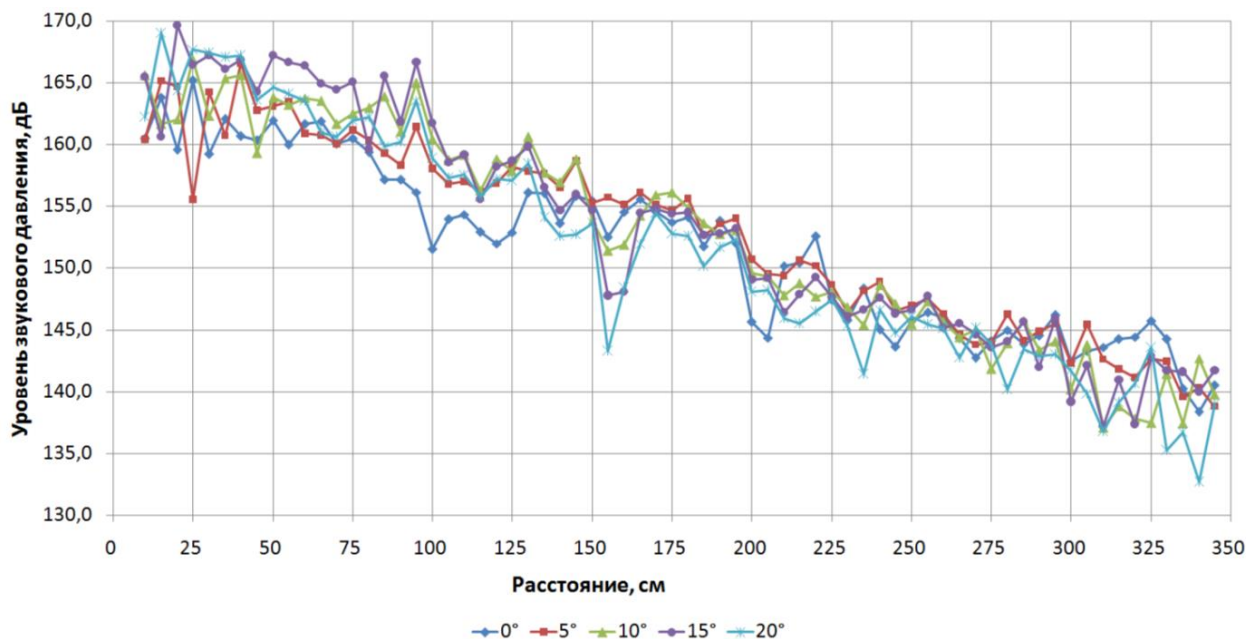


Рисунок 8 – Погонное затухание (межосевое расстояние 1290 мм).

Таким образом, можно сделать вывод о том, что, при реализации вращения массива УЗ излучателей относительно своей оси (при одновременном изменении угла наклона акустических осей и межосевого расстояния) с одновременным перемещением всего массива по замкнутому помещению будет осуществляться эффективное УЗ разрушение дыма во всем помещении.

Заключение

1. Показано повышение эффективности разрушения дыма двумя излучателями при двухчастотном УЗ воздействии в среднем в 1.5 раза по сравнению с одночастотным.
2. Предложен массив из четырех УЗ излучателей, позволяющий при варьировании геометрических параметров которого (изменение угла наклона акустической оси и межосевого расстояния между дисковыми излучателями) формировать необходимые и достаточные для разрушения дыма колебания:
 - на расстоянии в 1 м в виде полусферы, в которой уровень звукового давления будет не менее 145-146 дБ;
 - на расстоянии в 2 м в виде телесного угла (угол раскрытия 90 градусов), в котором уровень звукового давления будет не менее 140-141 дБ.

Список литературы

1. Zhang, G.; Ma, Z.; Shen, J.; Zhang, K.; Wang, J.; Chi, Z. Experimental study on eliminating fire smokes using acoustic agglomeration technology. // J. Hazard. Mater. 2019, 382, 121089, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121089>.
2. Liu, J.; Zhang, G.; Zhou, J.; Wang, J.; Zhao, W.; Cen, K. Experimental study of acoustic agglomeration of coal-fired fly ash particles at low frequencies. // J. Powder Technology, 2009, 193, 20–25.
3. Riera, E.; Cardoni, A.; Gallego-Juárez, J.A.; Acosta, V.M.; Blanco, A.; Rodríguez, G.; Blasco, M.; Herranz, L.E. Recent advances in the development and application of power plate transducers in dense gas extraction and aerosol agglomeration processes. // J. Phys. Procedia. 2015, 63, 67–72.
4. Khmelev, V.N.; Shalunov, A.V.; Nesterov, V.A.; Terentiev, S.A.; Golykh, R.N. Improving agglomeration efficiency of aerosols with sizes less than 2.5 μm by generation of vortex streams in inhomogeneous ultrasonic field. // Ultrasonics 2024, 142, 107376.
5. Kuznetsov, G.V.; Piskunov, M.V.; Strizhak, P.A. How to improve efficiency of using water when extinguishing fires through the explosive breakup of drops in a flame: Laboratory and field tests. // International Journal of Thermal Sciences, 121. 2017, 398–409.
6. V. N. Khmelev, A. V. Shalunov, S. N. Tsyganok Smoke precipitation by exposure to dual-frequency ultrasonic oscillations. // Fire. 2024. Vol. 7, No. 12. P. 476.

УДК: 66.084.8:66.047.45

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39678

Реализация ультразвукового воздействия для сушки материалов

В.Н. Хмелев^а, А.В. Шалунов^б, С.А. Терентьев^с

*Бийский технологический институт (филиала) ФГБОУ ВО «Алтайский
государственный технический университет им. И.И. Ползунова». 659305, Алтайский край, г.*

Бийск, ул. Героя Советского Союза Трофимова, д. 27.

E-mail: ^аvnh@bti.secna.ru, ^бshalunov@bti.secna.ru, ^сsergey@bti.secna.ru

Аннотация: Удаление влаги является важным этапом различных технологических процессов, особенно в химической, пищевой и биофармацевтической промышленности. Особое внимание уделяется решению проблемы ускорения сушки существенно отличающихся по структуре легкоокисляемых, термолабильных, биологически активных, горючих и взрывчатых веществ. Сегодня доказано, что процесс сушки при ультразвуковом (УЗ) воздействии является эффективным для различных продуктов, поскольку позволяет не только ускорять процесс, но обеспечивает улучшенное качество восстанавливаемых продуктов. Эффективность сушки ультразвуком обеспечивается за счет реализации кавитационных эффектов и капиллярного переноса влаги, что позволяет сохранять структуру и свойства капиллярно-пористых материалов. Однако, ускорение процесса 20-30% является недостаточным, а для коллоидных и коллоидных капиллярно-пористых материалов, к которым относится большая часть фармацевтических и биологически активных продуктов, ультразвуковая сушка на сегодняшний день практически не применяется. Проводимые в настоящее время исследования направлены на ускорение процессов удаления влаги за счет выявления и оптимизации условий и режимов УЗ воздействия, а также на максимальное сохранение качества и полезных свойств термолабильного и биологически активного материала. Представленные результаты исследований позволяют выявить оптимальные режимы реализации процессов сушки различных материалов, предложить и разработать их аппаратное оформление для обеспечения промышленного применения и реализации всех преимуществ ультразвукового способа сушки.

Ключевые слова: ультразвуковые колебания, сушка, излучатель, кавитация, ультразвуковой аппарат.

Implementation of ultrasonic action for drying materials

V.N. Khmelev^a, A.V. Shalunov^b, S.A. Terentiev^c

*Biysk Technological Institute (Branch) Altai State Technical University, 659305, Altai Territory,
Biysk, st. Hero of the Soviet Union Trofimov, 27.*

E-mail: ^avnh@bti.secna.ru, ^bshalunov@bti.secna.ru, ^csergey@bti.secna.ru

Abstract: Moisture removal is a crucial step in various technological processes, particularly in the chemical, food, and biopharmaceutical industries. Particular attention is paid to accelerating the drying of readily oxidizable, heat-labile, biologically active, flammable, and explosive substances with significantly different structures. Ultrasonic drying has been proven to be effective for a variety of products, not only accelerating the process but also improving the quality of the recovered products. Ultrasonic drying is effective due to cavitation effects and capillary moisture transfer, which preserves the structure and properties of capillary-porous materials. However, a 20-30% process acceleration is insufficient, and ultrasonic drying is currently rarely used for colloidal and colloidal capillary-porous materials, which include most pharmaceutical and biologically active products. Current research is aimed at accelerating moisture removal processes by identifying and optimizing ultrasonic conditions and modes, as well as maximizing the quality and beneficial properties of heat-sensitive and biologically active materials. The presented research results allow us to identify optimal drying modes for various materials and propose and develop equipment for their industrial application and the full benefits of ultrasonic drying.

Keywords: ultrasonic vibrations, drying, transducer, cavitation, ultrasonic apparatus.

PACS: 43.35.Zc

Введение

В настоящее время наиболее доступным и распространённым способом обезвоживания влажных материалов является конвективная сушка. На ее долю приходится более 90 % промышленных сушильных процессов [1]. Нагрев материала, при конвективном способе подвода тепла значительно ограничивает его применимость для сушки легкоокисляемых, термолабильных, биологически активных, горючих и взрывчатых веществ. Такой способ сушки характеризуется рядом принципиальных недостатков – длительностью процесса, особенно при низких температурах, требует значительных энергозатрат на перевод влаги в пар, не обеспечивает равномерности сушки и, как следствие, ухудшает все полезные свойства высушиваемых материалов.

Для обеспечения высокого качества продуктов применяют и развивают другие способы сушки (лиофильная, СВЧ, инфракрасная), наиболее эффективной из которых считается лиофильная сушка. Отрицательные температуры во время сушки позволяет сохранять

свойства термолабильных материалов в целом и химико-биологические свойства биоматериалов в частности. Однако высокие энергозатраты при длительности процесса и сложность реализации лиофильной сушки существенно ограничивают ее применение.

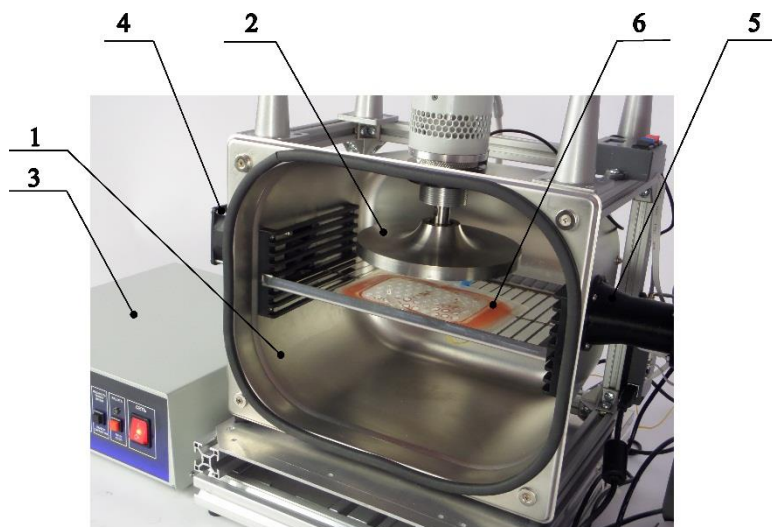
В последние годы, для решения этих проблем предлагается использовать сушку, основанную на реализации воздействия ультразвуковыми колебаниями на материалы. Такой способ хорошо зарекомендовал себя при сушке растительных материалов, содержащих активные ингредиенты, полимерных и композитных материалов [2-5]. В отличие от других, относительно новых способов воздействия на высушиваемые материалы (СВЧ, инфракрасная), ультразвуковая сушка не приводит к недопустимому повышению температуры, локальным перегревам и неравномерностям высушивания.

Энергетическая эффективность УЗ сушки подтверждена экспериментальными работами, где в качестве объектов сушки использовались капиллярно-пористые материалы. Теоретически и экспериментально доказано, что процесс бесконтактной ультразвуковой сушки осуществляется не только за счет фазового перехода жидкости в газообразное состояние, но и за счет ультразвукового диспергирования (распыления) жидкости из капилляров материала [6]. В результате анализа процессов установлено, что максимальная производительность УЗ сушки достигается в случае равенства ребер кубика высушиваемого материала длине волны УЗ колебаний в воздухе [7]. Также, в результате теоретических и экспериментальных исследований выявлено, что при уровне звукового давления менее 150 дБ процесс диспергирования практически отсутствует, а при уровне звукового давления, превышающем 170 дБ рост производительности диспергирования существенно замедляется, поскольку в части капилляров кавитационные пузырьки достигают максимального размера, равного размеру капилляра, и схлопывания не происходит. Проведенные многочисленные исследования УЗ сушки показывают снижение энергетических затрат до 1,7 раза, а продолжительность процесса до 1,9 раза, по сравнению с конвективной сушкой [7-10]. В целом, сегодня широко представлены работы по УЗ сушке фруктов, овощей и других капиллярно-пористых материалов. При этом значительно меньше исследований по УЗ сушке жидких, коллоидных биоматериалов, крови и ее компонентов.

1 Экспериментальная установка для УЗ сушки

Для лиофилизации компонентов донорской крови применяют специальные контейнеры. Контейнер представляет собой замкнутый плоский объем из гибкой паро-газо-гидронепроницаемые плёнки. В одной стенке контейнера выполнены круглые отверстия, которые закрывает гидрофобная паро-газопроницаемая мембрана из нетканого материала. Мембрана препятствует вытеканию продукта из контейнера, но пропускает пар, образующийся при сушке продукта.

Для проведения исследований по УЗ сушке коллоидных тел была разработана экспериментальная установка (рис. 1).



1 – сушильный шкаф; 2 – дисковый УЗ излучатель; 3 – УЗ генератор; 4, 5 – входной и выходной патрубки для воздуха;
6 – высушиваемый продукт с термопарой

Рис. 1. Экспериментальная установка для УЗ сушки материалов

Установка представляет собой сушильный шкаф 1 из нержавеющей стали в котором располагается УЗ дисковый излучатель 2 диаметром 146 мм. Дисковый излучатель подключен к генератору 3, который формирует электрические колебания с частотой 22 кГц. С противоположных сторон сушильного шкафа располагаются входной и выходной патрубки 5, 6 для создания потока воздуха над высушиваемым материалом 6. В нижней части контейнера прикреплена термопара. В процессе сушки шкаф закрывается прозрачной крышкой с магнитным креплением (на рис. 1 не показана).

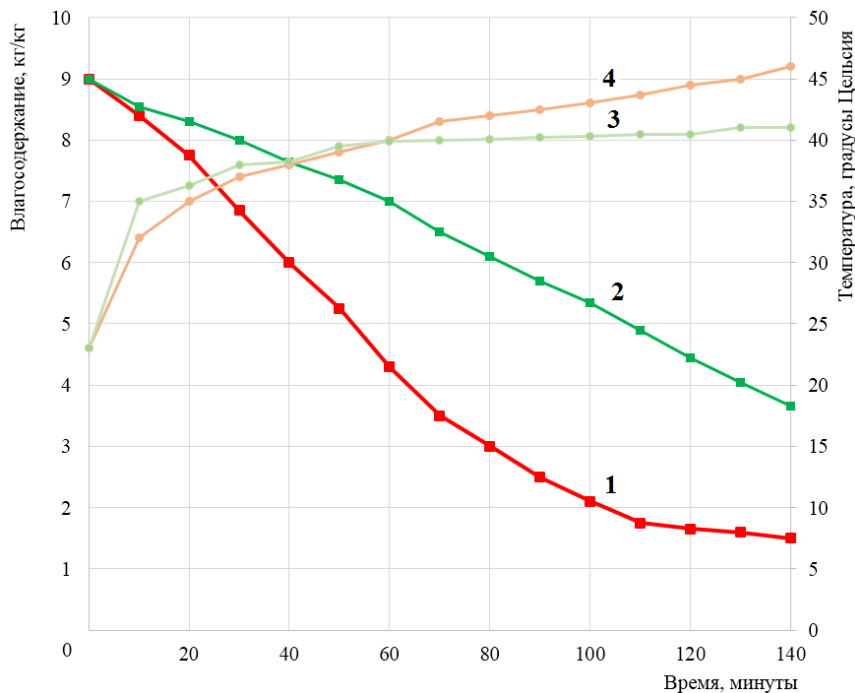
При реализации процесса осуществляется непрерывный контроль процесса удаления влаги взвешиванием высушиваемого материала, режимов УЗ воздействия, температуры материала, влажности воздуха на входе и выходе из камеры.

2 Результаты для обсуждения

В качестве объекта сушки было предложено использовать натуральный томатный сок массой 20 грамм, размещаемый в контейнере для сушки плазмы крови. Контейнер с томатным соком располагался мембраной вверх под излучателем, на расстоянии 30 мм от него. Внутри сушильного шкафа создавался уровень звукового давления 163 ± 3 дБ. Скорость потока воздуха над контейнером составляла $4,0 \pm 0,2$ м/с, а температура на входе составляла 23 ± 1 °С. Полученные результаты сушки томатного сока представлены на рис. 2.

В представленных зависимостях, характеризующих процесс УЗ сушки можно выделить два периода сушки: постоянная скорость сушки (при влагосодержании продукта более 2-3 кг/кг)

и падающая скорость сушки (при влагосодержании продукта менее 2-3 кг/кг). При этом температура контейнера монотонно росла, достигнув значения 46°C. Рост температуры



1 – кривая УЗ сушки; 2 – кривая конвективной сушки; 3 – температура контейнера при конвективной сушке;
4 – температура контейнера при УЗ сушке

Рис. 2. Кинетика сушки томатного сока

высушиваемого продукта объясняется, во-первых, нагревом УЗ дискового излучателя до температуры 53°C, а во-вторых, преобразованием УЗ колебаний в тепловую энергию.

Для определения влияния повышенной температуры на процесс УЗ сушки было решено провести сравнительные испытания с использованием только конвективной сушки при входящей температуре воздушного потока 53°C, при этом скорость потока осталась неизменной. Из графиков на рис. 2 видно, что температура высушиваемого материала монотонно возрастала до 42°C. Однако продолжительность конвективной сушки томатного сока до влагосодержания 4 кг/кг составила 131 минуты. УЗ сушка позволила получить продукт с таким же содержанием влаги за 63 мин. Таким образом, скорость УЗ сушки в 2 раза превышает скорость конвективной сушки при одинаковой температуре высушиваемого продукта и скорости потока воздуха.

В результате проведенных исследований было установлено следующее:

- 1) при бесконтактной УЗ сушке на малых расстояниях от излучателя происходит нагрев высушиваемого продукта;
- 2) тепловое воздействие не является единственным механизмом УЗ воздействия, ускоряющим процесс сушки;
- 3) предположительно, на ускорение процесса УЗ сушки коллоидных тел в специальных контейнерах оказывают влияние следующие механизмы:

- а) вибрация стенок контейнера и мембраны;
- б) микропотоки у поверхности мембраны, которые уменьшают диффузионный слой;
- в) проникновение УЗ колебаний через мембрану.

В результате дальнейших экспериментальных и теоретических исследований по сушке коллоидных тел в контейнерах предполагается выявить степень влияния различных механизмов на интенсификацию процесса УЗ сушки.

Заключение

Проведенные исследования на разработанной экспериментальной установке для ультразвуковой и (или) конвективной сушки материалов подтвердили эффективность и перспективность УЗ сушки коллоидных материалов.

Размещение образца материала (томатный сок) в специальном контейнере с паропрозрачной мембраной на расстоянии 30 мм от дискового излучателя, создающего УЗ колебания с уровнем звукового давления 163 ± 3 дБ во всем объеме сушильного шкафа обеспечивало помимо нагрева, по-видимому, вибрацию стенок контейнера и мембраны, а также микропотоки у поверхности мембраны, что приводило к ускорению процесс УЗ сушки.

Результаты исследований по сушке коллоидного материала показали возможность ускорения процесса УЗ сушки в 2 раза по сравнению с конвективной при тех же условиях.

Список литературы

1. *Айнштейн В.Г., Захаров М.К., Носов Г.А.* Процессы и аппараты химической технологии. Общий курс: в 2 кн. / Под ред. В.Г. Айнштейна // 5-е изд. (эл.) М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. 1758 с.
2. *Huang D., Men K., Li D., Wen T., Gong Z., Sunden B., Wu Z.* Application of ultrasound technology in the drying of food products. // *Ultrasonics sonochemistry*. 2020. **63**. 104950.
3. *Wijayanti I., Sookchoo P., Prodpran T., Mohan C. O., Aluko R. E., Benjakul S.* Physical and chemical characteristics of Asian sea bass bio-calcium powders as affected by ultrasonication treatment and drying method. // *Journal of Food Biochemistry*. 2021. **45**(4). e13652.
4. *Hwang S., Han Y., Gardner D.J.* Characterization of CNC nanoparticles prepared via ultrasonic-assisted spray drying and their application in composite films. // *Nanomaterials*, 2023. **13**(22). 2928.
5. *Шалунов А.В., Хмелев В.Н., Терентьев С.А., Нестеров В.А., Голых Р.Н.* Обезвоживание пищевых продуктов под действием ультразвуковых колебаний с удалением влаги без фазового перехода. // *Техника и технология пищевых производств*. 2021. **51**. № 2. С. 363-373.

6. *Шалунов А.В., Хмелев В.Н., Терентьев С.А., Нестеров В.А.* Выявление режимов и условий удаления влаги из материалов бесконтактным воздействием ультразвуковых колебаний. // Инженерно-физический журнал. 2022. **95**. № 4. С. 925-933.
7. *Khmelev V., Shalunov A., Terentiev S., Golykh R., Nesterov V.* Ultrasonic dehydration of materials without liquid-vapor transition. // *Drying Technology*. 2024. **42**(6). P. 967-979.
8. *Kahraman O., Malvandi A., Vargas L., Feng H.* Drying characteristics and quality attributes of apple slices dried by a non-thermal ultrasonic contact drying method. // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2021. **73**. 105510.
9. *Yildiz G., Gao Y., Ding J., Zhu S., Chen G., Feng H.* Enhancing physicochemical, bioactive, and nutritional properties of sweet potatoes: Ultrasonic contact drying with slot jet nozzles compared to hot-air drying and freeze drying. // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2025. **112**. 107216.
10. *Xu J., Wang D., Lei Y., Cheng L., Zhuang W., Tian Y.* Effects of combined ultrasonic and microwave vacuum drying on drying characteristics and physicochemical properties of *Tremella fuciformis*. // *Ultrasonics sonochemistry*. 2022. **84**. 105963.

УДК 534.2

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39679

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ
ЧАСТОТЫ И АМПЛИТУДЫ ПУЛЬСАЦИЙ ГАЗОВОГО ПОТОКА НА ПРОЦЕСС
СУШКИ СФЕРИЧЕСКОЙ ПОРИСТОЙ ЧАСТИЦЫ**

Зайнутдинова Д.А.^{1а}, Павлов Г.И.^{2б}, Горбунова О.А.^{3с}, Теляшов Д.А.^{4д}

^{1,2,3,4} КНИТУ-КАИ, г. Казань;

E-mail: ^аzajnutdinova-dinara@mail.ru

Аннотация. В данной статье представлено экспериментально-теоретическое исследование влияния частоты и амплитуды пульсаций газового потока на процесс сушки сферической пористой частицы, в частности, керамзита. Проведены численные исследования, позволившие выявить зависимость времени удаления поверхностной и связанной влаги от параметров пульсаций воздуха. Исследования проводились на частотах, равных 50, 100, 150, 200 и 250 Гц и амплитудах колебания 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 0,9 от средней скорости потока. Для подтверждения адекватности модели выполнены эксперименты, которые показали, что расхождение между численными результатами и экспериментальными данными не превышает 17 %. Полученные результаты позволяют оптимизировать процессы сушки пористых материалов, повышая их эффективность и сокращая энергозатраты.

Ключевые слова. Сушка, пористая частица, пульсации, частота и амплитуда, пульсирующий газовый поток.

**EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDY OF THE INFLUENCE OF
THE FREQUENCY AND AMPLITUDE OF PULSATIONS OF A GAS
STREAM ON THE DRYING PROCESS OF A SPHERICAL POROUS
PARTICLE**

Zainutdinova D.A.^{1а}, Pavlov G.I.², Gorbunova O.A.³, Telyashov D.A.⁴

^{1,2,3,4} KNRTU-KAI, Kazan;

e-mail: ^аzajnutdinova-dinara@mail.ru

Abstract. This article presents an experimental and theoretical study of the effect of the frequency and amplitude of gas flow pulsations on the drying process of spherical porous particles, in particular, expanded clay. Numerical studies have been carried out to reveal the dependence of the removal time

of surface and bound moisture on the parameters of air pulsations. The studies were carried out at frequencies equal to 50, 100, 150, 200 and 250 hz and oscillation amplitudes of 0.1; 0.3; 0.5; 0.7; 0.9 of the average flow velocity. To confirm the adequacy of the model, experiments were performed, which showed that the discrepancy between the numerical results and experimental data does not exceed 17%. The results obtained make it possible to optimize the drying processes of porous materials, increasing their efficiency and reducing energy consumption.

Keywords. Drying, porous particle, pulsations, frequency and amplitude, pulsating gas flow.

Введение

Известно достаточное количество работ, как теоретических, так и экспериментальных, по исследованию взаимодействия колеблющихся газовых сред с твердыми частицами [1,2,3]. В основном, колебательные процессы рассматриваются в контексте ускорения сушки твердых увлажненных частиц. Как отмечают исследователи [1] в некоторых случаях, наложение пульсаций на среднюю скорость газового потока ускоряет процесс сушки. Но есть и работы, утверждающие об обратном. Известно, что частоты и амплитуды пульсаций скорости потока газа по разному влияют на скорость сушки. Авторы статей утверждают, что положительное воздействие пульсирующих газов на высушиваемый материал наблюдается в области высоких звуковых и ультразвуковых частот, когда как в работе [4] указывается другой диапазон частот - от 100 до 300 Гц. Несмотря на множество публикаций, в вопросах взаимодействия твердых дискретных частиц с пульсационными газовыми потоками остается много неясного. Например, в литературе отсутствует информация о дифференцированном влиянии параметров пульсации на поверхностную и связанную влагу. Целью данной работы является численное исследование влияния частоты и амплитуды пульсирующего газового потока на кинетику удаления влаги со сферической частицы диаметром 1 см в разные периоды сушки.

Результаты и обсуждение

До проведения численных исследований проводились предварительные расчеты с заданными исходными данными, результаты которых верифицировались путем сравнения с данными экспериментов. Эксперименты проводились на установке, которая позволяла физически воспроизвести все заданные и рассчитываемые параметры. Подробное описание такой установки приведено в работе [5]. На установке сушка частицы проводилась при следующих исходных данных: скорость газового потока – 1,8 м/с, температура воздушного потока – 120 ° С, диаметр частицы – 1 см, начальное влагосодержание частицы – 14,15%, частота пульсаций – 120 Гц, амплитуда пульсаций 0,1 (от средней скорости потока). По

экспериментальным результатам был построен график зависимости изменения влаги в частице в зависимости от времени (Рис. 1). В эту же систему координат были внесены результаты численных исследований, полученных для этих же исходных данных.

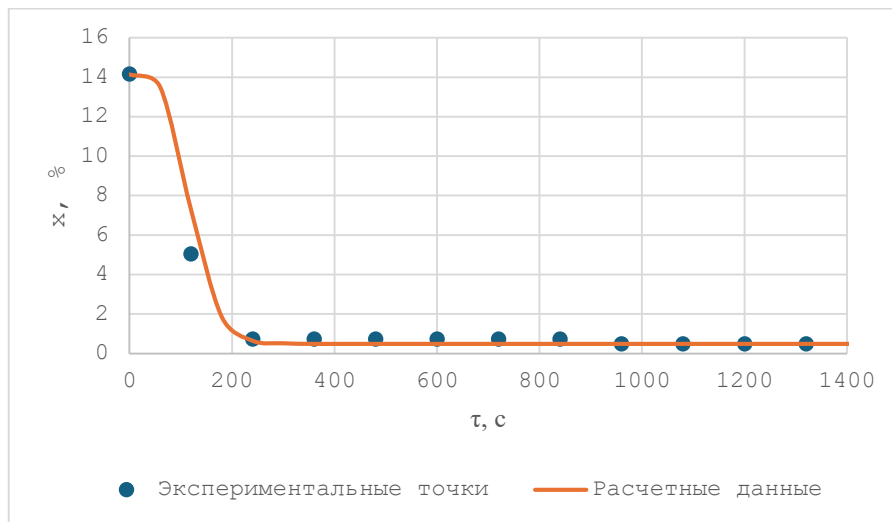


Рис. 1. Графики зависимости влагосодержания частицы от

Анализ результатов показывает, что экспериментальные данные достаточно близко располагаются к результатам численных исследований. Причем, такая картина наблюдается во всем диапазоне изменений влагосодержания. Расхождение результатов в отдельных точках не превышает 17 %. Значения конечного времени сушки, зафиксированные при расчетах и в эксперименте, идеально совпадают и равно 1400 с. На основе анализа полученных результатов можно сделать вывод, что предлагаемая модель с достаточной точностью описывает тепломассообмен между увлажненной твердой частицей и пульсирующим воздушным потоком. При заданных начальных значениях и принятых граничных условиях результаты расчетов будут достоверны. При моделировании тепломассообмена в газовом потоке с увлажненной пористой частицей были заданы следующие параметры. Диаметр частицы – 1 см, средняя скорость воздушного потока – 1,5 м/с, его температура – 150 ° С, начальная относительная влажность частицы – 19 %, конечная влажность – 1,7 %. Рассмотрены частоты пульсаций 50, 100, 150, 200, 250 Гц и амплитуды пульсаций скорости (от средней скорости потока газа) 0,1, 0,3, 0,5, 0,7, 0,9. Моделирование проводилось методом вычислительной гидродинамики в программной среде COMSOL Multiphysics. Описание математической модели приведено в [6].

Численно исследовалось влияние на сушку частицы частоты и амплитуды пульсаций скорости газа на удаление поверхностной и связанной влаги. Результаты представлены ниже в графической форме (Рис. 2-3).

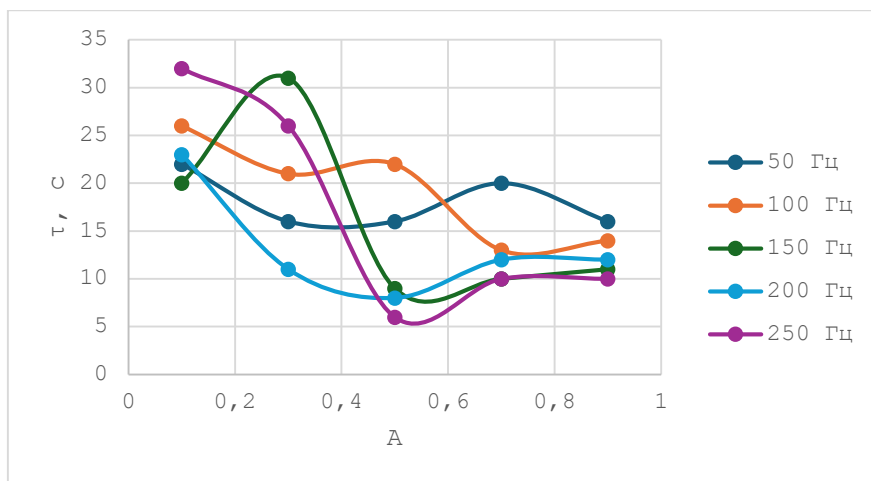


Рис. 2. Графики зависимости времени удаления поверхностной влаги от амплитуды пульсаций на разных значениях частот

Из полученных графиков функции $\tau = f(A)$, построенных для разных частот и относящихся к поверхностной влаге (рис. 2.) следует, что режим обдува и параметры пульсационного потока в сильной степени влияют на скорость удаления влаги. В рассмотренном варианте можно выделить два наиболее эффективных режима: низкочастотный (50 Гц) и высокочастотный (150 Гц и более). Сравнение временных показателей (Рис. 2) свидетельствует, что эффективность влияния низкочастотного режима на теплообмен между частицей и окружающей газовой средой выше, чем при высокочастотном режиме. Необходимо также отметить, что при низкочастотном режиме на удаление поверхностной влаги тратится не более 16 с, что составляет 13 % от общего потребного времени на сушку частицы. На поверхности пористой частицы и в самой частице при обдуве газовым потоком происходят сложные физические процессы. Они до сих пор до конца не изучены. Во время быстрого порыва газа старый пограничный слой сдувается, и на его месте образуется новый, более тонкий, обеспечивая больший градиент температуры и концентрации у поверхности. Затем, пока поток замедляется, слой утолщается, но следующий импульс снова его срывает.

При исследовании влияния режимов течения воздуха на связанную влагу получены аналогичные характеристики, что и для поверхностной влаги (Рис. 3). Но полученные результаты существенно отличаются от предыдущих:

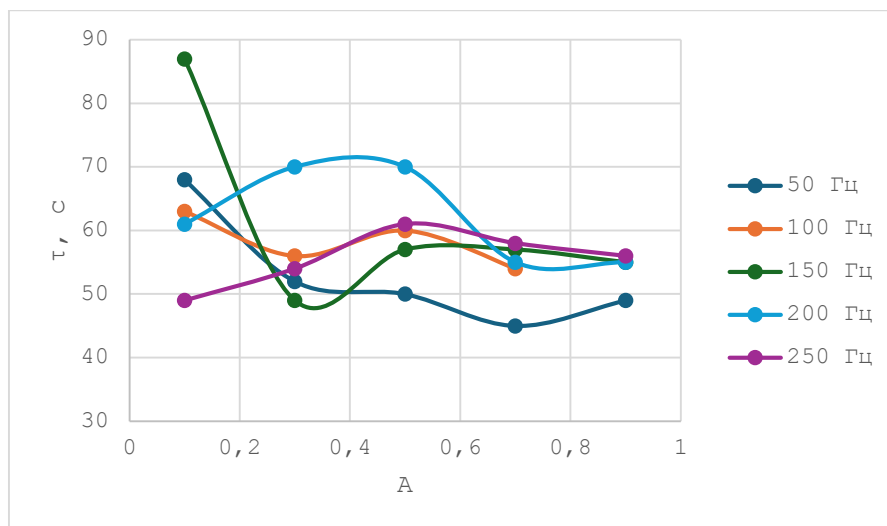


Рисунок 3 – Графики зависимости времени удаления связанной влаги от амплитуды пульсаций на разных значениях частотах

а) на удаление связанной влаги тратится почти 90 % от общего времени, когда как на поверхностную влагу - 13 %;

б) наименьшее время, затрачиваемое на удаление связанной влаги, соответствует режиму пульсационного течения газа с частотой 50 Гц и с большими амплитудами колебаний;

в) течение потока воздуха на других колебательных режимах на интенсивность удаления связанной влаги влияет мало. Предполагается, что пульсации газового потока на низких частотах и на больших амплитудах равномерно прогревают частицу за время одного цикла колебания, что создает благоприятные условия для диффузии влаги изнутри к поверхности за счет ослабления капиллярных сил внутри пор. Высокая амплитуда пульсаций газа за счет увеличения статического давления в момент торможения у поверхности частицы также может способствовать более глубокому проникновению молекул воздуха в поры, улучшая тем самым теплоотдачу и вентиляцию газовой полости.

Выводы.

1. Математические модели, разработанные для исследования тепломассообмена между увлажненной пористой твердой частицей и ламинарным подогретым воздушным потоком, движущимся в стационарном и пульсирующем режимах, адекватно описывают исследуемые процессы. Погрешность результатов расчетов по сравнению с экспериментальными данными не превышает 17 %.

2. График зависимости времени сушки от акустической мощности имеет нелинейный характер с ярко выраженными пиками и впадинами. На интенсивность сушки частицы при

обдуве пульсационным потоком влияет не только величина акустической мощности, но и значения частот и амплитуд пульсаций скорости. Замечено, что наилучший эффект достигается на малых акустических мощностях, соответствующих низким частотам колебания 50 Гц...150 Гц и амплитудам - более 0,3.

3. Режим обдува и параметры пульсационного потока в сильной степени влияют на скорость удаления поверхностной влаги. Положительный эффект наблюдается в области низких (50 Гц) и высоких частот (более 200 Гц). На частоте 50 Гц потребляемая акустическая мощность в 4..5 раз меньше, чем на высоких частотах.

4. На удаление связанной влаги большое влияние оказывает пульсационное течения газа с частотой 50 Гц и с большими амплитудами колебаний (выше 0,5).

Список литературы

1. *Жилин А.А.* Исследование процесса сушки пористых материалов при высокоинтенсивном акустическом воздействии // Инженерно-физический журнал, 2025. Т. 98, №7. С. 1949 – 1960.
2. *Хмелёв В.Н., Шалунов А.В., Терентьев С.А., Голых Р.Н., Нестеров В.А.* Выявление и исследование механизма удаления влаги из материалов при ультразвуковом бесконтактном воздействии // Инженерно-физический журнал. Т. 97, №4. С. 939 – 950. 2024.
3. *Chen Li.* Experimental investigation on drying performance of pharmaceutical granules in a pulsation-assisted fluidized bed / Li Chen, Carter Blocka, Lifeng Zhang // The Canadian Journal of Chemical Engineering. – P. 2608-2622. 2022.
4. *Зайнутдинова Д.А., Павлов Г.И., Горбунова О.А.* Экспериментально-теоретическое исследование взаимодействия сушильного агента с твердой увлажненной частицей / Сборник Трудов XXXVII сессии Российского акустического общества. – М., ООО «Издательство «ГЕОС», 2025. С. 1020-1027.
5. *Зайнутдинова Д.А., Теляшов Д.А., Накоряков П.В.* Лабораторный стенд для формирования в цилиндрической трубе газового потока с пульсационной составляющей / Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием «Актуальные проблемы механики сплошной среды — 2025», 29 сентября — 3 октября 2025 г. – Казань: Казанский ун-т, 2025. С. 214-218.
6. *Зайнутдинова Д. А., Павлов Г. И., Теляшов Д. А.* Численное исследование взаимодействия пульсирующего сушильного агента с твердой пористой увлажненной частицей // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. Том 12. № 1 (45). С. 63–80. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2026-12-1-63-80>. 2026.

УДК: 534.2.

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39680

**Компьютерное моделирование и оптимизация низкочастотного
трехслойного пьезопреобразователя для геофизического каротажа
нефтяных скважин**

А.В. Наседкин^a, А.А. Наседкина^b, М.В. Павленко^c, А.Н. Рыбьянец^d

Южный федеральный университет. 344006 г. Ростов-на-Дону, ул. Б. Садовая, 105/42.

E-mail: ^aavnasedkin@sfedu.ru, ^baanasedkina@sfedu.ru, ^cmipa@sfedu.ru, ^danrybyanets@sfedu.ru

Аннотация: Проведено исследование трехслойного пьезопреобразователя, разрабатываемого для акустического каротажа в нефтяных скважинах. Излучатель состоит из центральной стальной пластины и двух пьезокерамических пластин. Активные пластины выполнены из пьезокерамики ЦТС-19, поляризованы по толщине, покрыты электродами по основным граням, перпендикулярным толщине, и соединены электрически параллельно. Ставится задача оптимизации данного преобразователя по максимуму амплитуды изгибных колебаний вблизи частоты первого резонанса при варьировании толщин пластин с одинаковой подаваемой напряженностью электрического поля. Решение задачи оптимизации было осуществлено в программном комплексе ANSYS с использованием средств Mechanical APDL, Workbench и DesignXplorer. Были составлены конечно-элементные модели отдельного пьезоизлучателя и пьезоизлучателя с акустической нагрузкой, имитирующей скважинную среду. Для каждого пьезоизлучателя с принятыми геометрическими параметрами вначале из решения задачи модального анализа определялась первая частота электрического резонанса, а затем проводился расчет пьезоизлучателя в режиме установившихся колебаний на резонансной частоте как ненагруженного, так и нагруженного на акустическую среду. В результате были определены наилучшие геометрические размеры пьезоизлучателя, существенно повышающие эффективность его применения в системах акустического каротажа скважин. Численные результаты были также подтверждены экспериментально для отдельных образцов пьезоизлучателя.

Ключевые слова: пьезоэлектрический преобразователь, акустический каротаж, резонансная частота, амплитудно-частотная характеристика, компьютерное моделирование, метод конечных элементов, оптимизация

Computer modeling and optimization of low-frequency three-layer piezoelectric transducer for geophysical logging of oil wells

A.V. Nasedkin^a, A.A. Nasedkina^b, M.V. Pavlenko^c, A.N. Rybyanets^d

Southern Federal University, 105/42 Bolshaya Sadovaya Str., Rostov-on-Don 344006, Russia.

E-mail: ^aavnasedkin@sfedu.ru, ^baanasedkina@sfedu.ru, ^cmipa@sfedu.ru, ^danrybyanets@sfedu.ru

Abstract: A study was conducted on a three-layer piezoelectric transducer being developed for acoustic logging in oil wells. The transducer consists of a central steel plate and two piezoelectric ceramic plates. The active plates are made of PZT-19 piezoelectric ceramic, polarized across their thickness, coated with electrodes along their main faces perpendicular to the thickness, and electrically connected in parallel. The objective was to optimize this transducer to maximize the amplitude of bending vibrations near the first resonance frequency while varying the plate thicknesses with the same applied electric field. The optimization problem was solved in the ANSYS software package using Mechanical APDL, Workbench, and DesignXplorer. Finite element models were created for a single piezoelectric transducer and a piezoelectric transducer with an acoustic load simulating a borehole environment. For each piezoelectric transducer with the adopted geometric parameters, the first electrical resonance frequency was first determined from the modal analysis problem solution, and then the transducer was calculated for steady-state oscillations at the resonant frequency, both unloaded and loaded on the acoustic medium. This resulted in the determination of the optimal geometric dimensions for the piezoelectric transducer, significantly increasing its efficiency in acoustic well logging systems. The numerical results were also confirmed experimentally for individual piezoelectric transducer samples.

Keywords: piezoelectric transducer, acoustic logging, resonant frequency, amplitude-frequency response, computer modeling, finite element method, optimization

PACS: 07.05.Tr

Введение

Одной из важнейших задач в нефтегазовой отрасли является задача поддержания и увеличения добычи углеводородов за счёт разведки и освоения новых нетрадиционных запасов с трудноизвлекаемыми ресурсами [1, 2]. Для решения этой задачи необходимо использование передового оборудования для геофизического каротажа скважин (ГИС) и применение современных методов обработки и интерпретации данных измерений. Для приборов ГИС, включающих пьезокерамические преобразователи, важнейшим этапом проектирования является предварительное компьютерное моделирование, которое может

быть эффективно проведено с использованием конечно-элементных (КЭ) технологий и соответствующих программных комплексов. Хорошо известно, что биморфные пьезопреобразователи изгибного типа, состоящие из двух пьезокерамических пластин, а также трехслойные (триморфные) пьезопреобразователи, в которых между пьезокерамическими пластинами добавлена еще металлическая пластина, широко используются в низкочастотных вибрационных приложениях [3]. Однако, по сравнению с монополярными кольцевыми преобразователями, биморфные и триморфные преобразователи генерируют, как правило, меньшее акустическое давление на низких частотах. В связи с этим, увеличение выходной мощности преобразователей является важной задачей, для решения которой могут быть применены современные методы оптимизации.

В настоящем материале доклада представлена методика исследования различных конфигураций низкочастотного триморфного изгибного пьезоизлучателя, предназначенного для акустического каротажа в нефтяных скважинах.

1 Постановка задачи

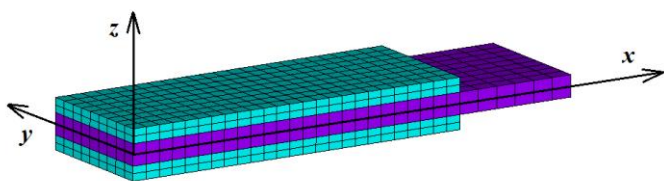
Рассматривались триморфные излучатели, состоящие из инертной центральной пластины и двух пьезокерамических пластин меньшей длины, но той же ширины, работающих в условиях акустического нагружения, имитирующего скважинную среду. Основные геометрические параметры принимались следующими: длина стальной пластины составляла $L_m=134$ (мм); пьезокерамические пластины имели длину $L_p=100$ (мм); ширина всех пластин равнялась $W=37,5$ (мм). Толщина как стальных, так и пьезокерамических пластин варьировалась для определения оптимальной конструкции. Центральная пластина была изготовлена из нержавеющей стали AISI 304, а пьезокерамические пластины – из пьезокерамики ЦТС-19 с материальными константами, приведенными в [4]. Пьезокерамические пластины были покрыты электродами на торцевых гранях, перпендикулярных толщине, поперечно поляризованы в одном направлении и соединены электрически параллельно. Металлическая пластина принималась жестко заземленной по торцевым граням, перпендикулярным направлению длины.

Ранее КЭ моделирование подобного пьезоизлучателя проводилось в [4] для определения его собственных частот и амплитудно-частотных характеристик (АЧХ), однако без учёта влияния акустической нагрузки. Аналитические подходы для модального анализа данного триморфа без акустической среды были описаны в [5, 6]. Здесь, следуя методологии, представленной в [7, 8], для оптимизации ключевых параметров АЧХ и для повышения эффективности триморфного излучателя под действием акустической нагрузки и без нее были проведены

вычислительные эксперименты с использованием специально разработанных программ для КЭ пакета APDL ANSYS.

В силу наличия симметрии по длине и ширине, КЭ модели строились для одной четверти пьезопреобразователя с условиями симметрии на соответствующих поверхностях. Пример такой модели показан на рис. 1 (а), где фиолетовым цветом изображены упругие элементы ANSYS SOLID186 металлической пластины, находящиеся в области $0 \leq x \leq L_m/2$, $0 \leq y \leq W/2$, $-h_m/2 \leq z \leq h_m/2$, а бирюзовым цветом – пьезоэлектрические элементы SOLID226 пьезокерамических пластин, находящиеся в областях $0 \leq x \leq L_p/2$, $0 \leq y \leq W/2$, $-h_m/2 - h_p \leq z \leq -h_m/2$, и $h_m/2 \leq z \leq h_m/2 + h_p$, где h_m , h_p – толщины металлической пластины и пьезокерамических пластин, соответственно, причем для рис. 1 (а) $h_m = h_p = 2$ (мм). На рис. 1 (б) в более мелком масштабе показана полная модель преобразователя в акустической среде с плотностью $\rho_a = 1 \cdot 10^3$ (кг/м³), со скоростью звука $c_a = 1.5 \cdot 10^3$ (м/с) и с динамической вязкостью $\mu_a = 1 \cdot 10^{-3}$ (Па·с). Красным цветом на рис. 1 (б) представлены акустические элементы FLUID220, а синим цветом – акустические элементы FLUID220 с опцией контакта с твердотельной структурой. Радиус акустической области скважины принимался равным $R_a = 75$ мм, а длина расчетной акустической области вдоль оси z бралась равной $h_a = 75$ мм. На гранях акустической области $z = \pm h_a/2$ задавались неотражающие импедансные условия, а на радиальной границе $r = R_a$ – граничное условие твердой стенки.

(а)



(б)

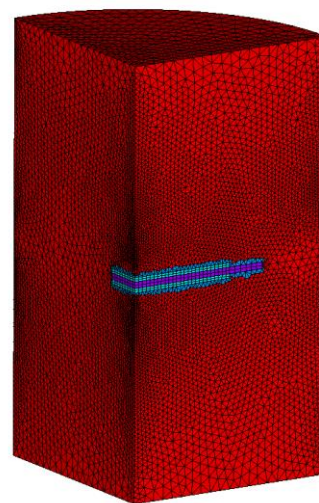


Рис. 1. КЭ модель четверти триморфа без акустической среды (а), КЭ сетка полной модели с учетом акустической среды (б)

Отметим, что здесь были выбраны конечные элементы ANSYS с промежуточными узлами, более точные, чем аналогичные элементы без промежуточных узлов, использованные для расчетов ранее в [4].

2 Методика расчетов

На первом этапе в Mechanical APDL ANSYS проводился модальный анализ ненагруженных на акустическую среду преобразователей с выбранными пограничными значениями толщин пластин $h_m=1, 3$ (мм), $h_p=1, 3$ (мм). В результате определялись первые частоты электрически активных частот резонансов f_r и антирезонансов f_a для изгибных форм колебаний. Решение этой задачи позволило выбрать частотный интервал $[f_b, f_e]$ ($f_b \leq f_r \leq f_e$) для построения АЧХ для максимальных перемещений в центре преобразователя при подаче на его электродированные поверхности осциллирующей разности потенциалов. Эта разность потенциалов определялась через толщину пластин h_p и значение напряженности электрического поля $E_z = 10$ (В/мм), которое принималось одинаковым для всех расчетов.

Далее составлялись программы на параметрическом языке APDL ANSYS для построения АЧХ преобразователя без учета акустической нагрузки и с ее учетом. Построение АЧХ осуществляется путем решения задач об установившихся колебаниях с шагом по частоте Δf в интервале частот $[f_b, f_e]$. При этом средствами APDL ANSYS из решений набора этих задач определяется максимальное смещение $u_{max} = \max|u_z|$ для всего частотного интервала. Отметим, что точность построения АЧХ зависит от числа точек по частоте, что более существенно для ненагруженного на акустическую среду пьезопреобразователя, и менее – для нагруженного. При этом для построения АЧХ преобразователей, работающих в акустической среде, требуются достаточно большие компьютерные ресурсы.

В итоге разработанные программы на языке APDL ANSYS имели входными данными толщины пластин h_m и h_p , которые принимались за переменные дизайна, а выходными – максимальные смещения u_{max} , которые определяли целевую функцию для задачи оптимизации. Дополнительное ограничение задавалось через допуск на максимальные значения амплитуд напряжений по Мизесу. Задачи оптимизации решались в ANSYS DesignXplorer, для чего созданные параметрические модели APDL интегрировались в среду ANSYS Workbench.

Обсуждение результатов и заключение

В силу ограниченности объема материалов доклада здесь обсуждается только небольшая часть полученных вычислительных результатов. Триморфный преобразователь без учета акустической среды анализировался ранее в [4], где были выбраны компромиссные значения толщин $h_m = h_p = 2$ (мм). Результаты численных расчетов для данных параметров были подтверждены сравнением с экспериментальными результатами. Новые данные оптимизационных расчетов пьезопреобразователей, работающих в акустической среде, будут представлены в докладе и в материалах отдельной расширенной статьи.

Таким образом, модальный и гармонический анализ в ANSYS позволяет оптимизировать габаритные размеры конструкции с учетом эксплуатационных требований и повысить эффективность разработанного низкочастотного триморфного излучателя для применения в системах акустического каротажа скважин, исходя из компромиссных требований максимальных смещений при изгибных колебаниях при выполнении ограничений на максимальные напряжения.

Разработанная методология компьютерного моделирования может быть использована для оптимизации конструкций различных излучателей изгибного типа в аппаратах акустического каротажа. Дальнейшее развитие данной методологии может быть связано с проведением численных расчетов, направленных на увеличение как выходной мощности, так и полосы пропускания пьезопреобразователей.

Работа выполнена при поддержке РНФ в рамках проекта № 22-11-00302-П в Южном федеральном университете, <https://rscf.ru/project/22-11-00302/>.

Список литературы

1. *Adeyemi I., Meribout M., Khezzar L.* Recent developments, challenges, and prospects of ultrasound-assisted oil technologies // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2022. **82**. P. 105902.
2. *Mierez J., Altammar M.J., Alruwaili K.M., Alfaraj R.T.* Recent advances of ultrasound applications in the oil and gas industry // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2024. **103**. P. 106767.
3. *Zhou X., Wu S., Wang X., Wang Z., Zhu Q., Sun J., Huang P., Wang X., Huang W., Lu Q.* Review on piezoelectric actuators: materials, classifications, applications, and recent trends // *Front. Mech. Eng.* 2024. **19**, N. 1. P. 6.
4. *Рыбьянец А.Н., Наседкин А.В., Щербинин С.А., Петрова Е.И., Швецова Н.А., Швецов И.А., Луговая М.А.* Конечно-элементное моделирование низкочастотных биморфных преобразователей для диагностики и активации нефтяных скважин // *Акустический журнал*. 2017. **63**, № 6. С. 685.
5. *Wu D., Dai Y., Chen H., Zhou Y., Fu L., Wang X.* Mode analysis of trilaminar bender bar transducers using an approximation method // *Acoust. Phys.* 2017. **63**, N 5. P. 617.
6. *Zhou Y., Wang X., Dai Y.* Studies on a piezoelectric cylindrical transducer for borehole dipole acoustic measurements // *Appl. Sci.* 2021. **11**, N 3. 1036.
7. *Наседкин А.В.* Моделирование пьезоэлектрических преобразователей в ANSYS: учебное пособие. Ростов-на-Дону: изд-во ЮФУ, 2015.
8. *Наседкин А.В., Наседкина А.А.* Моделирование связанных задач: математические постановки и конечно-элементные технологии. Ростов-на-Дону: изд-во ЮФУ, 2019.

УДК: 517.972.7; 539.3; 691.175

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39681

**Определение упругих свойств образцов полимерных материалов,
изготовленных с использованием аддитивных технологий, по
характеристикам упругих волн**

**М.В. Голуб^{1,a}, К.К. Канищев^{1,b}, М.А. Арсенов^{1,c}, А.А. Еремин^{1,d}, А.Д. Ханазарян^{1,e},
О.В. Дорошенко^{1,f}, С.В. Шилько^{2,g}, А. Панаи^{3,h}, И.А. Румянцев^{3,k}, В.А. Емельянов^{3,l}**

¹ *Институт математики, механики и информатики, ФГБОУ «Кубанский государственный университет», ул. Ставропольская 149, г. Краснодар, 350040, Российская Федерация.*

² *ГНУ «Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого Национальной академии наук Беларуси», ул. Кирова, 32 А, г. Гомель, 246050, Республика Беларусь.*

³ *Сколковский институт науки и технологий, Большой бульвар, д. 30, стр. 1, г. Москва, 121205, Российская Федерация.*

E-mail: ^am_golub@inbox.ru, ^bkir9kanishcheff@yandex.ru, ^cmihail2212@mail.ru,

^deremin_a_87@mail.ru, ^eartur97.10@mail.ru, ^foldorosh@mail.ru, ^gShilko_mpri@mail.ru,

^ha.panayi@skoltech.ru, ^kI.Rumyantsev@skoltech.ru, ^lV.Emelianov@skoltech.ru

Аннотация: Аддитивные технологии активно внедряются в инженерную практику, позволяя быстро и с приемлемой точностью изготавливать изделия сложной геометрии. Однако прогнозирование механического поведения динамически нагруженных элементов конструкций, получаемых аддитивной переработкой полимерных расходных материалов, затрудняется из-за отсутствия достоверных значений их упругих характеристик. Традиционные методы экспериментальной механики, основанные на квазистатических испытаниях стандартных образцов, не позволяют определять динамические упругие модули. В данной работе развивается альтернативный, основанный на дисперсионном анализе волн Рэлея-Лэмба, подход к определению упругих модулей рассматриваемых полимерных материалов на образцах в виде прямоугольных пластин, изготовленных послойным наплавлением. С этой целью виброскорости точек поверхности образцов измерялись с использованием лазерной виброметрии в виде В-сканов и обрабатывались методом матричного пучка. Решение обратной задачи по определению модулей упругости осуществлялось путем минимизации невязки теоретических и экспериментальных дисперсионных соотношений для однородного изотропного волновода в пространстве его упругих характеристик. Выполненные исследования показали достаточно высокий уровень корреляции полученных значений модуля Юнга с результатами испытаний на статическое одноосное растяжение.

Ключевые слова: упругие бегущие волны, полимерные материалы, обратная коэффициентная задача, модули упругости, волны Лэмба.

Determination of elastic properties of polymer material samples manufactured using additive technologies based on elastic wave characteristics

**M.V. Golub^{1,a}, K.K. Kanishchev^{1,b}, M.A. Arsenov^{1,c}, A.A. Eremin^{1,d}, A.D. Khanazarian^{1,e},
O.V. Doroshenko^{1,f}, S.V. Shil'ko^{2,g}, A. Panayi^{3,h}, I.A. Rumyantsev^{3,k}, V.A. Emelyanov^{3,l}**

¹ *Institute for Mathematics, Mechanics and Informatics, Kuban State University, Krasnodar, 350040, Russia.*

² *Laboratory of Mechanics of Composites and Biopolymers, Metal-Polymer Research Institute of National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, 246050, Republic of Belarus.*

³ *Center for Digital Engineering, Skolkovo Institute of Science and Technology, 121205 Russia.*

E-mail: ^a*m_golub@inbox.ru*, ^b*kir9kanishcheff@yandex.ru*, ^c*mihail2212@mail.ru*,

^d*eremin_a_87@mail.ru*, ^e*artur97.10@mail.ru*, ^f*oldorosh@mail.ru*, ^g*Shilko_mpri@mail.ru*,

^h*a.panayi@skoltech.ru*, ^k*I.Rumyantsev@skoltech.ru*, ^l*V.Emelianov@skoltech.ru*

Abstract: Additive manufacturing is increasingly adopted in engineering practice, enabling the fabrication of complex geometries with high precision. However, predicting the mechanical behavior of dynamically loaded components made from polymer materials often presents challenges due to the lack of precise information regarding their elastic characteristics. Traditional methods of experimental mechanics based on quasi-static testing often yield significant data scatter and do not allow for the determination of dynamic elastic moduli. This study advances an approach for determining the mechanical properties of rectangular plate specimens fabricated from polymer materials via fused deposition modeling (FDM), based on the experimental dispersion characteristics of Rayleigh-Lamb waves. To acquire these data, surface vibration velocities were measured using laser Doppler vibrometry in the form of B-scans and processed using the matrix pencil method. The inverse problem of determining elastic moduli was solved by minimizing the discrepancy between theoretical and experimental dispersion relations for a homogeneous isotropic waveguide within the elastic parameter space. The obtained estimates demonstrated a high degree of correlation with the results of static uniaxial tensile testing for Young's modulus.

Keywords: elastic guided waves, polymer materials, inverse coefficient problem, elastic moduli, Lamb waves

PACS: 43.35.Cg, 43.35.Zc

1 Введение

Значения модулей упругости полимерных материалов (пластиков), измеренные на образцах, изготовленных методом послойного наплавления (FDM), часто характеризуются значительным разбросом в зависимости от методики испытаний. При этом дисперсионные характеристики волн в упругих слоистых волноводах зависят от частоты и упругих констант материала, что позволяет восстанавливать упругие характеристики материала по волновым сигналам, измеренным в ограниченном наборе точек поверхности. В настоящем исследовании рассматривается модифицированный способ неразрушающего определения упругих характеристик слоистых волноводов, предложенный в работах [1-3], и его применение для диагностики изделий аддитивного производства. Эксперименты выполнены на образцах в виде прямоугольных пластин из полимерных материалов PET-G, SBS, HIPS, ABS, PLA. Волновые пакеты возбуждались пьезоэлектрическим преобразователем посредством короткого прямоугольного импульса, а вертикальные скорости поверхности регистрировались лазерным виброметром вдоль нескольких линий сканирования. Полученные оценки модулей упругости верифицированы путем сравнения с результатами стандартизованных механических испытаний на одноосное статическое растяжение.

2 Схема проведения экспериментальных исследований образцов

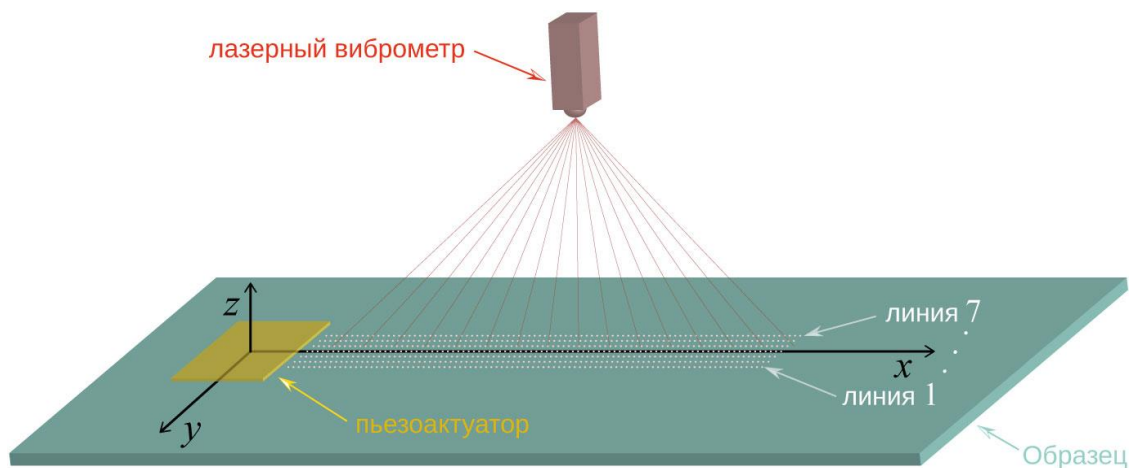


Рисунок 1. Общая схема проведения эксперимента

На первом этапе из вышеназванных пластиков методом FDM-печати на двухэкструдерном принтере Raise3D E2 были изготовлены образцы в виде прямоугольных пластин размером 150 x 40 x 3,2 мм. При печати устанавливались четыре направления заполнения: 0°, 90°, 45° и 135°. Источником бегущих упругих волн в каждом из образцов служил квадратный пьезокерамический элемент со стороной 10 мм и толщиной 0,4 мм, прикрепленный к поверхности пластины с помощью цианоакрилатного клея. Для возбуждения колебаний от генератора сигналов произвольной формы OWON XDG2030 на пьезоактуатор подавались

прямоугольные импульсы шириной 2 мкс, чтобы обеспечить достаточный частотный диапазон для последующего анализа. Схема проведения эксперимента приведена на рис. 1.

3 Обработка экспериментальных данных

Для каждого одномерного массива точек, соответствующих линиям сканирования (см. рис. 1), методом матричного пучка выполняется демодуляция массива измеренных сигналов и определяются экспериментальные медленности бегущих упругих волн, присутствующих в волновых пакетах, возбуждаемых пьезоэлектрическим актуатором и распространяющихся вдоль оси Ox .

Задача определения конечномерного вектора, составленного из двух базовых упругих характеристик изотропного материала (модуля Юнга и коэффициента Пуассона), для каждой линии сканирования решается с использованием двухступенчатого метода. На первом этапе по экспериментальным медленностям строится функционал, при составлении которого используется обращенный Фурье-образ матрицы Грина для свободного изотропного упругого волновода. На втором этапе в локальном частотном окне минимизируется расхождение между экспериментальными и расчётными медленностями. Такой подход позволяет повысить точность восстановления параметров: тестирование на синтетических данных показало двукратное снижение погрешности. При решении рассматриваемой задачи оптимизации нельзя однозначно выбрать начальное приближение, поэтому для численного решения задачи оптимизации использовался метод дифференциальной эволюции, относящийся к классу стохастических алгоритмов.

4 Численный анализ

Для верификации подхода были изготовлены три образца из одного материала (ABS-пластика), для каждого из которых применялась методика определения упругих модулей, описанная в разделе 3. Приведенные в таблице 1 значения показывают приемлемое расхождение, не превышающее 0,12 ГПа для модуля Юнга и 0,017 для коэффициента Пуассона.

Таблица 1

Упругие характеристики ABS-пластика, полученные представленным методом на трех образцах

Образец	Модуль Юнга, ГПа	Коэффициент Пуассона
А	2,187	0,337
Б	2,270	0,320
В	2,294	0,332

Для пяти выбранных полимерных материалов, физико-механические характеристики которых представлены в таблице 2, сопоставлены модули Юнга, полученные описанным

динамическим методом и посредством статических механических испытаний на одноосное растяжение с использованием высокоточного контактного экстензометра. Модули Юнга трех материалов отличаются менее, чем на 10%, а для SBS и PETG это различие составляет 16 % и 17,5 % соответственно.

Таблица 2

Физико-механические характеристики исследованных полимерных материалов

Материал	Модуль Юнга, ГПа		Плотность, кг/м ³	Коэффициент Пуассона
	Предлагаемый метод	Метод одноосного статического растяжения		
SBS	0,93	0,78	860	0,341
HIPS	2,21	2,13	1011	0,389
ABS	2,27	2,11	1013	0,320
PLA	3,77	3,44	1202	0,306
PETG	2,74	2,25	1228	0,389

Следует отметить, что при вычислении интегральной оценки исходя из оценок для каждой линии сканирования, обнаружен небольшой разброс значений. Так, лишь для одного из семи образцов оценки для семи линий отличались более, чем на 5 %, что говорит о точности «локальных» оценок упругих свойств. Интегральной оценкой, используемой для вычисления модулей упругости, служило значение многомерной медианы, определенное по всем расчетным данным с привлечением одной из метрик, приведенных в работе [5] и дающих близкие оценки (расхождение менее 1 %).

Заключение

Анализ полученных результатов показывает, что наиболее эффективная стратегия определения упругих модулей полимерных материалов – использование медианных значений по всей выборке для всех линий сканирования. Такой подход позволяет сгладить влияние единичных ошибочных измерений, вызванных локальными поверхностными или внутренними дефектами диагностируемых образцов в виде пластин или погрешностями, возникающими при проведении измерений. Перспективным видится также обобщение методики для контроля качества адгезионных соединений и структурно-функционального анализа композитов, что возможно благодаря «чувствительности» прохождения упругих волн к микроструктурным изменениям [6]. Это открывает новые диагностические возможности по выявлению внутренних дефектов (трещин и других несплошностей), а также

мониторинга деградационных изменений конструкционных материалов при воздействии различных факторов, включая воздействие радиации, атомарного кислорода и др. [7].

Исследование выполнено при финансовой поддержке Кубанского научного фонда и ООО «Орто-Маркет» в рамках проекта № НТИП-25.1/8.

Список литературы

1. *Lu L., Charron E., Glushkov E., Glushkova N., Bonello B., Julien F.H., Gogneau N., Tcherycheva M., Boyko O.* Probing elastic properties of nanowire-based structures. // *Applied Physics Letters*. 2018. **113**, № 16. P. 161903.
2. *Eremin A.A., Glushkov E.V., Glushkova N.V., Lammering R.* Evaluation of effective elastic properties of layered composite fiber-reinforced plastic plates by piezoelectrically induced guided waves and laser Doppler vibrometry. // *Composite Structures*. 2015. **125**, P. 449–458.
3. *Арсёнов М.А., Голуб М.В., Дорошенко О.В., Ерёмин А.А., Глушков Е.В., Глушкова Н.В.* Программный комплекс SIMPLE для определения упругих свойств материалов в ламинатах с помощью бегущих волн. // *Вестник Южно-Уральского государственного университета, серия «Математическое моделирование и программирование»*. 2025. **18**, № 2. С. 66–78.
4. *Бабешко В.А., Глушков Е.В., Зинченко Ж.Ф.* Динамика неоднородных линейно-упругих сред. М.: Наука. 1989. 344 с.
5. *Dodge Y., Rousson V.* Multivariate L 1 Mean. // *Advances in Data Science and Classification*. 1998. P. 539–546.
6. *Golub M.V., Doroshenko O.V., Wilde M.V., Eremin A.A.* Experimental validation of the applicability of effective spring boundary conditions for modelling damaged interfaces in laminate structures. // *Composite Structures*. 2021. **273**, P. 114141.
7. *Шилько С.В., Дробыш Т.В., Сазанков А.П., Романович С.И.* Оценка стабильности механических свойств конструкционных углекомполитов в условиях воздействия факторов космической среды. // *Полимерные материалы и технологии*. 2025. 11, № 4. С. 80–86.

УДК:539.3

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39682

**Численные и натурные эксперименты по определению дисперсионных
характеристик нормальных упругих волн в протяженных конструкциях
сложного сечения**

В.А. Емельянов^{1,a}, И.А. Румянцев¹, А.А. Еремин¹, А. Панаи¹

¹*Центр инженерных систем и наук, Сколковский институт науки и технологий.*

Москва 121205, Россия.

E-mail: ^aV.Emelianov@skoltech.ru

Аннотация: В работе исследуются дисперсионные характеристики нормальных мод в упругих волноводах сложного сечения на примере стальной двутавровой балки. Применён метод полуаналитических конечных элементов (SAFE) и проведены экспериментальные измерения с помощью сканирующей лазерной виброметрии. Показано, что возможность регистрации отдельных мод определяется расположением области сканирования относительно узловых точек собственных форм колебаний. Результаты демонстрируют хорошее согласование расчётных и экспериментальных дисперсионных кривых, что важно для оптимизации методик определения упругих свойств волноводов сложной геометрии.

Ключевые слова: бегущие упругие волны, волноводы сложного сечения, дисперсионные кривые, метод полуаналитических конечных элементов, лазерная виброметрия.

**Numerical simulations and experimental studies to determine the dispersion
characteristics of elastic guided waves in elongated structures
of complex cross-section**

V.A. Emelianov^{1,a}, I.A. Rumyantsev¹, A.A. Eremin¹, A. Panayi¹

¹*Center for Engineering Systems and Sciences, Skolkovo Institute of Science and Technology.*

Moscow 121205, Russia.

E-mail: ^aV.Emelianov@skoltech.ru

Abstract: The paper investigates dispersion characteristics of normal modes in elastic waveguides with complex cross-sections using the example of a steel I-beam. The semi-analytical finite element method (SAFE) and experimental measurements with scanning laser vibrometry are applied. It is shown that the detectability of individual modes depends on the location of the scanning line

relative to nodes and antinodes of the eigenmodes. The results demonstrate good agreement between calculated and experimental dispersion curves, which is important for optimizing methods for determining elastic properties of waveguides with complex geometry.

Keywords: elastic guided waves, waveguides with complex cross-section, dispersion curves, semi-analytical finite element method, laser vibrometry

PACS: 62.30.+d

Введение

Для расчета дисперсионных характеристик нормальных мод и соответствующих им форм колебаний в упругих волноводах сложного сечения фактически эталонным подходом стал полуаналитический метод конечных элементов (SAFE) [1,2]. В то же время задача определения экспериментальных дисперсионных кривых в соответствующих объектах, необходимых, например, как для верификации результатов SAFE-расчетов, так и служащих входными данными для решения задачи по восстановлению упругих свойств волновода в отличие от конструкций типа пластин по-прежнему является весьма нетривиальной [3]. В первую очередь это связано с особенностями локализации колебаний в сечении волновода собственных форм различных семейств нормальных волн характерных для рассматриваемых объектов.

В настоящей работе с использованием конечноэлементных расчетов и натуральных измерений с применением сканирующей лазерной виброметрии анализируется взаимное влияние области приложения динамической нагрузки и расположения точек измерения относительно сечения волновода на возможность надежного определения дисперсионных кривых нормальных мод. На примере конструкции типа стальной двутавровой балки иллюстрируется прямая зависимость между особенностями локализации колебаний отдельных нормальных мод в сечении волновода и их регистрацией в экспериментальных В-сканах.

1 Компьютерная модель

Рассматриваются установившиеся гармонические колебания $\mathbf{u}(\mathbf{x})\exp(i\omega t)$ (гармонический множитель $\exp(i\omega t)$ далее опущен), $\mathbf{x} = (x, y, z)$, $\mathbf{u} = (u_x, u_y, u_z)$, упругого изотропного волновода произвольного сечения $\Omega(x, z)$, занимающего область $W = \{\mathbf{x} : (x, z) \in \Omega, -\infty < y < \infty\}$ (рис. 1, а). Компоненты вектора смещений $\mathbf{u}(\mathbf{x})$ в области W удовлетворяют системе однородных уравнений Лямэ; боковая граница $\partial W = \partial\Omega \times y$ предполагается свободной от напряжений. В этом случае вектор-функция $\mathbf{u}(\mathbf{x})$ представима в виде бегущей волны, распространяющейся вдоль оси y : $\mathbf{u}(\mathbf{x}) = \mathbf{U}(x, z)\exp(-iky)$,

$U(x, z) = (U_x, U_y, U_z)$, где k – волновое число. Для нахождения собственных решений соответствующей однородной краевой задачи используется метод SAFE, реализованный, в частности, в МКЭ-пакете COMSOL Multiphysics, применяемом в настоящей работе. Результатом применения SAFE для каждой фиксированной частоты колебаний $\omega = 2\pi f$, где f – размерная частота, будет набор собственных чисел $k_n(\omega)$, являющихся волновыми числами распространяющихся (в случае вещественных k_n) и затухающих (для комплексных k_n) нормальных мод, и соответствующих им собственных форм $U_n(x, z)$, описывающих распределение колебаний относительно сечения волновода.

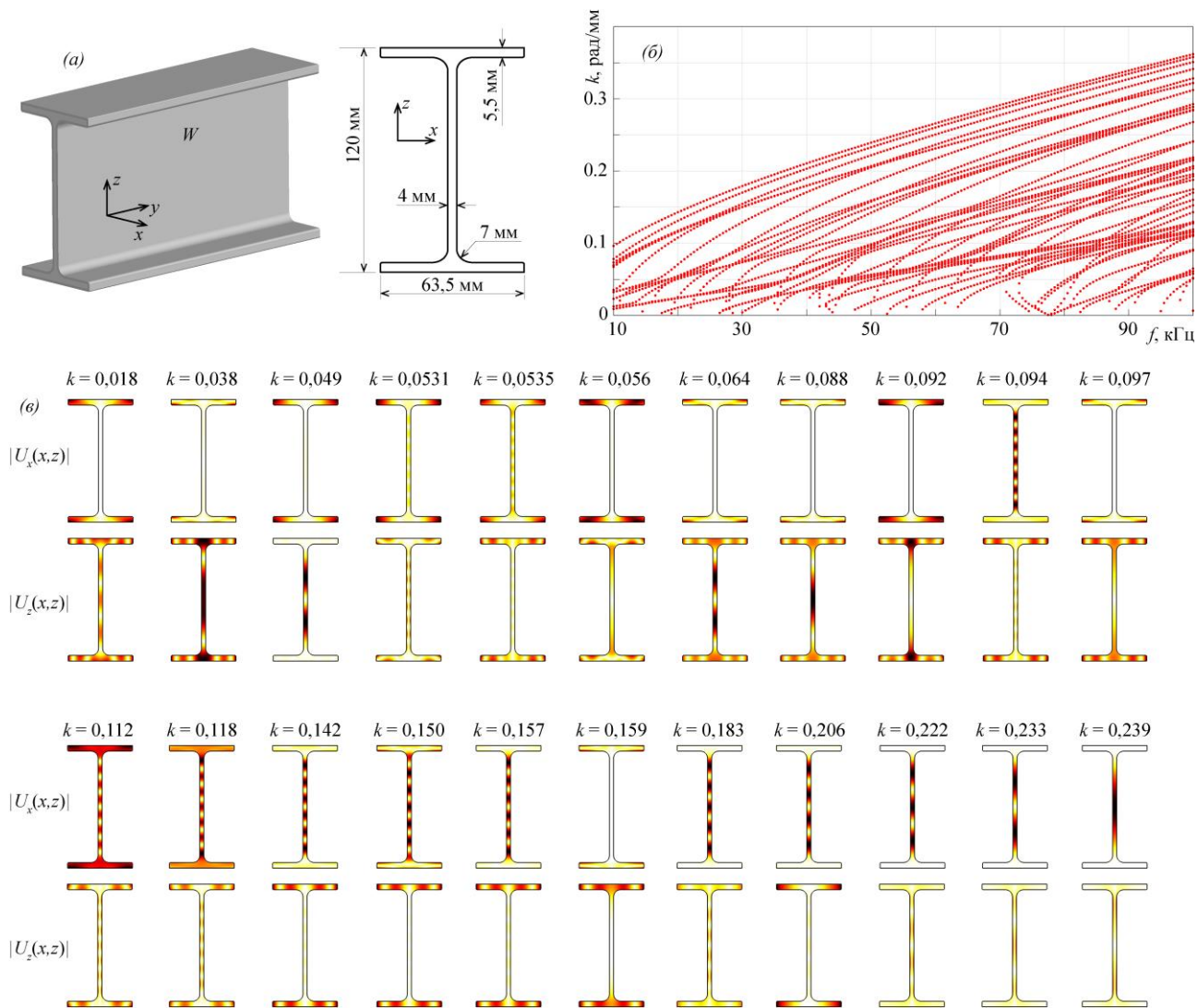


Рис. 1. Геометрия задачи (а), пример расчета дисперсионных кривых волновых чисел (б) и собственные формы локализации колебаний в сечении балки для частоты $f = 50$ кГц.

В качестве примера на рис. 1, б приводятся результаты SAFE-расчетов дисперсионных кривых волновых чисел $k_n(f)$, соответствующих незатухающим нормальным модам, для волновода типа стальной двутавровой балки 12Б1, геометрические характеристики сечения которого показаны на рис. 1, а (упругие характеристики материала:

модуль Юнга $E = 205$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$, плотность $\rho = 7850$ кг/м³). В отличие от волноводов более простой формы, например, упругого слоя сопоставимой толщины, в рассматриваемом объекте даже на низких частотах колебаний распространяется значительное количество нормальных мод. Характерное поведение амплитуд горизонтальной $|U_{n,x}|$ и вертикальной $|U_{n,z}|$ компонент смещений для отдельных нормальных мод на частоте колебаний $f = 50$ кГц показано на рис. 1, в. Темным цветом на этих графиках выделены области, в которых амплитуды колебаний достигают своих максимальных значений. Анализ соответствующих форм колебаний позволяет условно разделить нормальные моды на два типа – к первому из них можно отнести те моды, для которых локализация колебаний наблюдается в области шейки; для мод второго типа, напротив, интенсивные смещения характерны в области полки.

2 Описание экспериментальной установки

Для экспериментального изучения особенностей распространения бегущих упругих волн в объектах сложного сечения использовался стенд на базе сканирующего лазерного виброметра Polytec PSV-500-HV (рис. 2, а).

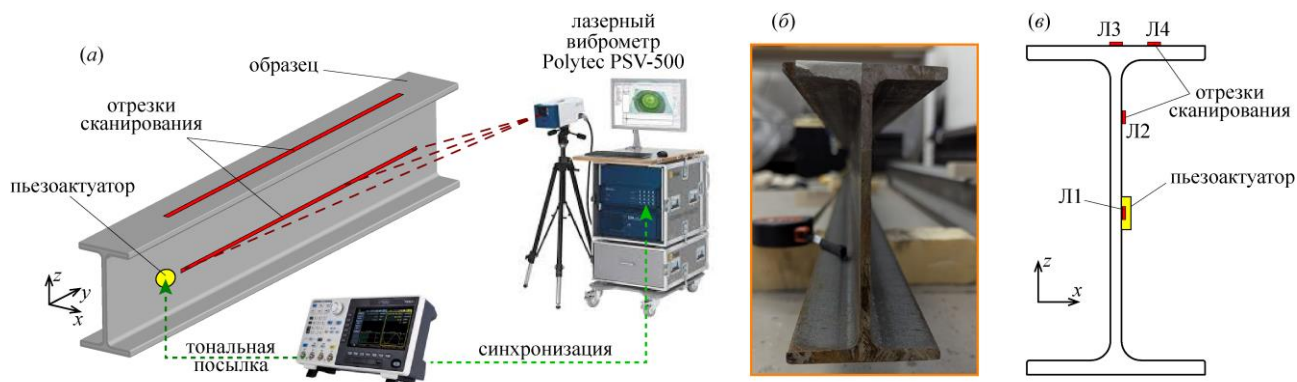


Рис. 2. Общая схема экспериментальной установки (а), фотография сечения образца (б) и расположение пьезоактуатора и отрезков сканирования относительно сечения балки (в).

В качестве образца рассматривался отрезок двутавровой балки типа 12Б1, изготовленной из стального сплава Ст3, длиной 2 м (рис. 2, б). Для возбуждения упругих колебаний использовался пьезокерамический диск круглой формы диаметром 12 мм и толщиной 2 мм, установленный посередине шейки балки с помощью цианакрилатного клея. Электрическая тональная посылка с амплитудой 20 В в виде прямоугольного импульса длительностью 10 мкс, подаваемая на пьезоэлемент, формировалась генератором сигналов произвольной формы OWON XDG 2030. Регистрация нормальной компоненты скорости смещений осуществлялась лазерным виброметром на протяженных наборах точек (длина каждого отрезка сканирования не менее 1 м, шаг сканирования – не более 3 мм), расположенных на

различных участках поверхности балки и ориентированных вдоль ее оси, сонаправленной с осью Oy введенной выше системы координат (на рис. 2, ϵ обозначены как Л1-Л4).

Для извлечения экспериментальных дисперсионных кривых из полученных В-сканов к ним применялось двойное преобразование Фурье по временной и пространственной координатам [4]. Результатом такого частотно-волнового анализа является функция $H(k, f)$ переменных частоты f и волнового числа k , на поверхности модуля $|H(k, f)|$ которой дисперсионные кривые проявляются в виде локальных максимумов, выстраивающихся вдоль соответствующих траекторий.

3 Полученные результаты и их обсуждение

Результаты сопоставления теоретических и экспериментальных дисперсионных кривых для отрезков сканирования Л1 и Л2, расположенных на шейке образца, приводятся на рис. 3. Здесь точками обозначены теоретические значения $k_n(f)$, а темные области соответствуют локальным максимумам поверхности $|H(k, f)|$, полученной из экспериментов. Наблюдается хорошая качественная согласованность между расчетными и экспериментальными частотными зависимостями волновых чисел $k_n(f)$.

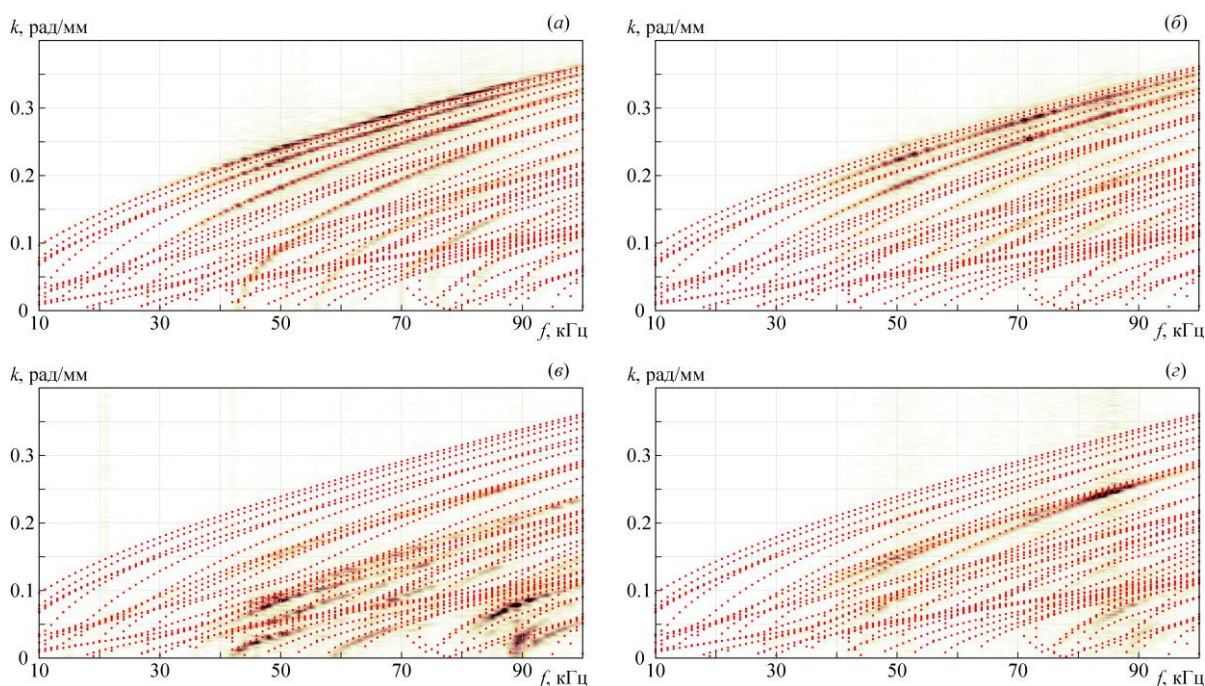


Рис. 3. Сопоставление расчетных и экспериментальных дисперсионных кривых для отрезков Л1 (а), Л2 (б), Л3(в) и Л4(г). Анализ форм локализации колебаний $U_n(x, z)$ (рис. 1, ϵ) позволяет объяснить отсутствие вклада отдельных мод в $|H(k, f)|$. Так, для мод с $k_n(f) < 0,09$ рад/мм компонента $|U_{n,x}|$ близка к нулю. В то же время для трех мод с наибольшими значениями волнового числа узловые точки $|U_{n,x}|$ в шейке расположены таким образом, что для линии сканирования посередине шейки средняя из этих мод не регистрируется. В то же время для отрезка

сканирования близкого к области стыковки шейки и полки, визуализируется только мода с $k_n(f = 50 \text{ кГц}) = 0,222 \text{ рад/мм}$.

Аналогичные выводы можно сделать и при анализе результатов для отрезков сканирования Л3 и Л4, расположенных на полке балки. Так интенсивная локализация компоненты колебаний $|U_{n,z}|$ посередине полки наблюдается лишь для нескольких мод (рис. 1, в). В то же время положение отрезка Л4 относительно узловых точек $|U_{n,z}|$ таково, что в окрестности $f = 50 \text{ кГц}$ существенный вклад в $|H(k, f)|$ дает малое количество мод (например, $k_n = 0,150 \text{ рад/мм}$, которая при этом не визуализируется для отрезка Л3).

Заключение

Используя метод полуаналитических конечных элементов и экспериментальные измерения на основе сканирующей лазерной виброметрии, на примере двутавровой балки исследованы влияние сложного поперечного сечения волновода на его дисперсионные характеристики. Показано, что возможность регистрации отдельных нормальных мод определяется расположением отрезка сканирования (В-скана) относительно сечения балки и его близостью к узлам пучности соответствующих компонент смещений собственных форм. Полученные результаты могут использоваться для оптимизации экспериментальных методик измерения дисперсионных кривых нормальных мод, необходимых, например, для определения упругих модулей рассматриваемого волновода, а также для оценки геометрических отклонений изготовленного волновода от требований стандарта.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-49-01074, <https://rscf.ru/project/25-49-01074/>

Список литературы

1. *Cong M., Wu X., Liu R.* Dispersion analysis of guided waves in the finned tube using the semi-analytical finite element method. // J. Sound Vib. 2017. **401**. P. 114.
2. *Loveday P.W., Long C.-S., Ramatlo D.A.* Mode repulsion of ultrasonic guided waves in rails. // Ultrasonics. 2018. **84**. P. 341.
3. *Setshedi I.I., Loveday P.W., Long C.-S., Wilke D.N.* Estimation of rail properties using semi-analytical finite element models and guided wave ultrasound measurements. // Ultrasonics. 2019. **96**. P. 240.
4. *Alleyne D., Cawley P.* A two-dimensional Fourier transform method for the measurement of propagating multimode signals. // J. Acoust. Soc. Am. 1991. **89**, No. 3. P. 1159.

УДК: 539.3

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39683

**Компьютерное моделирование динамического поведения системы
«пьезоактуатор-слоистый анизотропный волновод»**

М.В. Варелджан¹, А.А. Еремин^{1,a}, Е.В. Глушков¹, Н.В. Глушкова¹

¹ *Институт математики, механики и информатики, Кубанский государственный
университет, 350040 Краснодар, Российская Федерация
E-mail: ^aeremin_a_87@mail.ru*

Аннотация: Рассматривается задача компьютерного моделирования возбуждения бегущих упругих волн в трехмерном слоистом анизотропном волноводе поверхностным пьезопреобразователем. Для ее решения развивается вычислительная схема, сочетающая конечноэлементные расчеты для ограниченного участка волновода, содержащего поверхностную нагрузку и полуаналитический интегральный подход. С использованием предложенной методики строятся и анализируются диаграммы направленности амплитуд колебаний, возбуждаемых пленочным пьезоэлементом в многослойном композитном материале с различными схемами укладки элементарных слоев-препрегов.

Ключевые слова: двухэтапная вычислительная схема, метод конечных элементов, полуаналитический интегральный подход, слоистый анизотропный материал, поверхностный пьезопреобразователь, бегущие упругие волны.

**Computer simulation of the dynamic behavior of the "piezoactuator-layered
anisotropic waveguide" system**

M.V. Vareldzhan¹, A.A. Eremin^{1,a}, E.V. Glushkov¹, N.V. Glushkova¹

¹ *Institute for Mathematics, Mechanics and Informatics, Kuban State University, Krasnodar,
Russian Federation, 350040
E-mail: ^aeremin_a_87@mail.ru*

Abstract: This paper examines the problem of computer modeling the excitation of elastic guided waves in a three-dimensional layered anisotropic waveguide by a surface-mounted piezoelectric transducer. To solve this problem, a computational framework is developed that combines finite element calculations for a finite-sized subdomain of the considered waveguide containing a surface load and a semi-analytical integral approach. Using the proposed method, directivity patterns of the vibration amplitudes excited by a film piezotransducer in a multilayered composite material with different lay-ups of unidirectional prepregs are evaluated and analyzed.

Keywords: two-stage computational scheme, finite element method, semi-analytical integral approach, layered anisotropic material, surface piezoelectric transducer, elastic guided waves.

PACS: 62.30.+d, 77.84.Cg, 43.20.+g

Введение

Задача компьютерного моделирования динамического взаимодействия ультразвукового пьезоактуатора с многослойной анизотропной подложкой возникает, например, при проектировании и оптимизации систем ультразвуковой диагностики конструкций из слоистых композитных материалов, использующих в качестве физической основы волны Рэлея-Лэмба [1]. Распространенным в инженерной практике подходом к ее решению является использование метода конечных элементов (МКЭ) и его модификаций. Однако его применение для расчета волновой динамики протяженных областей сопряжено с существенными вычислительными затратами [2].

В качестве более эффективной с вычислительной точки зрения альтернативы в настоящей работе рассматривается двухэтапная вычислительная схема [3], сочетающая МКЭ-расчеты для ограниченного участка волновода, содержащего пьезоактуатор, генерирующий упругие колебания, и полуаналитический интегральный подход. Применение такой схемы для моделирования волновой динамики системы «пьезоактуатор-слоистый анизотропный волновод» иллюстрируется результатами расчетов диаграмм направленности амплитуд бегущих упругих волн, возбуждаемых круглым пленочным пьезоэлементом в многослойном композитном материале с однонаправленной и перекрестной схемами укладки слоев-препрегов.

1 Описание компьютерной модели

Рассматривается анизотропный упругий волновод (рис. 1, а), занимающий в декартовой системе координат (x, y, z) объем $W_1: |x, y| < \infty, -H \leq z \leq 0$, состоящий из M жестко сцепленных между собой одинаковых слоев-препрегов толщины $h_m = H/M$, $m = 1, \dots, M$ с различной ориентацией армирующих волокон. Внешние границы волновода свободны от напряжений за исключением расположенной в плоскости $z = 0$ области Ω , по которой служащий источником колебаний пьезопреобразователь толщины h_p , занимающий объем W_2 , контактирует с W_1 . Нижняя поверхность пьезонакладки заземлена, а к верхней приложен управляющий электрический сигнал $v(t)$ с частотным спектром $V(\omega)$. Соответствующая разность потенциалов вызывает механические деформации пьезонакладки, что приводит к возникновению контактных напряжений в области Ω , $\tau = \mathbf{q}(x, y)e^{-i\omega t}$,

возбуждающих колебания $\mathbf{u}e^{-i\omega t}$ в упругой подложке; $\mathbf{u} = (u_1, u_2, u_3) = (u_x, u_y, u_z)$ - комплексная амплитуда вектора перемещений, $\boldsymbol{\tau} = (\tau_{xz}, \tau_{yz}, \sigma_z)$ - вектор напряжений на горизонтальной площадке, $\omega = 2\pi f$ - круговая частота, f - частота (далее гармонический множитель $e^{-i\omega t}$ опущен).

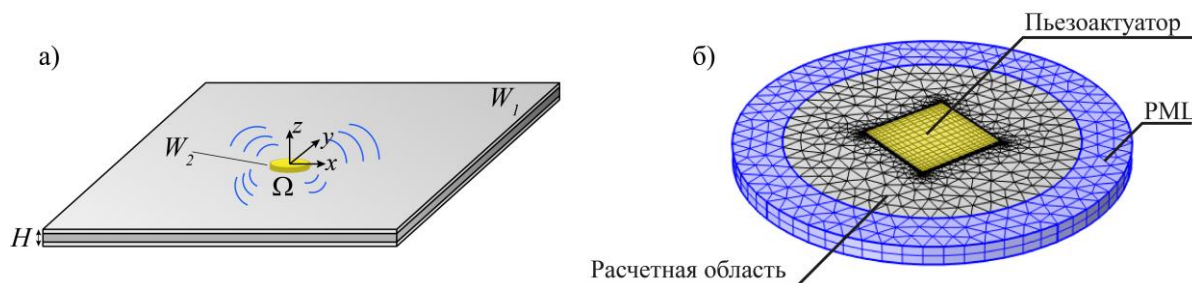


Рис. 1. Геометрия задачи.

С использованием полуаналитического интегрального подхода и техники интегрального преобразования Фурье волновое поле в многослойной анизотропной подложке можно представить в виде [4,5]:

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{\Gamma_1} \int_{\Gamma_2} K(\alpha_1, \alpha_2, z) \mathbf{Q}(\alpha_1, \alpha_2) e^{-i(\alpha_1 x + \alpha_2 y)} d\alpha_1 d\alpha_2 \equiv \mathbf{F}^{-1}[\mathbf{K}\mathbf{Q}]. \quad (1)$$

Здесь $K = \mathbf{F}_{xy}[k]$ и $\mathbf{Q} = \mathbf{F}_{xy}[\mathbf{q}]$ - Фурье-символы (результаты применения преобразования Фурье \mathbf{F} по горизонтальным координатам x и y) матрицы Грина $k(\mathbf{x})$ рассматриваемого волновода и вектор-функции поверхностной нагрузки $\mathbf{q}(x, y)$ контактных напряжений, возникающих при взаимодействии пьезопреобразователя с упругим волноводом; через α_1 и α_2 обозначены параметры преобразования Фурье, Γ_1 и Γ_2 - контуры интегрирования, проходящие вдоль вещественной оси, отклоняясь в комплексную плоскость α_1 и α_2 соответственно при обходе вещественных полюсов элементов матрицы K в соответствии с принципом предельного поглощения [6].

В дальней зоне квазицилиндрические бегущие волны с волновыми числами s_{nm} , распространяющиеся от источника колебаний $\mathbf{q}(x, y)$, описываются асимптотикой интегралов (1) [5]:

$$\mathbf{u}_n = \sum_{m=1}^{M_n} \mathbf{a}_{nm}(\varphi, z) e^{is_{nm}r} / \sqrt{\zeta r} (1 + O(\zeta r)^{-1}), \quad \zeta r \rightarrow \infty. \quad (2)$$

В ближней к источнику зоне волновое поле \mathbf{u} определяется с помощью численного интегрирования контурных интегралов в представлении (1), используя методы и алгоритмы, описанные в [7]. В обоих случаях, наряду с матрицей K , алгоритм вычисления которой для анизотропных слоистых пластин подробно описан в [5], необходимы неизвестные

контактные напряжения \mathbf{q} , определяющие вид \mathbf{Q} . Для определения поверхностной нагрузки \mathbf{q} используется обобщенная на случай анизотропного волновода двухэтапная вычислительная схема [3]. На первом этапе решается задача о динамическом взаимодействии пьезонакладки и упругого волновода с использованием МКЭ в ограниченной расчетной области, включающей актуатор, с присоединенными к боковым торцам идеально согласованными слоями (PML) для моделирования оттока энергии на бесконечность (рис. 1, б). Из полученного МКЭ-решения на равномерной сетке извлекаются значения вектора смещений $\mathbf{u}^F(\mathbf{x})$ в области $\Omega^F = (\mathbf{x}: (x, y) \in \Omega, z = -H)$, расположенной на противоположной стороне подложки. Такой выбор области Ω^F обеспечивает большую численную устойчивость при реализации схемы [3]. Неизвестная вектор-функция $\mathbf{q}(x, y)$ определяется далее путем численного решения интегрального уравнения:

$$\frac{1}{4\pi^2} \int_{\Gamma_1} \int_{\Gamma_2} K(\alpha_1, \alpha_2, -H) \mathbf{Q}(\alpha_1, \alpha_2) e^{-i(\alpha_1 x + \alpha_2 y)} d\alpha_1 d\alpha_2 = \mathbf{u}_F(x, y, -H), \quad (3)$$

где вектор-функция нагрузки $\mathbf{q}(x, y)$ аппроксимируется набором точечных источников с неизвестными амплитудными коэффициентами \mathbf{c}_k :

$$\mathbf{q}(x, y) \approx \mathbf{q}_a(x, y) = \sum_{k=1}^{N_k} \mathbf{c}_k \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_k). \quad (4)$$

Поиск неизвестных коэффициентов осуществляется методом коллокаций. В этом случае равенство (3) рассматривается на наборе точек $\mathbf{x}_l = (x_l, y_l, -H)$, $l = 1, 2, \dots, N_k$, что приводит к системе линейных алгебраических уравнений $\mathbf{A}\mathbf{c} = \mathbf{f}$. Элементы матрицы $\mathbf{A} = \{a_{lk}\}$, $k, l = 1, 2, \dots, N$, представляющие собой блоки размера 3×3 , определяются по следующей формуле

$$a_{lk} = \frac{1}{4\pi^2} \int_{\Gamma_1} \int_{\Gamma_2} K(\alpha_1, \alpha_2, -H) \Phi_k(\alpha_1, \alpha_2) e^{-i(\alpha_1 x_l + \alpha_2 y_l)} d\alpha_1 d\alpha_2,$$

где $\Phi_k(\alpha_1, \alpha_2)$ - Фурье-символ дельта-функции из разложения (4), а компоненты вектора правой части системы $\mathbf{f} = \{\mathbf{f}_l\}$, $l = 1, 2, \dots, N$, берутся из МКЭ-решения: $\mathbf{f}_l = \mathbf{u}^F(\mathbf{x}_l)$.

2 Численные примеры

Для численной проверки корректности компьютерной реализации двухэтапной схемы в случае многослойной анизотропной подложки рассматривался четырехслойный волновод, соответствующий композитному материалу с перекрестной схемой укладки однонаправленных трансверсально-изотропных препрегов $[0^\circ, 90^\circ]_s$. Толщина каждого из слоев: $h_i = 0.56$ мм (общая толщина пакета $H = 2.24$ мм), плотность препрега

$\rho = 1522 \text{ кг/м}^3$; упругие модули: $C_{11} = 119.1$, $C_{22} = C_{33} = 10.6$, $C_{12} = C_{13} = 3.57$, $C_{44} = 2.8$,
 $C_{55} = C_{66} = 4.45$ (ГПа). В качестве источника колебаний рассматривался пьезокерамический преобразователь из материала PZT-5Н толщины $h_p = 0.2$ мм квадратной формы с длиной стороны 5 мм. В приближенном представлении функции нагрузки (4) использовалось $N_k = 225$ точечных сил.

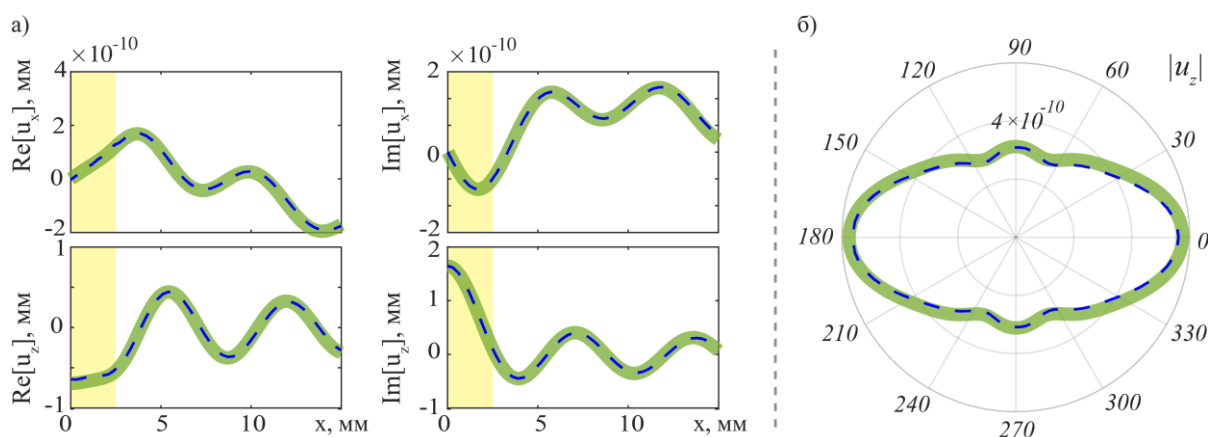


Рис. 2. Тестовое сопоставление результатов предлагаемой двухэтапной схемы (пунктир) с МКЭ Comsol (зеленая линия) для композита с перекрестной схемой армирования на нижней стороне волновода на частоте $f = 200$ кГц (а). Диаграмма направленности $|u_z(15, \varphi, -H)|$ (б).

Результаты сопоставления расчетов поля смещений на основе двухэтапной схемы и с использованием COMSOL Multiphysics на фиксированной частоте колебаний $f = 200$ кГц вдоль отрезка оси Ox приводятся на рисунке 2 (а). При решении системы линейных алгебраических уравнений, полученных после дискретизации соотношения (3) применялась регуляризация по Тихонову. Желтым цветом обозначена область, из которой извлекались смещения $\mathbf{u}^F(\mathbf{x})$ для определения неизвестных коэффициентов \mathbf{c}_k в соотношении (4). Сопоставление диаграмм направленности $|u_z(r, \varphi, -H)|$ для набора точек, расположенных на окружности радиуса $r = 15$ мм, приводится на рисунке 2 (б). В обоих случаях видна хорошая согласованность получаемых результатов.

Для иллюстрации возможностей использования двухэтапной схемы для расчета амплитудно-частотных характеристик волновых полей в дальней от источника колебаний зоне рассматривались образцы толщины $H = 2.24$ мм, упругие колебания в которых возбуждались круговым пьезоэлементом диаметра 10 мм и толщины $h_p = 0.2$ мм.

На рисунке 3, (а)-(в) приводятся диаграммы направленности амплитуд радиальной $|u_r(\mathbf{x})|$ и вертикальной $|u_z(\mathbf{x})|$ компонент смещений для соответственно трех частот колебаний $f = 100, 200$ и 300 кГц для однонаправленного (сплошные линии) и перекрестноармированного (пунктирные линии) образцов. Точки \mathbf{x} в которых с

использованием соотношений (2) рассчитывались указанные величины, располагались на поверхности $z = 0$ вдоль окружности радиуса $r = 30$ мм с центром в начале координат. Представленные результаты наглядно иллюстрируют влияние анизотропии на направленность амплитуд компонент вектора смещений \mathbf{u} : в отличие от изотропных материалов, для которых аналогичные графики будут иметь форму окружности, для рассматриваемых композитов поведение $u_r(\mathbf{x})$ и $u_z(\mathbf{x})$ в зависимости от угла φ носит сложный характер, который определяется как главными направлениями симметрии каждого из материалов, так и каустиками, характерными для анизотропных упругих волноводов.

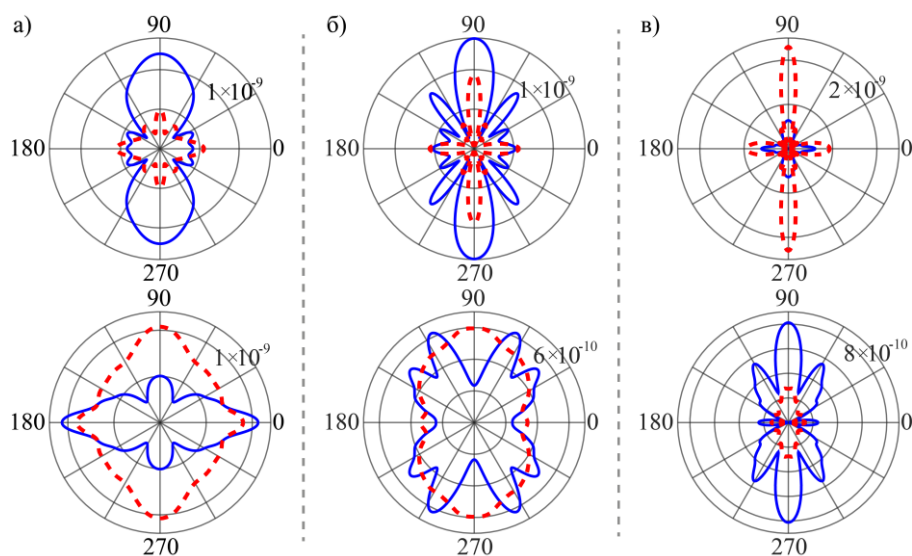


Рис. 3. Диаграммы направленности $|u_r(\mathbf{x})|$ (верхняя строка диаграмм) и $|u_z(\mathbf{x})|$ (нижняя строка диаграмм) в случае круглого актуатора.

Заключение

Используя двухэтапную вычислительную схему, сочетающую полуаналитический интегральный подход и метод конечных элементов, разработана компьютерная модель, описывающая процесс возбуждения фундаментальных и высших мод бегущих упругих волн поверхностными пленочными пьезоэлементами произвольной в плане формы в анизотропной слоистой упругой подложке. На ее основе возможно проведение анализа влияния параметров системы «пьезоактуатор – слоистый анизотропный материал» на амплитудно-частотные и энергетические характеристики возбуждаемых волновых полей. Описываемая в данной работе компьютерная модель может использоваться для оптимизации функционирования аппаратно-программных комплексов ультразвуковой диагностики состояния тонкостенных инженерных конструкций.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России № FZEN-2024-0003.

Список литературы

1. *Giurgiutiu V., Structural Health Monitoring with Piezoelectric Wafer Active Sensors. Second edition.* Elsevier Academic Press, 2024. 1012 p.
2. *Willberg C., Duczek S., Vivar-Perez J. M., Ahmad Z. A. B. Simulation methods for guided wave-based Structural Health Monitoring: a review // Applied Mechanics Reviews. 2015. Vol 67, No. 010803. P. 1-20. <https://doi.org/10.1115/1.4029539>*
3. *Варелджан М.В. Двухэтапная вычислительная схема для моделирования возбуждения упругих колебаний в изотропном слое поверхностным пьезопреобразователем // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2024. Т. 21, № 1. С. 57-69. <https://doi.org/10.31429/vestnik-21-1-57-69>*
4. *Ворович И.И., Бабешко В.А. Динамические смешанные задачи теории упругости для неклассических областей. М.: Наука, 1979. 319 с.*
5. *Glushkov E., Glushkova N., Eremin A. Forced wave propagation and energy distribution in anisotropic laminate composites // Journal of the Acoustical Society of America. 2011. Vol. 129, No. 5. P. 2923-34. <https://doi.org/10.1121/1.3559699>*
6. *Свешников А.Г. Принцип предельного поглощения для волновода // Докл. АН СССР. 1951. Т. 80, № 3. С. 345-47.*
7. *Глушков Е.В., Глушкова Н.В., Варелджан М.В. Сравнительный анализ эффективности программной реализации полуаналитических методов расчета волновых полей в многослойных анизотропных композитах // Вестник ЮУрГУ. Серия: Математическое моделирование и программирование. 2022. Т. 15, № 5. С. 56-69. <https://doi.org/10.14529/mmp220205>*

УДК: 550.832.46

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39684

Исследование упругих свойств горных пород методом ультразвукового зондирования

М.А. Краснова^а, Д.Е. Белобородов^б

*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (ИФЗ РАН)
123242, г. Москва, Б. Грузинская ул., д. 10, стр. 1. Тел.: 903 6747218; Факс: 499 7662654.*

E-mail: ^аmkrasnova@ifz.ru, ^бbeloborodov@ifz.ru

Аннотация: Для детального исследования механических свойств и структур горных пород в Институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН разработана методика ультразвукового исследования горных пород (ГП). Образцы ГП подвергаются детальному ультразвуковому сканированию, в результате которого получают многоуровневые индикатрисы скоростей упругих волн, позволяющие определить неоднородности распределения скоростей упругих волн, динамические упругие модули, оценить эффективную анизотропию механических свойств образцов, а также разделить анизотропию и неоднородности в масштабе образца. Пластические деформации в ГП могут существенно изменять внутреннюю структуру ГП, в свою очередь, изменение внутренней структуры может привести к изменению упругих, прочностных, реологических свойств, которое можно контролировать с помощью ультразвукового зондирования.

Точность определения времен пробега и скоростей упругих волн в исследуемой среде определяется характеристиками используемого оборудования и правильностью интерпретации волновых форм. Специальные методические ультразвуковые исследования (УЗИ) на эталонных образцах металлов и сплавов позволили повысить точность определения скоростей в образце до первых десятков м/с. Что касается интерпретации волновых форм, то в связи со сложностью строения исследуемого объекта она может быть существенно затруднена и не всегда поддается контролю.

Ключевые слова: ультразвуковое сканирование горных пород; анизотропия упругих свойств; пьезоэлектрические датчики

Study of elastic properties of rocks by ultrasonic probing

M.A. Krasnova^a, D.E. Beloborodov^b

*Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences. B. Gruzinskaya str.,
10, build. 1, 123242, Moscow, Russia*

E-mail: ^amkrasnova@ifz.ru, ^bbeloborodov@ifz.ru

Abstract: To study the mechanical properties and structure of rocks in detail, the Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, has developed a method for ultrasonic rock examination. Rock samples are subjected to detailed ultrasonic scanning, resulting in multi-level elastic wave velocity indicatrices. This allows for the determination of elastic wave velocity distribution inhomogeneities and dynamic elastic moduli, the assessment of the effective anisotropy of the samples' mechanical properties, and the separation of anisotropy and inhomogeneities within the sample. Plastic deformations in rocks can significantly alter the internal structure of rocks. This change in internal structure, in turn, can lead to changes in elastic, strength, and rheological properties, which can be monitored using ultrasonic probing.

The accuracy of measuring the travel time and velocities of elastic waves in the studied medium is determined by the characteristics of the equipment used and the correct interpretation of the waveforms. Specialized methodological ultrasound studies (US) on reference metal and alloy samples have significantly improved the accuracy of sample velocity determination, down to a few tens of meters per second. Regarding waveform interpretation, the complexity of the structure of the object being studied can pose significant challenges and is not always controllable.

Keywords: ultrasonic scanning of rocks; anisotropy of elastic properties; ultrasonic transducers

PACS: 43.35.Yb, 43.35.Zc, 43.35.Cg

Введение

Знание состава, внутреннего строения, упругих и прочностных свойств ГП требуется в различных областях человеческой деятельности в строительстве, мониторинге состояния грунтов и нижележащих пород, поиске полезных ископаемых, мониторинге состояния и разработки месторождений, при решении задач геомеханики. Измерения скоростей упругих волн на образцах ГП являются важным источником экспериментальных данных, позволяющих установить связь состава, строения и физических свойств ГП в аналитическом виде при решении этих задач с помощью численного моделирования и теоретических методов. [Дубиня и др., 2022]

Для детального исследования упругих свойств и структуры ГП в институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН разработана методика ультразвукового исследования ГП. По сравнению со стандартными испытаниями по определению упруго-прочностных свойств,

предложенная процедура исследования подготовленных образцов является значительно более детальной. Измерение скоростей распространения продольных и поперечных упругих волн в образце проводится для набора радиальных направлений и вдоль оси образца, строится многоуровневая индикатриса скоростей [Петров, Насимов, 2016]. Проведение таких исследований дает возможность определить наличие в образце разно ориентированных включений, вызывающих неоднородности распределения динамических упругих модулей, а также ориентированных включений, приводящих к анизотропии механических свойств образца, дает возможность разделения анизотропии и неоднородности в масштабе образца [Баяк и др., 2016].

1. Исследование упругих свойств горных пород при нормальных условиях

Для исследования упругих свойств образцов горных пород применялся импульсный динамический метод. Метод основан на измерении времен пробега и скоростей упругих волн, возбуждаемых в исследуемом образце серией повторяющихся импульсов упругих колебаний в ультразвуковом диапазоне частот. Определение скоростей упругих волн производится импульсным динамическим методом на образцах полноразмерных кернов и стандартных цилиндрических образцах диаметром 30 мм, высотой 60 мм. Проводится осевое зондирование образца, когда излучатель и приемник размещаются на противоположных торцах, и радиальные измерения, когда волны возбуждаются в точках, равномерно распределенных на боковой поверхности образца вдоль одного или нескольких профилей, и регистрируются в диаметрально противоположных точках. Такая схема наблюдений позволяет построить пространственное распределение скоростей в виде многоуровневых индикатрис скоростей (рис 1). Определяются скорости продольной и поперечных волн. Динамические модули

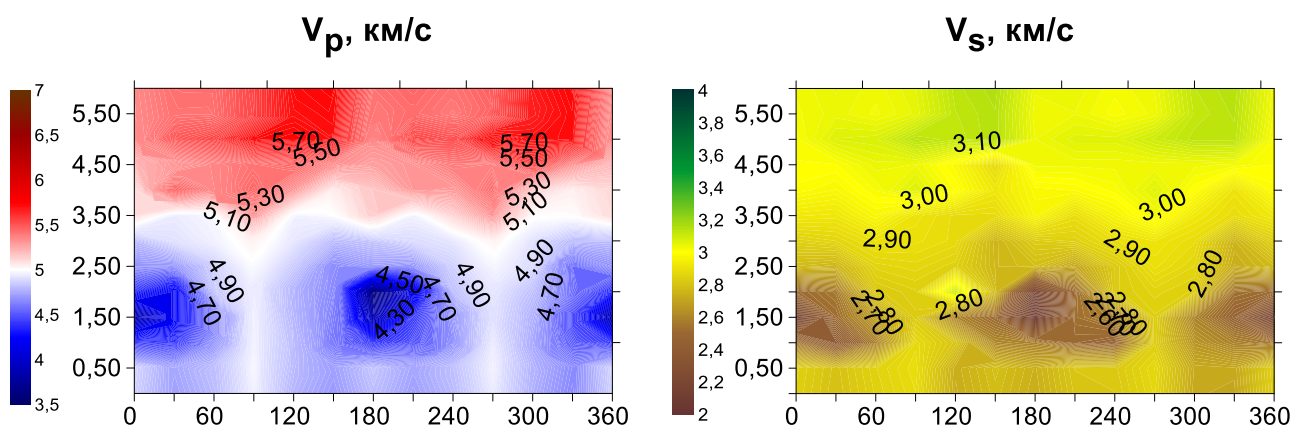


Рис. 1. Многоуровневые индикатрисы скоростей продольной и поперечной волн в образце диаметром 30 мм, высотой 60 мм. Горизонтальная ось – угол поворота трассы измерения относительно начального фиксированного направления. Вертикальная ось – положение трассы измерения относительно основания образца. Значение скорости определяется цветом.

упругости, определяемые по скоростям упругих волн, несколько отличаются от упругих модулей, полученных при статических измерениях. Это расхождение обусловлено

неидеальной упругостью пород, оно минимально для плотных разновидностей и увеличивается по мере снижения плотности ГП. Экспериментально определив модуль Юнга E и коэффициент Пуассона ν , можно вычислить значения модуля сдвига G и модуля всестороннего сжатия K .

2. Оценка точности определения скоростей упругих волн при ультразвуковом сканировании

Одним из важных вопросов в ультразвуковых исследованиях ГП является проблема точности определения времен пробега и скоростей упругих волн в исследуемой среде. Точность определения времен пробега определяется не только характеристиками используемого оборудования, правильностью интерпретации волновых форм, но и параметрами – геометрией и размерами исследуемых образцов ГП. В связи со сложностью строения исследуемого объекта (образца ГП) правильная интерпретация волновых форм часто является трудной задачей. Неверная интерпретация волновых форм приводит к неконтролируемым ошибкам, в то же время как аппаратную точность можно определить и проконтролировать.

Экспериментальная ультразвуковая установка включает пьезоэлектрические датчики, используемые как источник и приемник волн, генератор сигнала, передаваемого на пьезоэлектрический датчик-источник и возбуждающего упругую волну, усилителя принимаемого сигнала и цифрового осциллографа. Для улучшения поверхностного контакта между датчиками и образцом используется специальный гель полисахаридов. Начало регистрации сигнала совпадает с началом сигнала генератора. Вся система имеет конечное время реакции на сигнал генератора, которое необходимо учитывать при обработке. Эту поправку, как правило, определяют по сигналу датчик-датчик, либо по сигналам, прошедшим через эталонный образец с точно известными скоростями и размерами. Однако остается открытым вопрос о точном определении момента вступления сигнала датчик-датчик, а также о точности значений скоростей в эталоне, поскольку опыт показывает, что скорости в реальном эталонном образце алюминия могут отличаться от табличного значения на десятки метров в секунду.

В связи с этим нами было проведено методическое ультразвуковое исследование времен пробега и скоростей упругих волн на эталонных образцах металлов и сплавов. Для работы было изготовлено девять серий цилиндрических образцов из алюминия, стали, титана, бронзы, латуни и меди. Каждая серия включает 7 цилиндров с диаметром 30 мм различной высоты: 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60 мм. Для проверки однородности эталонов проводились радиальное зондирование с шагом 5 мм. Для всех использованных заготовок разброс значений времен

вступлений не превышал 0.02 мкс (одного шага дискретизации), то есть их можно считать однородными.

Исследования проводились разными типами пьезоэлектрических датчиков. В качестве источника и приемника использовались датчики с вариациями комбинаций как одного типа, так и различных типов.

На эталонных образцах определялись времена пробега и скорости продольной волны вдоль оси образца. Анализировались значения скоростей продольных волн, полученных на цилиндрах каждой серии разной высоты. Полученные зависимости скорости от высоты цилиндра позволили уточнить поправки на время реакции системы для всех типов использованных датчиков. Полученные результаты показали, что ошибки определения временной поправки наиболее сильно сказываются на полученных скоростях при работе с образцами высотой менее 15 мм особенно для материалов с высокими скоростями, то есть при работе с образцами горных пород предпочтительно использовать образцы с длиной пробега равными или более 30 мм.

Заключение

Ультразвуковые исследования на образцах ГП являются эффективным методом, позволяющим определять скорости упругих волн в образцах с точностью до первых десятков м/с, осуществлять мониторинг состояния среды в различных лабораторных экспериментах, моделирующих процессы в реальных средах. Полученные распределения скоростей могут быть использованы для построения цифрового ядра методами Rock Physics, решению задач геомеханики, оценки напряженного состояния околоскважинного пространства и др.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФЗ РАН.

Список литературы

1. *Дубиня Н.В., Белобородов Д.Е., Краснова М.А., Леонова А.М., Тихоцкий С.А.* Предварительные исследования возможности предсказания изменений внутренней структуры горных пород, вызванных псевдотрехосным сжатием, на основании зависимости деформаций от напряжений // *Процессы в геосредах*. 2022. № 4(34). С. 1809–1821.
2. *Баяк И.О., Белобородов Д.Е., Березина И.А., Гилязетдинова Д.Р., Корост Д.В., Краснова М.А., Тихоцкий С.А., Хомяк А.Н., Ялаев Т.Р.* Анизотропия или неоднородность? Решение проблемы в масштабе ядра // *Материалы V Балтийской школы-семинара «Петрофизическое моделирование осадочных пород»*. 2016. С. 17–20.
3. *Петров В.А., Насимов Р.М.* Способ определения неоднородностей упругих и фильтрационных свойств горных пород. – Патент на изобретение № 2515332 от 13.03.2014 г.

УДК: 534.321.9.

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39685

Физические и технологические задачи ультразвукового склеивания

С.И. Пугачев^{1,a}, Е.Ю. Рытов^{2,b}

¹ *АО «Концерн «МПО-Гидроприбор», Россия, 194044, Санкт-Петербург, Большой Сампсониевский пр., д. 24.*

² *Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Россия, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, д. 3.*

E-mail: ^aspugachev@bk.ru, ^bphysics_spbmtu@mail.ru

Аннотация: Технические преимущества процесса ультразвукового склеивания (УЗСкл) перед другими способами соединения разнородных материалов привлекают внимание многих исследователей. В то же время сложность процесса УЗСкл, обусловленная необходимостью исследования в большинстве случаев аморфных материалов, изменяющих структуру и свойства при воздействии ультразвуковых колебаний (УЗК), привели к тому, что к настоящему времени не сформулированы положения физического механизма УЗСкл, подтвержденные экспериментом. В связи с этим, а также в связи с наличием большого числа факторов, определяющих техническую эффективность процесса, не разработана принципиальная технология и отсутствуют специализированные ультразвуковые установки для его реализации. В статье предпринята попытка сформулировать основные, по мнению авторов, физические и технологические задачи УЗСк, требующих решения при различных конструктивно-технологических схемах процесса.

Ключевые слова: склеивание, ультразвуковые колебания, физические задачи, технологические задачи, конструктивно-технологические схемы.

Physical and technological problems of ultrasonic gluing

S.I. Pugachev^{1,a}, E.Yu. Rytov^{2,b}

¹ *JSC «Concern «Sea Underwater Weapons – Gidropribor», Saint Petersburg, 194044, Russia.*

² *St. Petersburg state marine technical University, Saint Petersburg, 190121, Russia.*

E-mail: ^aspugachev@bk.ru, ^bphysics_spbmtu@mail.ru

Abstract: The technical advantages of the ultrasonic gluing (USGI) process over other methods of joining dissimilar materials attract the attention of many researchers. At the same time, the complexity of the USGI process, due to the need to study in most cases amorphous materials that change their structure and properties when exposed to ultrasonic vibrations (USV), has led to the

fact that the provisions of the physical mechanism of USGI, confirmed by experiment, have not yet been formulated. In this regard, as well as due to the presence of a large number of factors determining the technical efficiency of the process, a fundamental technology has not been developed and there are no specialized ultrasound machines for its implementation. The article attempts to formulate the main, in the opinion of the authors, physical and technological problems of the USGI that require solutions for various design and technological schemes of the process.

Keywords: gluing, ultrasonic vibrations, physical problems, technological problems, design and technological schemes.

PACS: 43.35.Zc

Введение

Ультразвуковое склеивание (УЗСкл) относится к процессам, лежащим в основе соединения разнородных материалов, т. е. материалов, различающихся по химическому составу и молекулярной структуре. Общий подход к образованию подобных соединений разделяют на две стадии [1]. На первой подготовительной стадии соединяемые вещества сближаются на расстояния, требуемые для межатомного взаимодействия и производится подготовка поверхностей к взаимодействию. На второй, конечной стадии, приводящей к образованию прочного соединения, определяющую роль играют квантовые процессы электронного взаимодействия. В связи с этим при формулировке физических и технологических задач УЗСкл целесообразно прогнозировать роль ультразвуковых колебаний (УЗК) на этих стадиях.

1. Физические задачи УЗСкл

Рассмотрим схему процесса, согласно которой УЗК возбуждаются в тонком жидком слое (адгезиве), находящемся на поверхности твердого тела (субстрата) (рисунок 1).

Эта схема, названная нами «схемой тонкого слоя», была положена в основу процесса ультразвуковой металлизации (УЗМ) материалов [2]. Согласно схеме, (рисунок 1), волновое поле возбуждается в объеме жидкости, характерный объем которого меньше или много меньше длины акустической продольной волны в жидкости. Боковая поверхность акустического инструмента возбуждает в вязкой несжимаемой жидкости поле коротковолновых поперечных вязких волн. Их поглощение приводит к возникновению акустических потоков. Кроме того, вдоль контактной поверхности инструмента и жидкости вязкие волны, взаимодействующие с мягкой границей, вызывают среднюю радиационную силу, достаточную для изменения баланса сил на контактной поверхности трех фаз. В зазоре

(тонком слое) между инструментом и поверхностью твердого тела в жидкости возникают знакопеременные давления, величины которых зависят от толщины зазора и числа Рейнольдса. В фазе разрежения эти давления вызывают кавитацию.

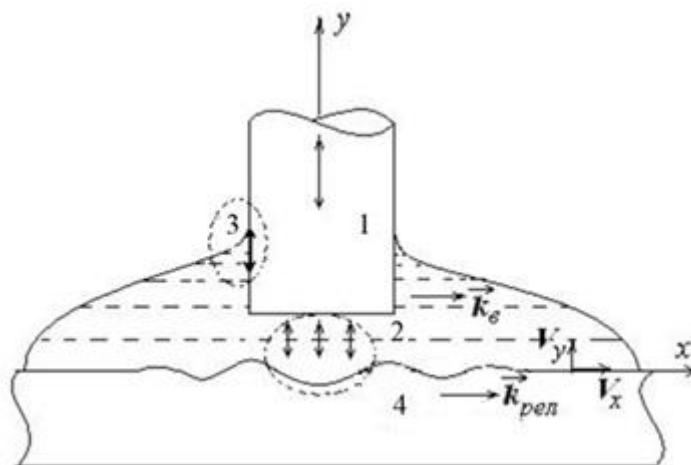


Рис. 1. Расположение акустического инструмента и реагирующих фаз с указанием направлений колебаний их частиц: 1 – инструмент, 2 – объем рабочей жидкости, 3 – область взаимодействия трех фаз, 4 твердая фаза.

Кавитация, течения и радиационная сила, действующие в поле вязких волн на границе раздела трех фаз, обуславливают создание адгезионных соединений в системе жидкость – твердое тело (рисунок 2).



Рис. 2. Акустогидродинамические процессы при УЗМ по схеме тонкого слоя.

Главную роль в процессе УЗСкл большинство исследователей отводит кавитации, не указывая, какую из физических моделей кавитации – тепловую или электрическую – [3-5]

они используют и не учитывая особенности возникновения и протекания кавитации в выбранной жидкости и в используемой конструктивно-технологической схеме.

Нами в анализе кавитации в УЗМ по схеме тонкого слоя была использована тепловая модель кавитации с учетом того, что кавитационный пузырек захлопывается в расплаве металла вблизи твердой стенки с образованием кумулятивной струи, ударяющей в стенку [6].

Главной особенностью процесса УЗСкл, например, по сравнению с процессом УЗМ, является использование в качестве жидких адгезивов расплавов полимеров – неньютоновских жидкостей высокой вязкости. Поэтому актуальной физической задачей исследования УЗСкл служит создание физической модели кавитации, учитывающей особенности молекулярной структуры и химической связи этих материалов.

Эксперименты показывают, что в отсутствие кавитации главная роль в процессе УЗСкл принадлежат акустическим течениям. Поэтому физический анализ особенностей возникновения и распространения акустических течений в расплавах полимеров является актуальной физической задачей.

2. Технологические задачи УЗСкл

Разработке технологических режимов УЗСкл должно предшествовать обоснование наличия кавитации в жидкости, а также измерение акустической мощности, возбуждаемой в жидкости, в том числе в режиме развитой кавитации [7].

К другим технологическим задачам относится выбор конструктивно-технологической схемы УЗСкл и определение технических режимов реализации процесса. Типичный технологический режим включает определение амплитуды УЗК, зазора между погруженным в жидкость наконечником акустического инструмента и поверхностью твердого тела, скорости процесса нанесения жидкого адгезива на поверхность твердого тела, угла наклона акустического инструмента к этой поверхности.

Применительно к конкретным адгезивам, по разработанным технологическим режимам исследуется воздействие УЗК на реологические характеристики адгезива (вязкость, поверхностное натяжение, смачивание), на газосодержание, на продолжительность отверждения адгезива, на процессы химического взаимодействия адгезива и субстрата [8-10].

Во введении отмечено, что УЗСкл следует рассматривать как один из способов соединения разнородных материалов. С этой точки зрения реализация представленных выше физических и технологических задач позволяет применить для рассмотрения физико-химической природы УЗСкл современные теории соединения разнородных материалов – теории адгезии.

С общих позиций различают [11]: 1) адгезию на молекулярном уровне (молекулярные взаимодействия) и 2) адгезию на макроскопическом уровне.

В первом случае взаимодействие фаз в системе субстрат – адгезив исследуется в рамках адсорбционной, химической, электрической и диффузионной теорий. Последняя считается наиболее применимой для рассмотрения адгезии полимеров к твердым телам. Задачей исследователей является, исходя из основных положений этой теории, оценить активирующее действие УЗК на процессы формирования адгезионных соединений при УЗСкл.

При рассмотрении адгезии на макроскопическом уровне основную роль играют реологические характеристики: смачивание, поверхностное натяжение, вязкость, поверхностная энергия. При этом активирующее действие УЗК на смачивание расплавами полимеров поверхности твердого тела и на вязкость расплавов полимеров подтверждено экспериментами.

Можно предположить, что при УЗСкл в объеме адгезива реализуются взаимодействия на микроскопическом уровне, а на границе раздела жидкость – твердое тело – на макроскопическом уровне. В обоих случаях роль УЗК сводится к активации процессов взаимодействия и, в результате, к повышению эксплуатационных характеристик образующихся соединений разнородных материалов.

Заключение

Для разработки физических и технологических задач процесса УЗСкл в статье использованы результаты проведенных авторами исследований процесса ультразвуковой металлизации (УЗМ) материалов, который протекает по аналогичной УЗСкл схеме тонкого слоя.

Решение этих задач позволит сформулировать основные положения физического механизма воздействия ультразвука на систему полимерный расплав – твердое тело и расширить технологические возможности ультразвукового склеивания как эффективного способа создания высокопрочных соединений разнородных материалов.

Список литературы

1. Рыкалин Н.Н., Шоршоров М.Х., Красулин Ю.Л. Физические и химические проблемы соединения разнородных материалов. // Известия АН СССР. Неорганические материалы. 1965. № 1. С. 29-37.
2. Красавина М.А., Пугачев С.И., Семенова Н.Г. Ультразвуковая металлизация электрофизической керамики. СПб.: Изд. Политехнич. ун-та, 2013.

3. *Lauterborn W., Kurz T.* Physics of bubble oscillations. // Reports on Progress in Physics. 2010. V. 73, 106501.
4. *Борисенок В.А.* Сонолюминесценция: эксперименты и модели (обзор). // Акустический журнал, 2015. Т. 61, № 3. С. 333-360.
5. *Маргулис М.А., Половинкин В.Н., Яшин А.И.* Современные подходы к описанию динамики кавитационных пузырьков и кавитационного облака. // Морские интеллектуальные технологии, 2023. № 2. Часть 1. С. 320-326.
6. *Красавина М.А., Кувшинов Г.И., Пугачев С.И., Семенова Н.Г.* К выбору зазора инструмент-образец при ультразвуковой металлизации. // ФХОМ, 1996, Вып. 4. С. 100-107.
7. *Маргулис М.А., Конопацкая И.И., Маргулис И.М.* Измерение излученной и поглощенной акустической мощности сравнительным калориметрическим методом // Ежегодник РАО, 2006. Вып. 7. Акустика неоднородных сред. С. 1-17.
8. *Avila-Orta C., Espinoza-Gonzalez C., Martines-Colunga G., Bueno-Baques D., Maffezzoli A., Lionetto F.* An overview of progress and current challenges in ultrasonic treatment of polymer melts. // Advances in Polymer Technology, 2013. V. 32, No. S1, E582-E602.
9. *Zhou Z., Chen C.* Research advances in the ultrasonic-assisting adhesive bonding. // Journal of Manufacturing Processes 110 (2024). P. 134-160.
10. *Краснов А.В., Пугачев С.И., Павловский А.С., Семенова Н.Г.* Ультразвуковое смачивание жидкостью твердого тела и его применение в гидроакустике. // ГА-2016. СПб. 2016. С. 424-426.
11. *Bricotte L., Chougrani K., Alard V., Ladmiral V., Caillol S.* Adhesion theories: A didactic review about a century of progress. // International Journal of Adhesion and Adhesives 132 (2024). 103673.

УДК: 534-8

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39686

Ультразвуковая интенсификация массообмена в газожидкостных системах

А.Р. Барсуков^a, Р.Н. Голых^b, В.Н. Хмелев^c, И.А. Маняхин^d

*Бийский технологический институт (филиала) ФГБОУ ВО «Алтайский
государственный технический университет им. И.И. Ползунова». 659305, Алтайский край, г.*

Бийск, ул. Героя Советского Союза Трофимова, д. 27.

E-mail: ^abarsukov.ar@bti.secna.ru, ^bgrn@bti.secna.ru, ^cynh@bti.secna.ru,

^dmaniakhin.ia@bti.secna.ru

Аннотация: Основная проблема ускорения поглощения газа жидкостью за счет классического кавитационного воздействия при стандартных условиях (температура не более 20 °С) обусловлена невозможностью формирования поверхностных волн на внутренней поверхности газового пузырька для увеличения межфазной поверхности взаимодействия при увеличении вязкости жидкости более 12 мПа·с, когда гидродинамические свойства жидкости мало отличаются от воды и спирта. Это объясняется быстрым затуханием волн за счёт сил вязкого трения. Однако, во многих случаях (например, при поглощении попутных нефтяных газов для предотвращения коррозии трубопровода, получении медицинских растворов, насыщаемых химически активными газами для лечебного воздействия или озонирования для обеззараживания, реализации химических технологий производства энергонасыщенных материалов) требуется реализация процесса поглощения газов жидкостями, которые при нормальных температурных условиях (20 °С) имеют высокую вязкость (до 30 мПа·с).

Для решения проблемы авторами работы выявлены условия, при которых УЗ воздействие обеспечивает снижение вязкости жидкости, и одновременно обеспечивает достаточную интенсивность кавитации для формирования поверхностных волн на внутренней поверхности газового пузырька и увеличение межфазной поверхности взаимодействия. Выявленные условия позволили предложить и реализовать новую технологию повышения эффективности поглощения газов в вязких жидкостях за счет единовременной оптимизации режимов ультразвукового кавитационного воздействия и температурных условий. Практическая реализация новой технологии обеспечивает увеличение поглощения газов вязкими жидкостями на 30...80 %.

Ключевые слова: ультразвук, моделирование, абсорбция, кавитация, жидкость, газ.

Abstract: The main problem of accelerating the absorption of gas by a liquid due to the classical cavitation effect under standard conditions (temperature no more than 20 °C) is due to the

impossibility of forming surface waves on the inner surface of the gas bubble to increase the interfacial interaction surface with an increase in the viscosity of the liquid of more than $12 \text{ MPa} \cdot \text{s}$, when the hydrodynamic properties of the liquid differ little from water and alcohol. This is due to the rapid attenuation of waves due to viscous friction forces. However, in many cases (for example, when absorbing associated petroleum gases to prevent pipeline corrosion, obtaining medical solutions saturated with chemically active gases for therapeutic effects or ozonation for disinfection, implementing chemical technologies for the production of energy-saturated materials) It requires the implementation of the process of absorption of gases by liquids that, under normal temperature conditions (20°C), have a high viscosity (up to $30 \text{ MPa} \cdot \text{s}$).

To solve the problem, the authors identified the conditions under which ultrasonic action reduces the viscosity of the liquid, and at the same time provides sufficient cavitation intensity for the formation of surface waves on the inner surface of the gas bubble and an increase in the interfacial interaction surface. The identified conditions made it possible to propose and implement a new technology to increase the efficiency of gas absorption in viscous liquids by simultaneously optimizing the modes of ultrasonic cavitation and temperature conditions. The practical implementation of the new technology provides an increase in the absorption of gases by viscous liquids by 30...80%.

Index terms: ultrasound, modeling, absorption, cavitation, liquid, gas.

Введение

Процессы растворения газов в жидкостях протекают гораздо медленнее, чем в так называемых системах «газ-газ» или «жидкость-жидкость». Данная особенность обусловлена тем, что коэффициенты диффузии газов в жидкостях в 5 000-10 000 раз ниже, чем у газов в газах [1, 2].

Особую практическую значимость представляет поглощение газов вязкими жидкостями в задачах нефтедобычи (когда требуется поглощение попутных нефтяных газов для предотвращения коррозии трубопровода), получения медицинских растворов (когда требуется поглощение химических активных газов для лечебного воздействия или озонирование для обеззараживания), химических технологий производства энергонасыщенных материалов. При этом поглощение газов вязкими жидкостями проходит гораздо медленнее, чем невязкими.

Для преодоления этого ограничения необходимо увеличение контактирующей поверхности взаимодействия между газовой и жидкой фазами для увеличения общей скорости массопереноса, которую возможно увеличить за счёт волнообразных возмущений. Поэтому, одним из наиболее эффективных способов увеличения поверхности

взаимодействия между газовой и жидкой фазами является генерация на поверхности растворяемого пузырька периодических волн давления с помощью ультразвуковой кавитации.

Ранее авторами теоретически и экспериментально установлено [3, 4], что при стандартных условиях (температура 20 °С, давление 1...4 атм) предельная вязкость жидкости, при которой достигается эффект, не превышает 12 мПа·с. Однако, в выше перечисленных практически важных процессах вязкость поглощающих жидкостей может быть значительно выше и достигать 30 мПа·с при этих же условиях.

Поэтому необходим поиск новых физических возможностей реализации поглощения газов вязкими жидкостями. Один из возможных подходов – ультразвуковое кавитационное воздействие с одновременным повышением температуры.

Однако, при повышении температуры жидкости на эффективность поглощения газа влияют 2 взаимоисключающих фактора:

1. Возможность многократного увеличения их амплитуды поверхностных волн за счет уменьшения декремента затухания колебаний при снижении вязкости.
2. Уменьшение величины возмущающих сил, которые инициируют поверхностные волны за счет снижения интенсивности кавитации.

В связи с этим, возникает необходимость теоретических и экспериментальных исследований кавитационного процесса на границе раздела, обеспечивающего формирование капиллярных волн с учётом изменения вязкости жидкости при повышенной температуре и с учётом фазовых переходов.

Результаты исследований представлены в следующем разделе.

1 Основная часть

При проведении теоретических исследований за основу взята модель формирования капиллярных волн, описанная в ранее опубликованной работе [5]. Поскольку, как было отмечено ранее, необходимо учитывать влияние фазовых переходов при повышенной температуре, была произведена [5] модификация модели развития кавитационного пузырька.

За основу построения уравнений динамики пузырька с учётом фазовых переходов и теплопроводности взята работа авторов Института механики и машиностроения КазНЦ РАН [5], в которой предлагается наиболее полная, на сегодняшний день, численная модель динамики газового пузырька, одновременно учитывающая следующие факторы:

1. Деформацию пузырька при сжатии.
2. Теплообмен газа внутри пузырька с окружающей жидкостью.
3. Фазовые переходы «жидкость-пар» и обратно.
4. Сжимаемость жидкости.

Однако, представленная модель отличается высокой сложностью алгоритма расчёта, по сравнению с решением обыкновенных дифференциальных уравнений. Кроме того, модель не учитывает вязкости среды.

Поэтому авторами был осуществлён вывод модифицированного уравнения (без учёта деформации пузырька, не требуемой для разработки модели, но с учётом изменения вязкости жидкости) и, в результате интегрирования уравнения сохранения импульса жидкости в дифференциальной форме, получено следующее уравнение динамики газового пузырька с учётом фазовых переходов и вязкости:

$$2\left(\frac{dR}{dt}\right)^2 + R\frac{d^2R}{dt^2} - 2\left(\frac{dR_0}{dt}\right)^2 - 2\frac{dR}{dt}\frac{J}{\rho} + R\frac{1}{\rho}\frac{dJ}{dt} = R\frac{d^2R_0}{dt^2};$$

$$\rho\left(\frac{3}{2}\left(\frac{dR}{dt}\right)^2 + R\frac{d^2R}{dt^2} + \frac{1}{2}\left(\left(\frac{dR}{dt}\right)^2 - \left(\frac{dR}{dt} + \frac{J}{\rho}\right)^2\right) + R\frac{1}{\rho}\frac{dJ}{dt}\right) = p_g - 4\eta\frac{\frac{dR}{dt} - \frac{J}{\rho}}{R} - \frac{2\sigma}{R} - p_\infty;$$

где η – вязкость жидкости, Па·с; σ – поверхностное натяжение жидкости; p_g – давление газа внутри пузырька, Па; p_∞ – давление на больших расстояниях от пузырька, обусловленное акустическими колебаниями, Па; R_0 – радиус выделенной сферической плоскости, которая движется вместе с жидкостью, и не участвует в фазовом переходе, м; R – фактический радиус кавитационного пузырька, м; J – удельный поток массы жидкости, переходящей в жидкой в паровую фазу, кг/(м²·с²); ρ – плотность жидкости, кг/м³; K – коэффициент пропорциональности определяющий скорость испарения жидкость в зависимости от разности давления насыщенного пара и парциального давления пара, кг/(Па·м²·с²); P_{sat} – давление насыщенного пара при текущей температуре, Па; P_v – парциальное давление пара в жидкости, Па.

Полученное уравнение динамики газового пузырька позволяет устанавливать зависимости амплитуды давления ударной волны от свойств жидкости и параметров ультразвукового воздействия и определять площадь межфазной поверхности с помощью модели формирования капиллярных волн, приведённой в работе [3].

На рисунке 1 приведены зависимости достигаемого относительного увеличения площади межфазной поверхности от амплитуды звукового давления (частота колебаний здесь и далее, в том числе в экспериментальных исследованиях, составляет 22 кГц). Зависимости получены на примере водно-глицеринового раствора при различных температурах и различных исходных вязкостях жидкости при температуре 20 °С.

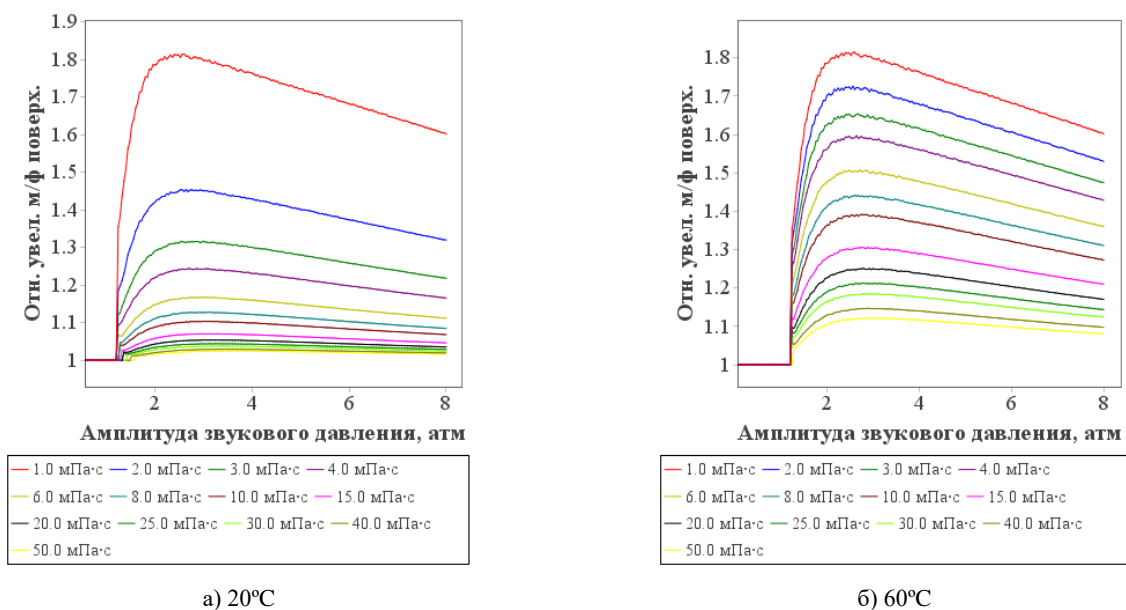


Рис. 1. Зависимости относительного увеличения межфазной поверхности от амплитуды звукового давления вблизи межфазной поверхности при различных исходных вязкостях жидкости и температурах (здесь и далее частота колебаний – 22 кГц)

Согласно полученным результатам, при температуре 20°C (рис. 1а) для жидкостей, имеющих исходную вязкость 8 мПа·с, межфазная поверхность возрастает под действием ультразвуковой кавитации на 30% (в 1,3 раза) и более. А для жидкостей с вязкостью воды 1 мПа·с межфазная поверхность увеличивается на 80%. В свою очередь, для жидкостей с вязкостью от 10...15 мПа·с и выше достигаемое увеличение межфазной поверхности не превышает 1,1 (не более чем на 10%). Данные на рис. 1а согласуются с ранее полученными результатами.

Если повысить температуру, при которой осуществляется воздействие, до 60°C, то, как уже говорилось, одновременно снижаются вязкость и интенсивность кавитации. Однако преобладающим фактором, влияющим на увеличение межфазной поверхности, является уменьшение декремента затухания. При этом, интенсивность кавитации при данной температуре обеспечивает формирование развитой межфазной поверхности.

Так, например, для жидкостей с исходной вязкостью (при температуре 20°C) 10...15 мПа·с происходит увеличение межфазной поверхности при температуре 60 °С не менее, чем в 1,3 раза. При этом, для жидкостей с исходной вязкостью до 50 мПа·с увеличение межфазной поверхности превышает 1,1 раз, а для жидкостей с вязкостью 20 мПа·с увеличение межфазной поверхности превышает 1,25 раз (при температуре 20 °С для таких жидкостей увеличение межфазной поверхности было практически незаметным и не превышало 1,05 раз).

Для экспериментального подтверждения теоретически установленного факта возрастания эффекта ультразвукового кавитационного воздействия для вязких жидкостей с

повышением температуры был ранее разработан специализированный лабораторный стенд, конструктивная схема которого приведена на рисунке 2а [4]. Стенд позволил получить серии изображений межфазной поверхности. Авторами проведён анализ изображений, позволивший определить зависимости увеличения межфазной поверхности от температуры и исходной вязкости жидкости (при стандартной температуре). Зависимости приведены на рисунке 2б.

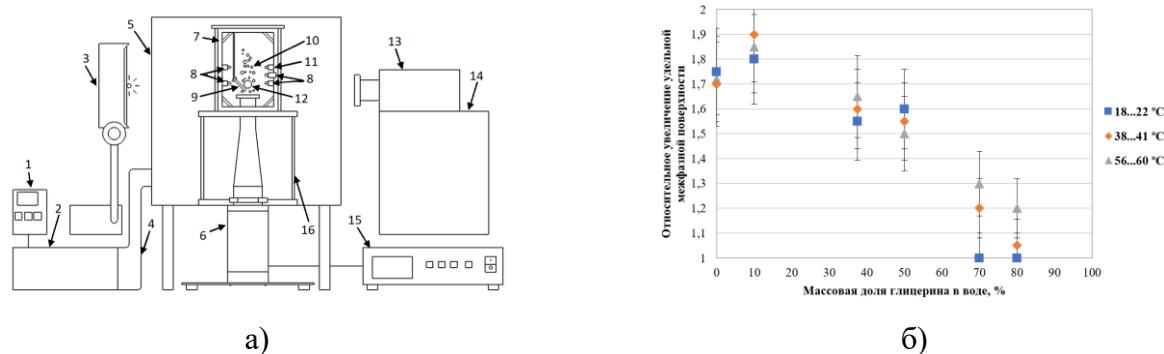


Рис. 2. Схема лабораторного стенда для исследования влияния температурных режимов и ультразвуковых колебаний на формирование межфазной поверхности (а) и результаты экспериментов (б): 1 – TRM-10, 2 – теплоушка, 3 – прожектор, 4 – воздуховод, 5 – термокамера, 6 – УЗКС, 7 – держатель, 8 – измерительные термопары, 9 – инъекционный канал, 10 – кавитационный канал, 11 – термапара (TRM-10), 12 – барботажный пузырь, 13 – высокоскоростная камера, 14 – подставка для камеры, 15 – электронный генератор, 16 – технологический объём

Результаты обработки экспериментальных данных качественно согласуются с полученными теоретическими зависимостями и позволили установить следующее:

– при температуре 18...22 °С и исходных вязкостях водно-глицеринового раствора 25,1 и 41,2 мПа·с эффект практически не наблюдается (для вязкостей 12,5 мПа·с и менее межфазная поверхность увеличивается более, чем в 1,5 раза – результат, который превосходит теоретический);

– повышение температуры до 38...41 °С приводит к заметному эффекту (даже с учётом погрешности) воздействия ультразвуковой кавитации даже на жидкость с исходной вязкостью 25,1 мПа·с;

– УЗ воздействие при температуре 56...60 °С обеспечивает увеличение поверхности раздела газа и жидкости с исходной вязкостью 41,2 мПа·с до 1,2 раз, а жидкости с исходной вязкостью 25,1 мПа·с – до 1,3 раз. Такого эффекта не наблюдалось при комнатной температуре. В свою очередь, повышение температуры усиливает эффект ультразвуковой кавитации даже для маловязких жидкостей. Для жидкости с исходной вязкостью 1,5 мПа·с межфазная поверхность увеличивается до 1,9 раз при температуре 56...60 °С (при температуре 18...22 °С достигнутое увеличение составляло 1,8 раз).

При температуре 70 °С и выше роста эффекта кавитационного воздействия не наблюдается.

Полученные результаты позволили предложить новую технологию эффективной ультразвуковой интенсификации процесса поглощения газов вязкими жидкостями.

Заключение

Предложена и экспериментально подтверждена возможность реализации новой технологии ультразвуковой интенсификации поглощения газов вязкими жидкостями.

В основу предложенной технологии положена оптимизация температурных условий, способных обеспечить формирование волн в вязких жидкостях на поверхности газового пузырька.

Теоретически и экспериментально установлено, что повышение температуры с 20 до 60 градусов Цельсия обеспечивает достижение развитой межфазной поверхности (увеличение достигает 30 % и более) жидкостей с вязкостью 25...40 мПа·с, для которых такой эффект не реализуется при температуре 20 °С.

Предложенный и научно обоснованный подход позволяет создать технологии эффективной ультразвуковой интенсификации поглощения газов жидкостями в задачах нефтедобычи (когда требуется поглощение попутных нефтяных газов для предотвращения коррозии трубопровода), получения медицинских растворов (когда требуется поглощение химических активных газов для лечебного воздействия или озонирование для обеззараживания) и химических технологий производства энергонасыщенных материалов.

Исследование выполнено при поддержке РФФ №23-12-00278.

Список литературы

1. Новосёлов А.Г., Дужий А.Б., Голикова Е.Ю. Молекулярная диффузия газов в жидкости. Коэффициенты молекулярной диффузии диоксида углерода в воде // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия "Процессы и аппараты пищевых производств". - 2014. - № 2.
2. Подрыга В.О., Вихров Е.В., Поляков С.В. Молекулярно-динамический расчет коэффициента диффузии газов на примере аргона, азота, водорода, кислорода, метана и углекислого газа // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. - 2019. - № 96. 10.20948/prepr-2019-96.
3. Golykh R.N. Generalized functions of slow growth problem statement for capillary wave formation in gas-liquid interface under ultrasonic cavitation // Mathematical Notes of NEFU. - 2025. - No. 2.
4. Golykh R.N., Carrat J.B., Manyakhin I.A., Barsukov A.R. Influence of liquid viscosity on growth of the surface of an air bubble subjected to ultrasonic cavitation // Physics of Fluids. - 2025. - V. 37, Iss. 12. - P. 122106. 10.1063/5.0300785.
5. Аганин А.А., Халитова Т.Ф., Хисматуллина Н.А.. Метод численного решения задач сильного сжатия несферического кавитационного пузырька // Вычислительные технологии. Т. 15, №1, 2010.

УДК: 534.8.

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39687

Сравнительный численный анализ сферических ультразвуковых излучателей из пористой и сплошной пьезокерамик

А.С. Леднов^a, А.В. Наседкин^b, И.А. Швецов^c, А.Н. Рыбьянец^d

Южный федеральный университет. 344006 г. Ростов-на-Дону, ул. Б. Садовая, 105/42.

E-mail: ^aalednov@sfedu.ru, ^bavnasedkin@sfedu.ru, ^cmipa@sfedu.ru, ^danrybyanets@sfedu.ru

Аннотация: Проведено численное и экспериментальное исследование фокусирующих сферических пьезоизлучателей медицинского ультразвука, разрабатываемых в НИИ физики ЮФУ. Эти преобразователи имеют электродированные сферические поверхности и выполнены из пористой пьезокерамики, поляризованной по радиусу. При работе на первых электрически активных частотах толщинных колебаний преобразователи генерируют акустические волны, излучаемые во внешнюю среду, моделирующую мягкие биологические ткани. За счет интерференции в фокальной зоне наблюдаются большие амплитуды волн давления, что важно для различных медицинских применений. Основная особенность состояла в использовании пористой пьезокерамики, которая имеет меньший акустический импеданс по сравнению с плотной, а следовательно, и лучшее согласование с импедансом внешней среды. Было проведено конечно-элементное моделирование сферических пьезоизлучателей, в том числе нагруженных на вязкие акустические среды, и исследована их эффективность. При этом эффективные модули пористой пьезокерамики рассчитывались из решения задач гомогенизации с использованием упрощенных моделей неоднородной поляризации. Для частных случаев осуществлена валидация результатов численных расчетов с данными натурных экспериментов. Проведено также сравнение излучателей из пористой пьезокерамики с излучателями из плотной керамики с двумя переходными упругими слоями, на основе которого сделан вывод об эффективности использования пористой пьезокерамики.

Ключевые слова: сферический излучатель, фокальная зона, волна давления, пористая пьезокерамика, компьютерное моделирование.

Comparative numerical analysis of spherical ultrasonic transducers from porous and solid piezoceramics

A.S. Lednov^a, A.V. Nasedkin^b, I.A. Shvetsov^c, A.N. Rybyanets^d

Southern Federal University, 105/42 Bolshaya Sadovaya Str., Rostov-on-Don 344006, Russia.

E-mail: ^aavnasedkin@sfedu.ru, ^baanasedkina@sfedu.ru, ^cmipa@sfedu.ru, ^danrybyanets@sfedu.ru

Abstract: A numerical and experimental study was conducted on focusing spherical piezoelectric transducers for medical ultrasound, developed at the Research Institute of Physics of the Southern Federal University. These transducers have electrode-coated spherical surfaces and are made of porous piezoelectric ceramics polarized along their radius. When operating at the first electrically active frequencies of thickness vibrations, the transducers generate acoustic waves emitted into an external medium simulating soft biological tissue. Due to interference in the focal zone, large pressure wave amplitudes are observed, which is important for various medical applications. The key feature was the use of porous piezoelectric ceramics, which have a lower acoustic impedance than dense ceramics, and therefore better match the impedance of the external medium. Finite element modeling of spherical piezoelectric transducers, including those loaded on viscous acoustic media, was carried out, and their efficiency was investigated. The effective moduli of porous piezoceramics were calculated by solving homogenization problems using simplified models of inhomogeneous polarization. For specific cases, the numerical calculation results were validated against field experimental data. A comparison of porous piezoceramic transducers with dense ceramic transducers with two elastic matched layers was also conducted, leading to a conclusion regarding the effectiveness of using porous piezoceramics.

Keywords: spherical transducer, focal zone, pressure wave, porous piezoceramics, computer modeling

PACS: 43.35.Zc

Введение

Системы фокусированного ультразвука нашли широкое применение в различных биомедицинских приложениях [1]. В этих системах в качестве активных элементов достаточно часто используются пьезоэлектрические материалы. Пористая пьезокерамика представляется перспективным материалом для генерирования высокоинтенсивного фокусированного ультразвука, поскольку она имеет меньший акустический импеданс по сравнению с плотной пьезокерамикой, и поэтому для нее можно обойтись без согласующих переходных слоев [2], что облегчает конструкцию преобразователя. Так, в [3-5] и в других работах, были исследованы пьезоизлучатели в форме сферических сегментов с технологическим отверстием по середине, выполненные из пористой пьезокерамики. В настоящем исследовании проводится сравнение пьезоизлучателей из сплошной и пористой сегнетожестких пьезокерамик ПКР-8* на основе численных расчетов в конечно-элементном (КЭ) пакете ANSYS APDL.

1 Постановка задачи

Рассмотрим сферический пьезоизлучатель, погруженный в акустическую жидкость. На рис. 1 (а) показано меридиональное сечение пьезоизлучателя в цилиндрической системе координат $O r \varphi z$. Область, закрашенную бирюзовым цветом, занимает пьезоизлучатель, который имеет толщину h , внутренний радиус R и максимальную внутреннюю полуширину d . Пьезоизлучатель выполнен из пьезокерамики, поляризованной вдоль радиального направления в соответствующей сферической системе координат, связанной с фокальной точкой O_f . Торцевые поверхности $r=R$ и $r=R+h$ электродированы. Акустическая среда заполняет области, закрашенные серым цветом. Геометрические размеры для пьезоизлучателя задавались следующими: $R=60$ (мм), $d=50$ (мм), а толщина h подбиралась так, чтобы первая электрически активная частота его толщинных колебаний была приблизительно равной $f_{a1}=250$ (кГц). Размеры акустической области были выбраны так, чтобы в ней целиком помещалась фокальная зона, а задаваемые импедансные условия на внешней границе акустической области не давали отраженных волн, существенных для фокальной зоны. В данных материалах для пьезоизлучателя рассматривались три набора констант сегнетожесткой пьезокерамики ПКР-8*: сплошная пьезокерамика (вариант 1) и пористая пьезокерамика с 20 % пористости с двумя наборами эффективными модулями, найденными по методологии, близкой к описанной в [7]. В варианте 2 при решении задач гомогенизации предполагалась однородная поляризации пьезокерамической матрицы, а в варианте 3 – неоднородная модель поляризации (модель 5 из [7]). Значения этих модулей в стандартных для теории пьезоэлектричества обозначениях представлены в таблице 1.

Таблица 1. Материальные свойства пьезокерамики ПКР-8*: 1 – плотная, 2, 3 – пористая.

Вид пьезокерамики	ρ , 10^3 кг/м ³	$c_{\alpha\beta}^E, 10^{10}$ Н/м ²					$e_{j\beta},$ Кл/м ²			$\tilde{\epsilon}_{jj}^S = \epsilon_{jj}^S / \epsilon_0$	
		c_{11}^E	c_{12}^E	c_{13}^E	c_{33}^E	c_{44}^E	e_{33}	e_{31}	e_{15}	$\tilde{\epsilon}_{11}^S$	$\tilde{\epsilon}_{33}^S$
1) Сплошная	7.8	11.2	5.7	5.1	9.9	2.5	15.2	-6.9	11.6	730	690
2) $p=20\%$, H	6.24	7.62	3.65	3.17	6.61	1.78	11.57	-3.72	7.97	581.61	540.48
3) $p=20\%$, IH	6.24	7.54	3.52	3.13	6.64	1.81	11.37	-3.04	7.41	609.44	563.18

С использованием данных из таблицы 1 для толщины пьезоизлучателя были получены значения $h=8.4$ (мм) для варианта 1, $h=7.8$ (мм) для варианта 2, и $h=7.7$ (мм) для варианта 3. Для акустической среды принимались следующие значения материальных параметров: плотность $\rho=835$ (кг/м³), скорость звука $c=1.42 \cdot 10^3$ (м/с), динамическая вязкость $\mu=3$ (Па·с).

В пьезокерамике задавалось также частотно-независимое демпфирование через добротность $Q_d=800$ для сплошной керамики и $Q_d=640$ – для пористой. Пьезоизлучатель считался жестко заземленным в крайней правой точке при $r=R+h$.

При расчетах использовалась стандартная техника КЭ решения задач пьезоэлектричества с акустическими средами, описанная в документации по ANSYS APDL и, например, в [3] с конечными элементами PLANE13 с опцией пьезоэлектрического анализа и FLUID29. Примеры КЭ сетки приведены на рис. 1 (б), (в), где на рис. 1 (б) в области пьезоизлучателя различными цветами показаны конечные элементы с элементными системами координат, повернутыми вдоль радиальных направлений, а на рис. 1 (в) синим цветом выделены акустические элементы с опцией контакта с твердотельными элементами.

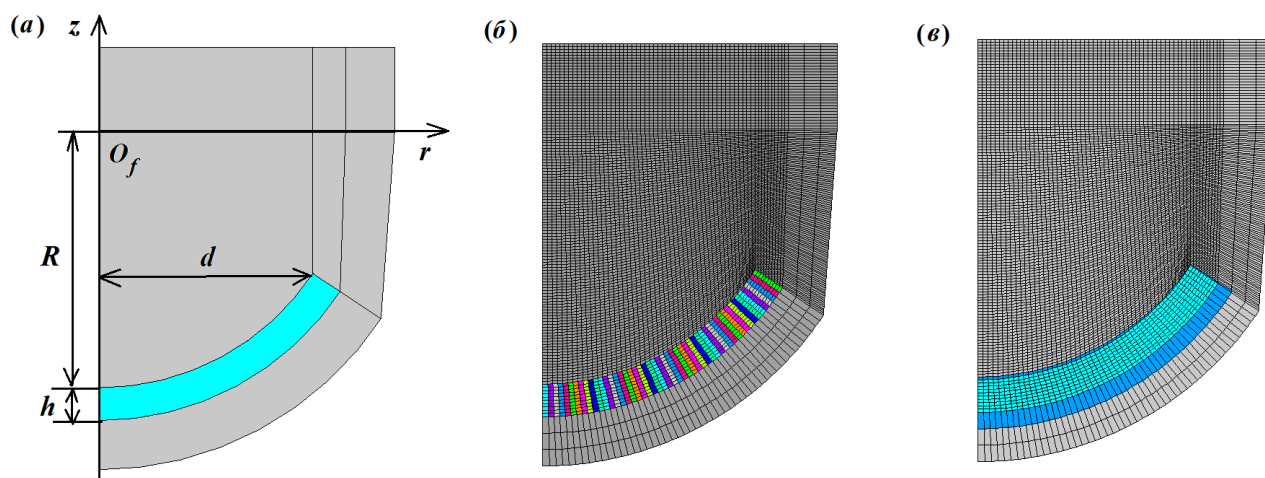


Рис. 1. Геометрия меридионального сечения модели (а), КЭ сетка с расцветкой по элементным системам координат (б) и КЭ сетка с расцветкой по типам элементов (в)

Расчеты проводились в режиме установившихся колебаний в окрестности первых электрически активных частот электрического резонанса и антирезонанса при двух вариантах возбуждения волн гармонически меняющейся разностью потенциалов на электродах амплитуды $\Delta V=100$ (В) или осциллирующим электрическим зарядом $Q=0.6 \cdot 10^{-6}$ Кл на одном электроде при заземленном втором электроде.

2 Результаты и обсуждение

На рис. 2 приведены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) модуля электрического адмиттанса Y на электродах (а) и акустического давления p в фокальной точке O_f (б) для трех вариантов пьезокерамического материала пьезоизлучателя при возбуждении колебаний разностью потенциалов. Как видно, максимумы этих величин наблюдаются вблизи частот электрических резонансов, и хотя максимумы адмиттанса заметно меньше для пористой пьезокерамики (варианты 2 и 3), чем для плотной (вариант 1), но максимумы акустического давления оказываются приблизительно одинаковыми.

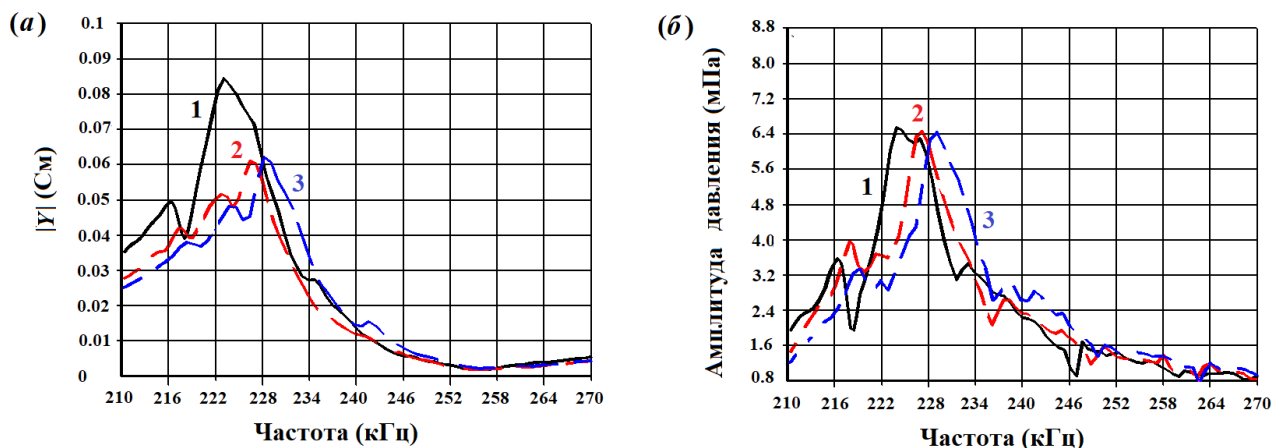


Рис. 2. Амплитуды адмиттанса в пьезоизлучателе (а) и давления в фокусе в акустической среде (б) при возбуждении колебаний разностью потенциалов

На рис. 3 приведены АЧХ модуля электрического импеданса Z (а) и акустического давления в точке O_f (б) для трех вариантов пьезокерамического материала при возбуждении колебаний электрическим током (зарядом). Из рис. 3 видно, что максимумы этих величин находятся вблизи частот электрических антирезонансов. Здесь также можно отметить, что хотя максимумы АЧХ импеданса заметно меньше для пористой пьезокерамики, чем для плотной, максимумы акустического давления оказываются достаточно близкими, причем для варианта 2 однородно поляризованной пьезокерамики максимум давления даже больше, чем для плотной.

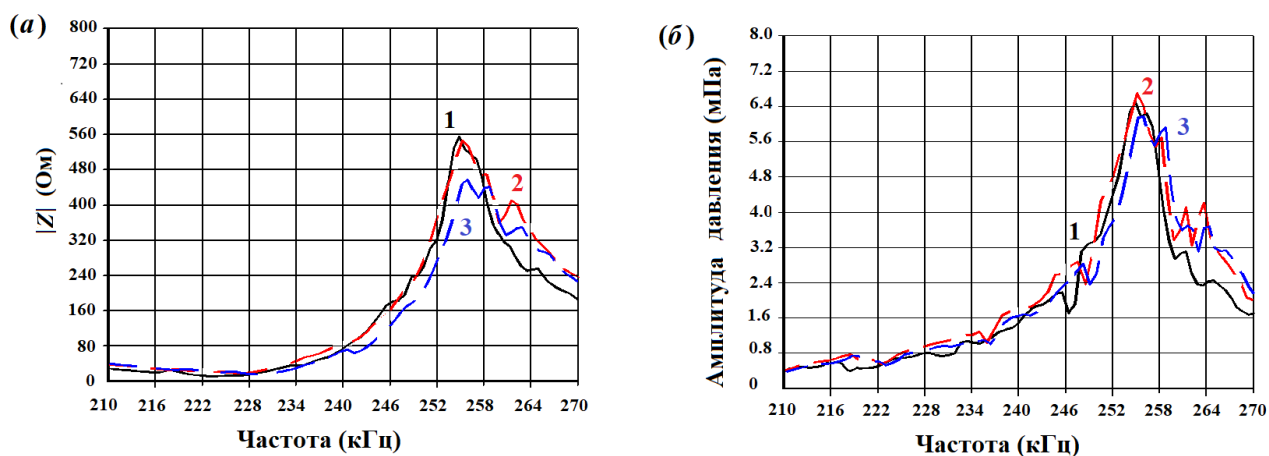


Рис. 3. Амплитуды импеданса в пьезоизлучателе (а) и давления в фокусе в акустической среде (б) при возбуждении колебаний электрическим током или зарядом

Как можно заметить, при обоих вариантах возбуждения колебаний использование пористой пьезокерамики приводит к достаточно хорошим результатам для поля акустического давления, особенно для варианта однородно поляризованной пьезокерамики.

Заключение

В силу ограниченности объема здесь представлена только небольшая часть проведенных исследований. В частности, не приведены результаты анализа пьезоизлучателей с другой

пористостью пьезокерамического материала, пьезоизлучателей с переходными слоями, результаты расчетов нестационарных задач при импульсном возбуждении, а также сравнение численных и экспериментальных данных для частных случаев. Эти результаты, как и приведенные в [3-6] и др. работах, демонстрируют перспективность использования пористой пьезокерамики в системах фокусирующего ультразвука, в гидроакустике и в пьезогенераторах «зеленой» энергии.

Работа выполнена при поддержке РНФ в рамках проекта № 22-11-00302-П, <https://rscf.ru/project/22-11-00302/>, в Южном федеральном университете.

Список литературы

1. *Bai X., Wang D., Zhen L., Cui M., Liu J., Zhao N., Lee C., Yang B.* Design and micromanufacturing technologies of focused piezoelectric ultrasound transducers for biomedical applications // *Int. J. Extreme Manuf.* 2024. **6**, N 6. P. 062001.
2. *Levassort F., Holc J., Ringgaard E., Bove T., Kosec M., Lethiecq M.* Fabrication, modelling and use of porous ceramics for ultrasonic transducer applications // *J. Electroceram.* 2007. **19**. P. 127.
3. *Домашенкина Т.В., Наседкин А.В., Рыбьянец А.Н.* Конечно-элементный анализ фокусирующего ультразвукового пьезоизлучателя в режиме установившихся колебаний // *Изв. ЮФУ. Техн. науки.* 2010. № 6 (107). С. 174.
4. *Швецов И.А., Щербинин С.А., Астафьев П.А., Мойса М.О., Рыбьянец А.Н.* Численное моделирование и оптимизация акустических полей и конструкций фокусирующих ультразвуковых преобразователей высокой интенсивности // *Изв. РАН. Сер. Физ.* 2018. **82**, № 3. С. 405.
5. *Rybyanets A.N., Shvetsov I.A., Petrova E.I., Lugovaya M.A., Shvetsova N.A.* Numerical simulation and optimization of acoustic fields and designs of composite HIFU transducers // *Ferroelectrics.* 2019. **543**, N 1. P. 48.
6. *Shvetsov I.A., Shcherbinin S.A., Shvetsova N.A., Petrova E.I., Rybyanets A.N.* Experimental study of high intensity focused ultrasonic fields generated by piezocomposite transducers // *Ferroelectrics.* 2019. **539**, N 1. P. 118.
7. *Наседкин А.В., Наседкина А.А., Толмачева Я.В.* Компьютерная гомогенизация пористых пьезокерамик различной сегнетожесткости при случайной структуре пористости и неоднородности поля поляризации // *Вычислит. мех. спл. сред.* 2023. **16**, № 4. С. 476.

УДК: 534.2.

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39688

**Измерение диаграммы направленности низкочастотных излучателей
воздушного ультразвука, предназначенных для использования в качестве
элементов антенных решёток**

Е.А. Петров^{1,a}, А.В. Лапина^{2,b}, С.А. Цысарь^{2,c}, Н. Гогмачадзе^{1,d}, О.А. Сапожников^{1,e}

¹ *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет,
кафедра акустики. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2*

² *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет,
кафедра нанофотоники. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2*

E-mail: ^aepetmail03@gmail.com, ^blapinaav@my.msu.ru, ^csergey@acs366.phys.msu.ru,

^dgogmachadzen-@my.msu.ru, ^eoleg@acs366.phys.msu.ru

Аннотация: В работе исследованы диаграммы направленности одиночных низкочастотных ультразвуковых пьезопреобразователей, предназначенных для создания мощных многоэлементных антенных решёток в воздухе. Разработана специальная измерительная установка, включающая в себя систему точного углового позиционирования UMS-3 (Precision Acoustics, Великобритания), обеспечивающую проведение измерений ультразвукового сигнала при изменении угла ориентации датчика в диапазоне от -90° до $+90^\circ$, с шагом 1° . Измерения проводились в диапазоне частот 25 – 40 кГц. В работе произведено сравнение результатов эксперимента с теоретическим приближением диаграммы направленности круглого поршня, описываемого функцией Бесселя. Показано соответствие экспериментальных данных и аналитической зависимости. Полученные результаты позволяют корректно проектировать мощные многоэлементные антенные решётки для различных задач воздушной акустики.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ №25-12-00141.

Ключевые слова: диаграмма направленности, низкочастотный ультразвук, антенные решетки.

Measurement of the directivity diagram of low-frequency aerial ultrasound transducers intended for use as elements of antenna arrays

Е.А. Petrov^{1,a}, А.V. Lapina^{2,b}, S.A. Tsysar^{2,c}, N. Gogmachadze^{1,d}, O.A. Sapozhnikov^{1,e}

¹ *Department of Acoustics, Faculty of Physics, M.V. Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia*

² *Department of Nanophotonics, Faculty of Physics, M.V. Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia*

*E-mail: ^aepetmail03@gmail.com, ^blapinaav@my.msu.ru, ^csergey@acs366.phys.msu.ru,
^dgogmachadzen-@my.msu.ru, ^eoleg@acs366.phys.msu.ru*

Abstract: The directivity diagrams of single low-frequency ultrasonic piezoelectric transducers designed to create powerful multi-element antenna arrays in the air are studied. A special measuring system has been developed that includes the UMS-3 precision angular positioning system (Precision Acoustics, Great Britain), which provides measurements of the ultrasonic signal when the sensor orientation angle changes in the range from -90° to $+90^\circ$, in increments of 1° . The measurements were carried out in the frequency range of 25 – 40 kHz. The experimental results are compared with a theoretical approximation of the directivity diagram of a circular piston described by the Bessel function. The correspondence of experimental data and analytical dependence is shown. The results obtained make it possible to correctly design powerful multi-element antenna arrays for various aerial acoustics tasks.

This work was supported by the Russian Science Foundation (project no. 25-12-00141).

Keywords: directivity diagram, low-frequency ultrasound, antenna arrays.

УДК: 534.18

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39689

**Обзор применения акустических методов
интенсификации добычи нефти в сложных коллекторах**

Б.Б. Дамдинов^{1,2,a}, В.А. Пригожих^{1,b}

¹*Сибирский федеральный университет, 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79*

²*Институт физического материаловедения СО РАН, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 8*

E-mail: ^abdamdinov@sfu-kras.ru, ^bvprigozhikh@sfu-kras.ru

В обзоре рассмотрены акустические методы воздействия на капиллярно-защемленные углеводороды в качестве возможной альтернативы технике гидроразрыва пласта. Отмечена их привлекательность – низкие энергозатраты и высокая экологичность. Показано, что широкому внедрению акустических технологий препятствует дефицит систематических фундаментальных разработок математических моделей, опробованных на фактических данных.

Ключевые слова: акустические методы, флюид, снижение вязкости, интенсификация добычи, уменьшение капиллярного давления.

PACS 43.35.Bf

**An overview of the application of acoustic methods
for intensifying oil production in complex reservoirs**

B.B. Damdinov^{1,2,a}, V.A. Prigozhikh^{1,b}

¹*Siberian Federal University, 660041, Krasnoyarsk, Pr. Svobodny 79*

²*Institute of Physical Materials Science SB RAS, 670047, Ulan-Ude, Sakhyanova St., 8*

E-mail: ^abdamdinov@sfu-kras.ru, ^bvprigozhikh@sfu-kras.ru

The review considers acoustic methods of influencing capillary-trapped hydrocarbons as a possible alternative to hydraulic fracturing techniques. Their attractiveness is noted – low energy consumption and high environmental friendliness. It is shown that the widespread adoption of acoustic technologies is hindered by the lack of systematic fundamental developments of mathematical models tested on evidence.

Keywords: acoustic methods, fluid, viscosity reduction, mining intensification, capillary pressure reduction

Введение

Мировой нефтегазовый сектор сейчас фактически полностью переходит к работе с трудноизвлекаемыми запасами. Это глобальный тренд. Сегодня их доля в мировом балансе уже превысила 60%. Если рассматривать ситуацию в Красноярском крае, например, на месторождениях Ванкорского кластера или Юрубчено-Тохомской зоны, то здесь многие объекты уже зашли в позднюю стадию разработки. Проблема в том, что там формируются обширные зоны капиллярно-защемленной нефти, а в структуре остаточных запасов её доля достигает 70–80%. Сейчас в отрасли доминирует многозабойный гидроразрыв пласта (ГРП). Метод эффективен, порой даже революционен, но у него есть свои пределы: высокая стоимость, риски для экологии (особенно в Арктике) и малый радиус воздействия. ГРП просто не позволяет «достать» флюид в тех блоках пласта, которые удалены от основных трещин. Здесь возникает потребность в гибридных решениях. Нужны технологии, способные воздействовать на нефть на микроуровне. Акустические методы в этом плане – отличная альтернатива. Причина простая: они потребляют минимум энергии и почти не создают нагрузку на окружающую среду.

Современное состояние исследований акустических методов нефтедобычи

Данные пилотных испытаний и экспериментов в лабораториях говорят о том, что акустические колебания действительно работают. Они снижают капиллярное давление, разжижают вязкую нефть и разрушают отложения парафинов. По сути, мы наблюдаем изменение межфазного натяжения, когда упругие волны ремобилизуют защемленные углеводороды, заставляя их снова двигаться. В основе понимания процессов лежит классическая теория Биота [1]. Позже её развили для двухфазных систем [2, 3], и это стало фундаментом для описания того, как волна проходит через насыщенную пористую среду. У сегодняшних ученых широкий спектр задач в области ультразвуковых технологий увеличение нефтедобычи. Это лабораторные эксперименты на микрофлюидных устройствах, изучение механизмов физического воздействия акустики (от кавитации до изменения реологии и сдвиговых напряжений), гибридные методы увеличения нефтедобычи и акустики и, конечно, проверка гипотез на образцах керна и в поле. В России у этого направления устойчивая научная традиция. Теорию во многом сформировали в ИПМех РАН. Именно там создали модели, которые объясняют, как упругая волна разрушает капиллярные ловушки. Прикладную сторону вопроса, куда входят виброакустические методы стимуляции призабойной зоны, развивают в Губкинском университете. Натурными испытаниями акустических излучателей в скважинах Западной Сибири сейчас плотно занимается Тюменский научный центр СО РАН. В работах [4, 5] показано, что ультразвук влияет на пласт

комплексно. Он снижает вязкость нефти, разрушает асфальтено-смолистые структуры и очищает поровое пространство. В результате повышается проницаемость и эффективность вытеснения, и это подтверждено экспериментально. Интересный способ описан в работе [6]. Ученые выполняли акустико-химическую обработку призабойной зоны. Этим способом они решали сразу две задачи: модифицировали свойства флюида и структуру пласта, плюс ограничивали водоприток. Более поздние публикации сместили акцент на методы акустической стимуляции и их математическое моделирование. Расчеты исследователей показали, что учет параметров насыщения и волновых эффектов позволяет прогнозировать изменение фильтрационных характеристик пласта с гораздо большей точностью. Иной подход предложили авторы работы [7]. Они создали и успешно испытали в реальных условиях скважинный излучатель на базе резонатора Гельмгольца и получили уже не лабораторный прототип, а готовое техническое решение.

Научный коллектив Сибирского федерального университета сейчас работает над несколькими задачами одновременно. Помимо создания рецептур эмульсий и микрофлюидных опытов (грант РФФИ № 23-79-30022, госзадание № FSRZ 2020–0012), мы изучаем акустику дисперсных систем. Важная часть работы – это прямая визуализация распространения звуковых волн в суспензиях и эмульсиях (рис. 1).

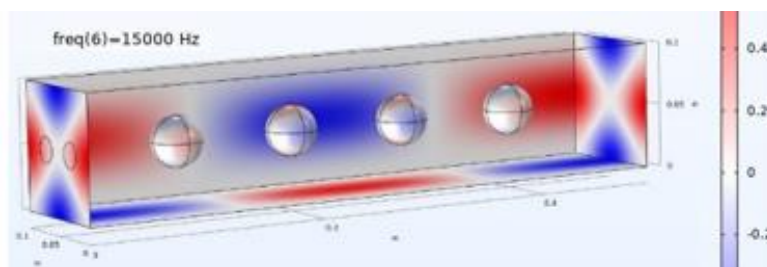


Рис.1. Результат численного моделирования, видны перепады акустического давления на стенках сосуда и на поверхностях пузырьков воздуха.

Заключение

Выполненных работ и публикаций по этой теме очень много, в нашем обзоре, конечно, только малая часть. Но некоторые выводы мы сделать можем. Имеется действительно множество исследований и разработок. Российская научная школа здесь имеет хороший баланс теоретической базы и прикладной составляющей. Но чего не хватает – это фундаментальных математических моделей, которые бы описывали, как акустика воздействует на капиллярно-защемлённые углеводороды. Такие модели должны быть верифицированы на данных микрофлюидных экспериментов.

При поддержке Сибирского федерального университета (госзадание № FSRZ 2020–0012).

Список литературы

1. Biot, M.A. (1956) Theory Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Saturated Porous Solid I. Low-Frequency Range. The Journal of the Acoustical Society of America, 28, 168-178. <https://doi.org/10.1121/1.1908239>.
2. Lo W.-C., Sposito G., Majer E. Wave propagation through elastic porous media containing two immiscible fluids // Water Resources Research. 2005. Vol. 41, No. 2. Art. no. W02025. <https://doi.org/10.1029/2004WR003162>.
3. Xiong F., Liu J., Guo Z., Liu J. Wave Equations of Porous Media Saturated With Two Immiscible Fluids Based on the Volume Averaging Method // Frontiers in Earth Science. 2021. Vol. 9. Art. no. 618909. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.618909>.
4. Гуляев Д. Н., Лазуткина Н. Е., Жуйков Ю. Ф., Ильинский А. В., Рухман А. А., Шиканов А. Е., Шиканов Е. А. Исследование ультразвукового воздействия на нефтяной пласт // Нефтяное хозяйство. 2018. № 8. С. 60–63. DOI: 10.24887/0028-2448-2018-8-60-63.
5. Алфаяд А. Г. Х., Валиев Д. З., Кемалов Р. А., Риффель Д. В., Брызгалов Н. И. Применение ультразвукового воздействия для повышения нефтеотдачи // Технологии нефти и газа. 2023. № 2 (145). С. 36–43.
6. Кондратюк, А. А. Обоснование акустико-химической обработки призабойной зоны пласта для интенсификации добычи нефти и ограничения водопритока к скважине / А. А. Кондратюк, К. И. Бабицкая // Инженер-нефтяник. – 2024. – № S5. – С. 83-89. – EDN DGIJL.
7. Марфин, Е. А. Акустическая стимуляция добычи трудноизвлекаемых запасов нефти / Е. А. Марфин // Трудноизвлекаемые запасы нефти: Материалы ежегодной международной конференции, Альметьевск, 24 сентября 2025 года. – Альметьевск: Альметьевский государственный нефтяной институт, 2025. – С. 335-338.

УДК 534.2

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39690

Аномальная упругая и электромеханическая дисперсия в пористой пьезокерамике

Н.А. Швецова¹, М.А. Луговая¹, И.А. Швецов¹, Н.А. Колпачева², А.Н. Рыбьянец^{1,*}

¹*Южный федеральный университет, Научно-исследовательский институт физики,
344090, Ростов-на-Дону, Россия*

²*Донской государственный технический университет, 344002, Ростов-на-Дону, Россия*

*E-mail: *arybyanets@gmail.com*

Аннотация: В последние годы требования к функциональным характеристикам ультразвуковых и пьезоэлектрических преобразователей, а также пьезоэлектрических материалов существенно изменились в связи с расширением областей их применения, включая медицинскую диагностику и терапию, сбор рассеянной энергии, подводную акустику, неразрушающий контроль и др. Одним из перспективных материалов для ультразвуковых преобразователей является пористая пьезокерамика на основе различных пьезокерамических составов. В настоящей работе проведено сравнительное исследование комплексных упругих и электромеханических характеристик и их частотных зависимостей пористых и плотных пьезокерамических образцов идентичного химического состава $Pb_{0.95}Sr_{0.05}Zr_{0.53}Ti_{0.47}O_3$ с добавкой 1 wt.% Nb_2O_5 . Анализ частотных зависимостей комплексных характеристик пористой пьезокерамики выявил зоны аномальной упругой и электромеханической дисперсии. Показано, что причиной аномальной дисперсии упругих и электромеханических характеристик пористой пьезокерамики является изменение соотношения между характерным масштабом пространственной неоднородности кораллоподобного пьезокерамического каркаса и длиной волны резонансных колебаний пьезоэлемента. Полученные результаты позволили определить частотные диапазоны применения пористых пьезокерамических элементов, обеспечивающие высокую электромеханическую эффективность ультразвуковых преобразователей.

Ключевые слова: пористая пьезокерамика, комплексные характеристики, упругая и электромеханическая дисперсия, пьезокерамический каркас, резонансные колебания.

Anomalous elastic and electromechanical dispersion in porous piezoceramics

N.A. Shvetsova¹, M.A. Lugovaya¹, I.A. Shvetsov¹, N.A. Kolpacheva², A.N. Rybyanets^{1,*}

¹Research Institute of Physics, Southern Federal University, Rostov-on-Don, 344090, Russia

²Physics Department, Don State Technical University, Rostov-on-Don, 344002, Russia

*E-mail: *arybyanets@gmail.com*

Abstract: In recent years, the requirements for the functional characteristics of ultrasonic and piezoelectric transducers, as well as piezoelectric materials, have changed significantly due to the expansion of their application areas, including medical diagnosis and therapy, energy harvesting, underwater acoustics, non-destructive testing, etc. One of the promising materials for ultrasonic transducers is porous piezoceramics based on various piezoceramic compositions. This paper presents a comparative study of the complex elastic and electromechanical characteristics and their frequency dependencies for porous and dense piezoceramic samples of identical chemical composition $\text{Pb}_{0.95}\text{Sr}_{0.05}\text{Zr}_{0.53}\text{Ti}_{0.47}\text{O}_3$ doped with 1 wt.% Nb_2O_5 . Analysis of the frequency dependencies of the complex characteristics of porous piezoceramics revealed regions of anomalous elastic and electromechanical dispersion. It is shown that the cause of the anomalous dispersion of the elastic and electromechanical characteristics of porous piezoceramics is the change in the ratio of the characteristic scale of spatial inhomogeneity of the coral-like piezoceramic framework to the wavelength of resonant vibrations of the piezoelectric element. The obtained results enable the determination of frequency ranges for the application of porous piezoceramic elements that ensure high electromechanical efficiency of ultrasonic transducers.

Keywords: porous piezoceramics, complex characteristics, elastic and electromechanical dispersion, piezoceramic frame, resonant vibrations.

PACS: 43.35.Cg; 43.35.Yb; 62.20.Dc; 77.84.Dy

Введение

В последние годы требования к инновационным ультразвуковым и пьезоэлектрическим датчикам и преобразователям существенно изменились в связи с расширением областей их применения, включая сбор рассеянной энергии, медицинскую диагностику и терапию, подводную акустику, неразрушающий контроль и другие [1–3]. Эти современные задачи предъявляют повышенные требования к функциональным характеристикам, что стимулирует

активную разработку новых пьезоэлектрических материалов и технологий их изготовления [4, 5].

Особое внимание в последнее время уделяется пористой пьезокерамике на основе различных составов – относительно новому и перспективному классу пьезоэлектрических материалов. Благодаря своим уникальным свойствам такие материалы находят применение в ультразвуковых преобразователях и сенсорах для медицинской диагностики и терапии, неразрушающего контроля, подводной акустики и других высокотехнологичных областях [6, 7]. В частности, недавно были предложены сегнетожесткие пористые пьезокерамики в качестве перспективного материала для преобразователей в системах высокоинтенсивного фокусированного ультразвука (HIFU), что открывает новые возможности для развития данной технологии [8, 9].

Вместе с тем дисперсионные явления, а также диэлектрические, упругие и электромеханические потери существенно ограничивают применимость пьезоматериалов в высокочастотных ультразвуковых, пьезоэлектрических и акустоэлектронных устройствах [10]. Различные аспекты, связанные с упругими потерями и дисперсией в пористых пьезокерамиках и пьезокомпозитах, активно исследуются в современной литературе [11]. Однако, несмотря на достигнутые успехи, ряд вопросов остается недостаточно изученным, в частности, не исследованы частотные зависимости комплексных упругих и электромеханических параметров, а также неясны микроструктурные и физические механизмы, ответственные за потери и дисперсию в пористых пьезокерамиках.

В работах [9, 12, 13] были опубликованы предварительные экспериментальные данные, касающиеся влияния микроструктурных особенностей и относительной пористости на комплексные параметры плотных и пористых пьезокерамик на основе твердых растворов системы цирконата-титаната свинца (ЦТС).

Целью настоящей работы являлось установление микроструктурных и физических механизмов, ответственных за упругие и электромеханические потери, а также дисперсионные эффекты в плотной и пористой пьезокерамике системы ЦТС.

1 Объекты и методы исследования

Для сравнительного исследования комплексных электромеханических параметров и их частотных зависимостей были использованы образцы пористой пьезокерамики на основе твердых растворов системы ЦТС состава $Pb_{0.95}Sr_{0.05}Zr_{0.53}Ti_{0.47}O_3$ с добавкой 1 мас.% Nb_2O_5 с относительной пористостью в диапазоне от 5% (остаточная пористость плотной пьезокерамики, полученной обычным спеканием) до 40% (пористость, полученная методом выжигания порообразователя). Образцы представляли собой тонкие диски толщиной

1.2 – 1.9 мм и диаметром 26.3 мм, полученные методом твердофазного синтеза с последующим спеканием, а также с применением модифицированной технологии выжигания порообразующих добавок [6, 9].

Наборы комплексных упругих и электромеханических параметров исследуемых пьезокерамик с различной относительной пористостью были получены посредством анализа пьезорезонансных спектров, измеренных для толщинной и радиальной модах колебаний стандартных дисковых образцов с помощью прецизионного анализатора импеданса Agilent 4294A и специализированного программного обеспечения Piezoelectric Resonance Analysis Program (PRAP) [14].

Частотные зависимости комплексных параметров исследуемых пьезокерамик были получены с использованием разработанного ранее метода, основанного на анализе пьезорезонансных спектров, измеренных для основного резонанса и высших гармоник толщинных колебаний экспериментальных образцов, измеренных в диапазоне частот от 100 кГц до 25 МГц [9, 11–13].

2 Экспериментальные результаты и обсуждение

Для уточнения механизмов упругих и электромеханических потерь, а также оценки потенциала применения пористой и плотной пьезокерамики в высокочастотных ультразвуковых устройствах были исследованы зависимости действительной и мнимой частей комплексного упругого модуля C_{33}^D и коэффициента электромеханической связи k_t от частоты.

Частотные зависимости действительной и мнимой частей комплексного коэффициента связи k_t и модуля упругости C_{33}^D для исследованных пьезокерамик с различной степенью пористости, полученные с использованием PRAP-анализа пьезорезонансных спектров, представлены на рисунках 1 и 2.

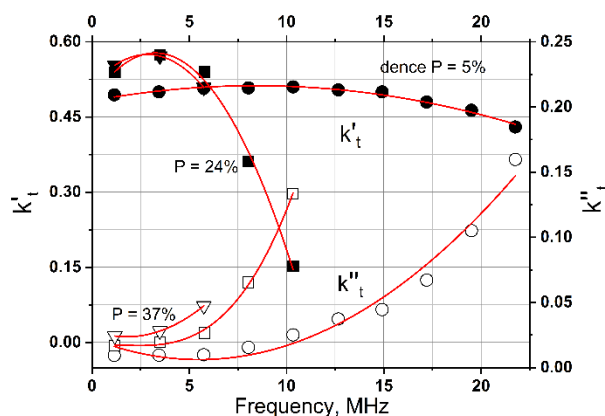


Рис. 1. Зависимости от частоты действительной (k'_t) и мнимой (k''_t) частей комплексного коэффициента электромеханической связи k_t плотной (сплошные и открытые круги), а также пористой пьезокерамики с пористостью 24% (сплошные и открытые квадраты) и 37% (сплошные и открытые треугольники).

Из рисунка 1 видно, что действительная часть коэффициента электромеханической связи k'_t плотной пьезокерамики демонстрирует практически линейную частотную зависимость с более выраженным спадом при частотах выше 12 МГц. В то же время мнимая часть k''_t коэффициента электромеханической связи плотной пьезокерамики возрастает квадратично с увеличением частоты (рис. 1). Такой квадратичный рост мнимой части k''_t в основном обусловлен внутренним трением в пьезокерамике, поскольку потери на рэлеевское рассеяние [11] пренебрежимо малы благодаря мелкозернистой структуре материала.

Из рис. 1 также следует, что действительная часть коэффициента электромеханической связи k'_t пористой пьезокерамики проявляет выраженную нелинейную частотную зависимость. В частности, k'_t быстро возрастает в диапазоне до 4 МГц, после чего резко уменьшается с дальнейшим ростом частоты. Как было показано ранее [6], коэффициент электромеханической связи k'_t увеличивается с ростом пористости, приближаясь к значению k'_{33} , характерному для пьезокерамических стержней. Такое поведение обусловлено частичным ослаблением поперечного механического зажатия пьезокерамического каркаса пористой пьезокерамике. Таким образом, быстрый начальный рост k'_t для пористой пьезокерамики, наблюдаемый на рис. 1, обусловлен изменением соотношения между характерным масштабом пространственной неоднородности керамического каркаса и длиной волны резонансных колебаний пьезоэлемента при увеличении частоты. В результате этого вклад квазистержневых компонентов в значение k'_t усиливается, что приводит к его постепенному приближению к величине k'_{33} по мере роста частоты.

Мнимая часть коэффициента электромеханической связи k''_t растет с частотой квадратично и значительно быстрее, чем для плотной пьезокерамики. Поскольку потери, связанные с внутренним трением и рэлеевским рассеянием на зернах, одинаковы для плотных и пористых пьезокерамик с одинаковым химическим составом и размером зерен, более интенсивный рост k''_t в пористых образцах, вероятно, связан со стохастическим рассеянием резонансных колебаний пьезоэлемента на рассеивающих объектах при условии $10D > \lambda > 4D$, где λ – длина волны, а D – характерный размер рассеивающих объектов [11]. В пористой пьезокерамике такими объектами могут выступать группы пор и мезоструктурные элементы коралловидного каркаса ($D > 30$ мкм).

Таким образом, резкое, практически квадратичное возрастание электромеханических потерь на частотах выше 5 МГц, обусловленное стохастическим рассеянием упругих колебаний на порах и мезоструктурных элементах пористого каркаса, может служить основной причиной последующего быстрого снижения действительной части коэффициента электромеханической связи k'_t с дальнейшим ростом частоты (рис. 1).

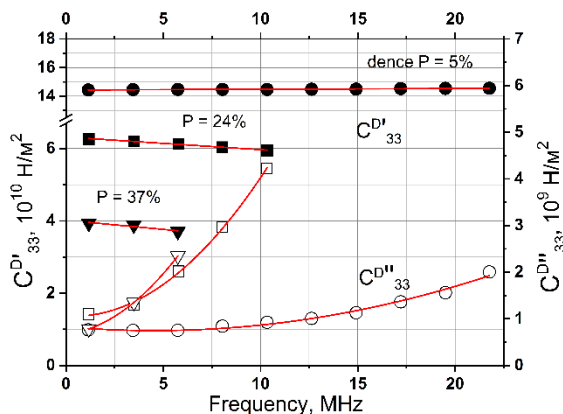


Рис. 2. Зависимости от частоты действительной ($C_{33}^{D'}$) и мнимой ($C_{33}^{D''}$) частей комплексного модуля упругости C_{33}^D для плотной (сплошные и открытые круги), а также пористой пьезокерамики с пористостью 24% (сплошные и открытые квадраты) и 37% (сплошные и открытые треугольники).

Анализ рисунка 2 показывает существенное различие в частотных зависимостях действительной $C_{33}^{D'}$ и мнимой $C_{33}^{D''}$ частей комплексного модуля упругости для плотной и пористой пьезокерамики. В плотной пьезокерамике наблюдается нормальная упругая дисперсия: значение действительной части упругого модуля $C_{33}^{D'}$, а соответственно и скорости звука $V_t^D = \sqrt{C_{33}^{D'}/\rho}$, практически линейно увеличиваются с ростом частоты.

Поведение мнимой части упругого модуля $C_{33}^{D''}$ для плотной пьезокерамики связано с тем, что затухание резонансных колебаний возрастает с частотой практически по квадратичному закону. Данное затухание в основном обусловлено внутренним трением, то есть диссипативными потерями, присущими самому пьезокерамическому материалу. Потери, обусловленные рэлеевским рассеянием упругих волн на зернах плотной пьезокерамики, пренебрежимо малы вследствие мелкозернистой структуры исследованных образцов и относительно низкому диапазону измеряемых частот.

В отличие от плотной керамики, действительная часть модуля упругости $C_{33}^{D'}$ пористой пьезокерамики монотонно убывает с увеличением частоты, демонстрируя anomalous поведение. При этом чем выше относительная пористость образца, тем более выраженным оказывается снижение действительной части $C_{33}^{D'}$. В свою очередь, мнимая часть модуля $C_{33}^{D''}$ возрастает квадратично и значительно быстрее по сравнению с плотным материалом (рис. 2). Такое поведение, как уже указывалось, объясняется стохастическим рассеянием резонансных колебаний на порах и других неоднородностях мезоструктуры пористого каркаса.

Принимая во внимание микроструктурные особенности пористой пьезокерамики, в частности наличие трехмерного каркаса кораллоподобной формы с развитой сетью квазистержневых элементов, anomalous уменьшение модуля упругости $C_{33}^{D'}$ и соответственно скорости звука $V_t^D = \sqrt{C_{33}^{D'}/\rho}$ с ростом частоты можно объяснить увеличением вклада

квазистержневых компонентов в упругий отклик, приводящего к переходу V_t^D (скорость, отвечающая толщинным колебаниям пьезокерамического диска) $\rightarrow V_{33}^D$ (скорость, характерная для продольных колебаний длинного пьезокерамического стержня) в области высоких частот.

С ростом частоты длина волны уменьшается, что приводит к усилению влияния мезоструктурных квазистержневых компонентов (агрегатов кристаллитов, преимущественно ориентированных вдоль направления остаточной поляризации пористого пьезоэлемента) на его комплексные электромеханические характеристики [6, 12, 13].

Заключение

Исследования комплексных параметров и их частотных зависимостей пористых и плотных образцов, изготовленных из пьезокерамики системы ЦТС одинакового химического состава $Pb_{0.95}Sr_{0.05}Zr_{0.53}Ti_{0.47}O_3$ с добавкой 1 wt.% Nb_2O_5 , показало, что определяющую роль в формировании упругих и электромеханических свойств пористого материала играют мезоструктурные квазистержневые компоненты пьезокерамического каркаса. Эти компоненты представляют собой агрегаты кристаллитов, ориентированных преимущественно вдоль направления остаточной поляризации пьезокерамического образца.

Анализ частотных зависимостей комплексных характеристик пористой пьезокерамики выявил зоны аномальной упругой и электромеханической дисперсии. Показано, что причиной аномальной дисперсии упругих и электромеханических характеристик пористой пьезокерамики является изменение соотношения между характерным масштабом пространственной неоднородности коралловидного пьезокерамического каркаса и длиной волны резонансных колебаний пьезоэлемента. Полученные результаты позволяют определить частотные диапазоны эксплуатации пьезокерамических элементов в высокочастотных ультразвуковых устройствах, обеспечивающие высокую электромеханическую эффективность.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности. Проект № FENW-2026-0027).

Список литературы

1. *Horchidan N., Ciomaga C.E., Frunza R.C., Capiani C., Galassi C., Mitoseriu L.* A comparative study of hard/soft PZT-based ceramic composites // *Ceram. Int.* 2016. **42**. P. 9125.
2. *Safari A., Akdoğan E.K., Leber J.D.* Ferroelectric ceramics and composites for piezoelectric transducer applications // *Jpn. J. Appl. Phys.* 2022. **61**. SN0801.

3. *Turner B., Cranston D.* A Review of High-Intensity Focused Ultrasound // Int. J. Transl. Med. 2024. **4**. P. 197.
4. *Zhang B., Yang Y., Fan X.* Processing, microstructure, and properties of porous ceramic composites with directional channels // J. Mater. Sci. Technol. 2024. **168**. P. 1.
5. *Shrivastava Sh., Rajak D.K., Joshi T., Singh D.K., Mondal D.P.* Ceramic Matrix Composites: Classifications, Manufacturing, Properties, and Applications // Ceramics. 2024. **7**. P. 652.
6. *Rybyanets A.N.* Porous piezoceramics: theory, technology, and properties // IEEE Trans. UFFC. 2011. **58**. P. 1492.
7. *Ma W., Zhou X., Gao H., Wang C., Tan H., Samart C., Wang J., An T.N., Yan C., Hu Y., Wang J., Zhang H.* Structure-reinforced periodic porous piezoceramics for ultrahigh electromechanical response manufactured by vat photopolymerization // Additive Manufacturing. 2024. **93**. P. 104446.
8. *Rybyanets A.N.* New methods and transducer designs for ultrasonic diagnostic and therapy // In "Advanced Materials: Manufacturing, Physics, Mechanics and Applications". Springer Proceedings in Physics, New York, 2016. P. 603.
9. *Швецова Н.А., Швецов И.А., Петрова Е.И., Макарьев Д.И., Мараховский М.А., Рыбьянец А.Н.* Комплексные электромеханические параметры и особенности микроструктуры пористой пьезокерамики системы ЦТС // Изв. РАН. Сер. Физ. 2024. **88**, № 5. С. 705.
10. *Park Y., Choi M., Uchino K.* Loss Determination Techniques for Piezoelectrics: A Review // Actuators. 2023. **12**. P. 213.
11. *Lugovaya M.A., Shvetsov I.A., Shvetsova N.A., Nasedkin A.V., Rybyanets A.N.* Elastic Losses and Dispersion in Porous Piesoceramics // Ferroelectrics. 2021. **571**, N 1. P. 263.
12. *Shvetsov I.A., Lugovaya M.A., Konstantinova M.G., Abramov P.A., Petrova E.I., Shvetsova N.A., Rybyanets A.N.* Dispersion characteristics of complex electromechanical parameters of porous piezoceramics. J. Adv. Diel. **12**(2), 2160004 (5 pages) (2022).
13. *Rybyanets A.N., Shvetsov I.A., Shvetsova N.A., Marakhovsky M.A., Kolpacheva N.A.* Microstructure, complex electromechanical parameters and dispersion characteristics of ferroelectrically "hard" piezoceramics // J. Adv. Diel. 2025. **15**, N 3. P. 2540001.
14. PRAP (Piezoelectric Resonance Analysis Program). (TASI Technical Software Inc., 2000-2018), www.tasitechnical.com. Дата обращения 01.04.2026.

УДК 534.7; 534.292

DOI:10.34756/GEOS.2026.17.39691

Экспериментальное исследование акустических полей фокусирующих ультразвуковых преобразователей

Луговая М.А., Швецов И.А., Петрова Е.И., Константинова М.Г., Рыбьянец А.Н.*

*Южный федеральный университет, Научно-исследовательский институт физики,
344090, Ростов-на-Дону, Россия
E-mail: *arybyanets@gmail.com*

Аннотация: Достижения в области физической акустики, методов визуализации и обработки изображений, пьезоэлектрических материалов и конструкций ультразвуковых преобразователей привели к появлению новых методов и оборудования для ультразвуковой диагностики, терапии и эстетической медицины. Высокоинтенсивный фокусированный ультразвук (HIFU) продолжает оставаться привлекательным вариантом для минимально инвазивных терапевтических процедур. В настоящей работе приведены результаты исследования влияния различных дефектов и неоднородностей формы и размеров фокусирующих пьезокерамических элементов, а также элементов конструкции ультразвуковых HIFU преобразователей на особенности формируемых ими акустических полей. Измерение и картирование акустических полей HIFU преобразователей производились в сканирующей ультразвуковой ванне UMS3 с использованием калиброванных игольчатых PVDF гидрофонных зондов, встроенного широкополосного усилителя и преобразователем постоянного тока. Экспериментальные результаты сопоставлены с результатами конечно-элементного моделирования профилей собственных колебаний пористых пьезоэлементов с использованием программного пакета ANSYS. Показано, что любые неоднородности формы и размеров фокусирующего пьезокерамического элемента, флуктуации рабочей частоты, а также конструктивные особенности преобразователей существенно влияют на параметры акустического поля. Эксперименты *ex vivo* на биологических тканях и акустических фантомах подтвердили результаты измерений и расчетов.

Ключевые слова: фокусирующий пьезоэлемент, HIFU преобразователь, акустическое поле, ультразвуковая ванна, гидрофон.

Experimental study of acoustic fields of focusing ultrasonic transducers

Lugovaya M.A., Shvetsov I.A., Petrova E.I., Konstantinova M.G., Rybyanets A.N.*

*Research Institute of Physics, Southern Federal University, Rostov-on-Don, 344090, Russia
E-mail: *arybyanets@gmail.com*

Abstract: Advances in physical acoustics, imaging and image processing methods, piezoelectric

materials, and ultrasonic transducer designs have led to the emergence of new techniques and equipment for ultrasonic diagnostics, therapy, and aesthetic medicine. High-intensity focused ultrasound (HIFU) continues to be an attractive option for minimally invasive therapeutic procedures. This paper presents the results of a study on the influence of various defects and inhomogeneities in the shape and dimensions of focusing piezoceramic elements, as well as structural components of ultrasonic HIFU transducers, on the characteristics of the acoustic fields they generate. Measurement and mapping of the acoustic fields of HIFU transducers were performed in a scanning ultrasonic bath UMS3 using calibrated needle PVDF hydrophone probes, a built-in broadband amplifier, and a DC converter. The experimental results were compared with finite-element modeling results of the eigenmode profiles of porous piezoelectric elements using the ANSYS software package. It is shown that any inhomogeneities in the shape and dimensions of the focusing piezoceramic element, fluctuations in the operating frequency, as well as design features of the transducers significantly affect the parameters of the acoustic field. Ex vivo experiments on biological tissues and acoustic phantoms confirmed the measurement and calculation results.

Keywords: focusing piezoelectric element, HIFU transducer, acoustic field, ultrasonic bath, hydrophone.

PACS: 87.19.Xx; 87.80.-y; 43.35.Yb

Введение

Достижения в области физической акустики, методов визуализации и обработки изображений, пьезоэлектрических материалов и конструкций ультразвуковых преобразователей [1, 2] привели к появлению новых методов и оборудования для ультразвуковой диагностики, терапии и эстетической медицины, а также к появлению новых областей применения.

Высокоинтенсивный фокусированный ультразвук (HIFU) остается привлекательным вариантом для минимально инвазивных терапевтических процедур. Абляционная терапия может быть использована для лечения ряда доброкачественных и злокачественных заболеваний с небольшим количеством побочных эффектов. За последние 15 лет был проведен огромный объем лабораторных работ и клинических испытаний, направленных на разработку устройств, которые могут обеспечить лечение с безопасными и эффективными результатами [1–4].

Преобразователи для HIFU терапии в последнее время обычно изготавливаются из пьезокерамики системы цирконата-титаната свинца (ЦТС) с низкими потерями или из пьезокомпозитов со связностью 1-3 и пористых пьезокерамик [5].

В настоящее время разработаны и используются различные методы фокусировки ультразвуковых волн [5, 6]. Самым простым и дешевым методом является самофокусировка, например, сферически вогнутым ультразвуковым преобразователем. Недавно для HIFU терапии было предложено использовать ультразвуковые фокусирующие преобразователи, представляющие собой фазированные решетки.

Поиск новых методов эффективной фокусировки ультразвука [5, 7, 8], которые позволяют управлять фокусом при сохранении низкого уровня боковых лепестков в области фокусировки продолжается и сейчас. Однако, несмотря на долгую историю исследований, экспериментальные данные о влиянии конструкции фокусирующих пьезокерамических преобразователей на особенности акустического поля на сегодняшний день не опубликованы.

В данной работе приведены результаты исследования влияния различных дефектов и неоднородностей формы и размеров фокусирующих композитных пьезокерамических элементов, а также элементов конструкции ультразвуковых HIFU преобразователей на особенности формируемых ими акустических полей.

1 Объекты и методы исследования

Объектом исследования являлись сферически фокусированные HIFU преобразователи, изготовленные из пористой пьезоэлектрической керамики. Сегнетожесткая пористая пьезокерамика на основе твердых растворов системы ЦТС (с относительной пористостью 18%) характеризуются высоким коэффициентом электромеханической связи и низким акустическим импедансом, обуславливающим акустическое согласование пьезоэлектрического преобразователя с иммерсионной жидкостью, полимерной мембраной и телом пациента [9, 10].

Пьезокерамические фокусирующие элементы характеризовались следующими размерами: внешний диаметр – 90 мм, радиус кривизны – 75 мм, диаметр центрального отверстия – 50 мм, толщина пьезоэлемента – 1.2 мм. Различные дефекты, такие как радиальная трещина или неравномерность толщины и т.п. были намеренно введены в конструкцию сферического фокусирующего пьезоэлемента, чтобы оценить их влияние на особенности акустического поля HIFU преобразователей. Пьезокерамический фокусирующий элемент устанавливался в герметичном дюралюминиевом корпусе, заполненном легким парафиновым маслом, снабженным контактами для подключения к генератору, капролоновым рупором и акустически прозрачной мембраной для выхода ультразвуковых волн, отверстием для установки визуализирующего датчика, отверстиями и заглушками для заполнения преобразователя маслом. С помощью иммерсионной жидкости и полимерной мембраны обеспечивался акустический контакт пористого пьезокерамического элемента с объектом, а

также его охлаждение. Ультразвук излучался через тонкую полиэтиленовую мембрану, покрывавшую излучающее фронтальное окно корпуса преобразователя.

Влияние конструкции и рабочих параметров HIFU преобразователей на особенности акустических полей было исследовано с помощью сканирующей системы UMS3 (Precision Acoustics Ltd.) [11]. Измерение и картирование акустических полей HIFU преобразователей производились в сканирующей ультразвуковой ванне UMS3 с использованием калиброванных игольчатых PVDF гидрофонных зондов, встроенного широкополосного усилителя и преобразователем постоянного тока. Ультразвуковая измерительная система управлялась с ПК с помощью программного обеспечения UMS. Цифровой осциллограф Agilent DSOX3024A и генератор Agilent 33521B использовались для возбуждения HIFU преобразователей и хранения данных.

2 Экспериментальные результаты и обсуждение

На рисунке 1 показаны результаты картирования распределения акустического давления в фокальной плоскости, создаваемого стандартным HIFU преобразователем с полиэтиленовой мембраной и резонансной частотой 1.6 МГц, возбуждаемым на разных частотах.

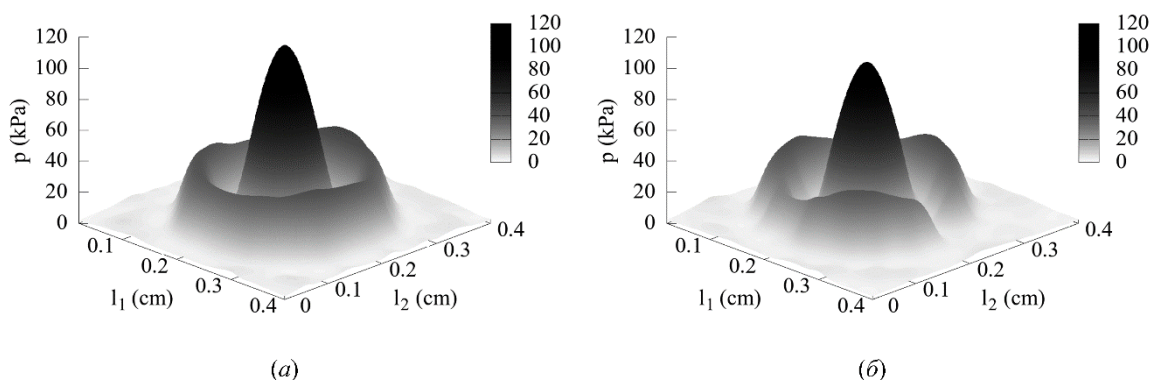


Рис. 1. Карты акустического давления в фокальной плоскости HIFU преобразователя на частотах возбуждения: 1.61 МГц (а) и 1.64 МГц (б)

Из рисунка 1 видно, что изменения частоты возбуждения HIFU преобразователя в интервале между резонансной и антирезонансной частотами сферического фокусирующего пьезоэлемента приводят к изменению формы и уровня боковых лепестков основного максимума. Эти изменения вызваны изменениями мод собственных колебаний сферического фокусирующего элемента (волны Лэмба) на разных частотах.

Это предположение подтверждается конечно-элементными (FEM) расчетами мод собственных колебаний сферического фокусирующего элемента на частотах электрического резонанса (рис. 2, а) и антирезонанса (рис. 2, б) [12, 13].

Абсолютное значение акустического давления, измеренного для HIFU преобразователей с

полипропиленовыми и полиэтиленовыми мембранами, незначительно отличается из-за акустического затухания в материале [15].

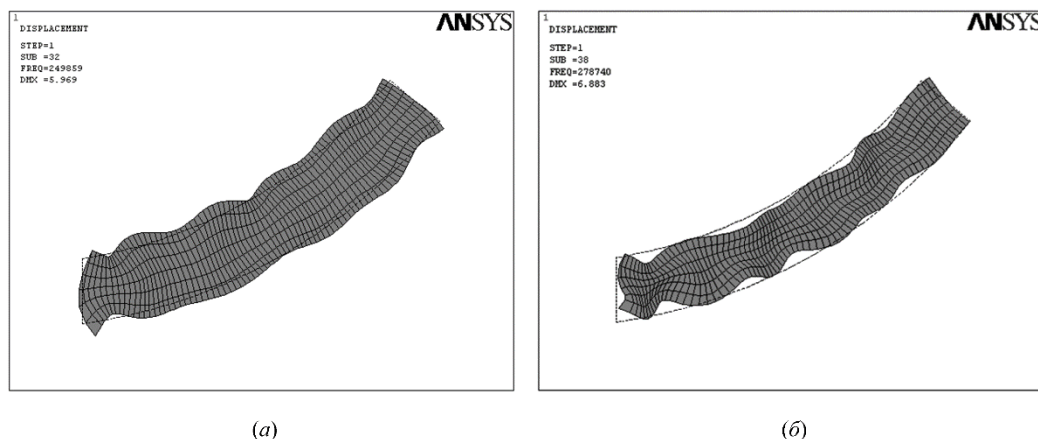


Рис. 2. Моды собственных колебаний сферического фокусирующего элемента, полученные в результате конечно-элементного (FEM) моделирования с использованием программного пакета ANSYS [14], на частотах электрического резонанса (а) и антирезонанса (б)

Заключение

В данной работе экспериментально исследованы акустические поля сферически фокусирующих HIFU преобразователей, изготовленные из пористой пьезоэлектрической керамики системы ЦТС. Полученные экспериментальные результаты сопоставлены с результатами (FEM) конечно-элементного моделирования профилей собственных колебаний пористых пьезоэлементов на резонансных и антирезонансных частотах.

Показано, что любые неоднородности формы и размеров фокусирующего пьезокерамического элемента, флуктуации рабочей частоты, а также конструктивные особенности преобразователей (корпус, мембрана и т.д.) существенно влияют на параметры акустического поля (давление, уровень боковых лепестков и т.д.). Эксперименты *ex vivo* на биологических тканях и акустических фантомах подтвердили результаты измерений и расчетов.

Отмечено, что пористые фокусирующие элементы по аналогии с композитами 1-3 связности обладают низким акустическим сопротивлением, высокой электромеханической активностью и низкими паразитными колебаниями, что обеспечивает низкий уровень боковых лепестков и высокую акустическую эффективность преобразователей.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-72-10128, <https://rscf.ru/project/24-72-10128/> в Южном федеральном университете.

Список литературы

1. *Rybyanets A.N.* Recent Advances in Medical Ultrasound // In "Piezoelectrics and Related Materials: Investigations and Applications". Nova Science Publishers Inc., NY, 2012. P. 143.

2. Хилл К., Бэмбер Дж., Хаар Г. Ультразвук в медицине. Физические основы применения. Пер.с англ. Изд. 2, перераб., доп. Физматлит. М., 2008. 544 с.
3. Turner B., Cranston D. A Review of High-Intensity Focused Ultrasound // Int. J. Transl. Med. 2024. **4**. P. 197.
4. Nartov F.A., Williams R.P., Khokhlova V.A. Electronic focus steering capabilities of a diagnostic-type linear ultrasound array designed for high power therapy and its visualization // Acoust. Phys. 2023. **70**, N 1. P. 165.
5. Швецова Н.А., Макарьев Д.И., Швецов И.А., Щербинин С.А., Рыбьянец А.Н. Новые методы и конструкции фокусирующих пьезопреобразователей для ультразвуковой диагностики и терапии // Известия РАН. Серия физическая. 2018. **82**, № 3. С. 293.
6. Rybyanets A.N., Naumenko A.A., Sapozhnikov O.A., Khokhlova V.A. New method and transducer designs for ultrasonic diagnostics and therapy // Physics procedia. 2015. **70**. P. 1152.
7. Хохлова В.А., Пономарев А.Е., Аверкью М.А., Крам Л.А. Нелинейные импульсные поля прямоугольных фокусированных источников диагностического ультразвука // Акустический журнал. 2006. **52**, № 4. С. 560.
8. Shvetsov I.A., Shvetsova N.A., Reznitchenko A.N., Rybyanets A.N. New Methods of Complex Therapeutic Treatment and Accelerated Regeneration of Superficial Tissues of a Patient // In "Advanced Materials - Techniques, Physics, Mechanics and Applications". Springer Proceedings in Physics. NY, 2017. P. 489.
9. Rybyanets A.N. Ceramic piezocomposites: modeling, technology, and characterization // In "Piezoceramic Materials and Devices". Nova Science Publishers Inc., NY, 2010. P. 113.
10. Shvetsov I.A., Petrova E.I., Lugovaya M.A., Shvetsova N.A., Scherbinin S.A., Rybyanets A.N. Ferroelectrically Hard Porous Ceramics: Fabrication, Properties and Ultrasonic Transducer Applications // In "Advanced Materials". Springer Proceedings in Physics, NY, 2018. P. 33.
11. Precision Acoustics Ltd. (www.acoustics.co.uk).
12. Rybyanets A.N., Nasedkin A.V., Naumenko A.A., Shvetsova N.A., Lugovaya M.A., Petrova E.I. Optimization of Finite Element Models for Porous Ceramic Piezoelements by Piezoelectric Resonance Analysis Method // In "Advanced Materials - Studies and Applications". Nova Science Publishers Inc., NY, 2015. P. 147.
13. Швецов И.А., Щербинин С.А., Астафьев П.А., Мойса М.О., Рыбьянец А.Н. Численное моделирование и оптимизация акустических полей и конструкций фокусирующих ультразвуковых преобразователей высокой интенсивности // Известия РАН. Серия физическая. 2018. **82**, № 3. С. 405.
14. ANSYS (<https://www.ansys.com/>)
15. Pardo L., Alemany C., Ricote J., et al. Iterative methods for the characterization of piezoelectric materials with losses // Proc. Intern. Conf. Material Technology and Design of Integrated Piezoelectric Devices. 2004. P. 145.

Назад к содержанию секции