

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В. ЛОМОНОСОВА**

*На правах рукописи*

**Соколовская Юлия Глебовна**

**Лазерная оптико-акустическая диагностика неоднородных  
коллоидных растворов и композиционных материалов**

01.04.21 – «Лазерная физика»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2022

Работа выполнена на кафедре общей физики и волновых процессов физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова

- Научный руководитель  
(консультант)** – **Карабутов Александр Алексеевич**, доктор физико-математических наук, доцент
- Официальные оппоненты** – **Аракелян Сергей Мартirosович**, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики и прикладной математики ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
- Михалевич Владислав Георгиевич**  
доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник ФГБУ Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук
- Пожар Витольд Эдуардович**  
доктор физико-математических наук, заведующий отделом акустооптических информационных систем Научно-технологического центра уникального приборостроения РАН

Защита диссертации состоится «12» мая 2022 г. в 15 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета МГУ.01.13 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 62, корпус нелинейной оптики, ауд. имени С.А. Ахманова.

E-mail: [diss.sov.31@physics.msu](mailto:diss.sov.31@physics.msu)

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»: <https://istina.msu.ru/dissertations/443806870/>

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета МГУ 01.13,  
кандидат физико-математических наук

А.А. Коновко

## **Общая характеристика работы**

Диссертационная работа посвящена лазерному оптико-акустическому исследованию структуры, оптических и акустических свойств неоднородных конденсированных сред. Экспериментально исследованы оптические свойства ферромагнитных жидкостей, показана возможность восстановления пространственного распределения коэффициента экстинкции света. Исследованы акустические свойства полимерных композиционных материалов, предложены и реализованы методы количественной оценки их пористости и состава.

## **Актуальность работы**

В настоящее время разработка и усовершенствование неразрушающих методик исследования структуры и физических свойств неоднородных конденсированных сред имеет высокое фундаментальное и прикладное значение для многих областей науки и техники. Среди часто используемых современных методов диагностики структуры и свойств конденсированных сред стоит выделить две группы методов: оптические и акустические методы. Оптические и акустические свойства среды напрямую связаны с ее структурой. Величины коэффициентов поглощения, рассеяния и экстинкции света, их пространственное распределение, спектры поглощения и отражения несут информацию об искомых особенностях структуры исследуемой среды. Для молекулярных растворов это концентрация и наличие примесей, для коллоидных растворов – размер частиц и пространственная неоднородность их распределения, наличие агрегатов, для твердых тел – состав, анизотропия и т.д. Помимо использования оптических свойств как средства получения информации о структуре, иногда необходимо одновременно иметь информацию и о структуре среды, и о ее количественных оптических характеристиках (например, коэффициенты поглощения и отражения света, что актуально, например, для исследования материалов, применяемых в оптических устройствах). Следовательно, актуальна задача исследования оптических свойств жидкостей и твердых тел и их связи со структурой среды и динамикой ее изменения.

Акустические свойства среды, такие, как скорость и затухание ультразвука, их частотные зависимости, акустический импеданс также несут ценную информацию о структуре исследуемого объекта: вязкости и плотности жидкостей, составе, плотности и пористости твердых тел, наличии в них дефектов. Таким образом, исследование связи акустических свойств материала и его структуры является важным для разработки и усовершенствования различных методик неразрушающего контроля материалов. В настоящий момент это особенно актуально для задач машиностроения, авиации, ракетно-космической отрасли.

Как оптические свойства (коэффициенты поглощения и экстинкции света), так и акустические свойства (скорость и затухание акустических волн) среды могут быть

исследованы методами лазерной оптико-акустической (ЛОА) диагностики. Данный способ диагностики основан на лазерном возбуждении акустических волн в исследуемой среде при поглощении в ней импульсного или модулированного по интенсивности непрерывного лазерного излучения [1,2]. При тепловом (термоупругом) механизме возбуждения звука при поглощении лазерного импульса в среде происходит неоднородный нестационарный нагрев приповерхностного слоя этой среды, последующее тепловое расширение которого приводит к возникновению механических напряжений в среде и генерации звука. Этот механизм играет основную роль в оптически-поглощающих жидкостях и слаботеплопроводящих твердых телах при умеренной интенсивности лазерного излучения (менее  $10^8$ - $10^9$  Вт/см<sup>2</sup>). Известно, что временная форма и амплитуда возбуждаемого в исследуемой среде оптико-акустического (ОА) сигнала определяется как параметрами поглощенного лазерного излучения (длительностью импульса, интенсивностью, временной формой импульсов), так и оптическими, теплофизическими и акустическими свойствами поглощающей среды (коэффициентами поглощения и рассеяния света, теплоемкостью, температуропроводностью, температурным коэффициентом объемного расширения среды, скоростью звука) [1].

Одной из актуальных задач, которую можно решить методами ЛОА-диагностики, является исследование коллоидных растворов, в частности, их оптических свойств и степени однородности их структуры. Форма фронта возбуждаемого ОА-сигнала зависит от величины коэффициента экстинкции лазерного излучения в среде и его пространственного распределения, что дает возможность измерять ОА-методом коэффициент экстинкции как в пространственно-однородных по структуре и оптическим свойствам средах, так и в средах, имеющих пространственную неоднородность структуры и свойств. В настоящей работе были исследованы коллоидные растворы – ферромагнитные жидкости (ФЖ), состоящие из наночастиц магнетита, несущей жидкости и стабилизатора. Такие жидкости находят широкое применение в прикладной науке и технике. На основе ФЖ могут быть изготовлены различные датчики: датчики магнитного поля, давления, угла наклона и т.д. [3]. Отдельно стоит отметить применение ФЖ в оптике для изготовления устройств с управляемыми оптическими свойствами: модуляторов, оптических решеток, фильтров, затворов [4-5]. Кроме того, в настоящее время ведутся разработки по применению ФЖ в медицине для доставки лекарств, магнитной гипертермии, а также в качестве контрастного средства [3,4]. Важной проблемой, связанной с использованием ФЖ в оптических устройствах, является неоднородность их структуры, а также проблема стабильности ФЖ как коллоидной системы. Значительная неоднородность распределения частиц по глубине, а также возникновение многочастичных агрегатов может существенно влиять на оптические свойства ФЖ и, следовательно, на возможность их применения в оптике. Исследование структуры ФЖ может проводиться,

например, с помощью электронной микроскопии (ЭМ) [6]. Однако ЭМ дает только возможность оценки размеров частиц и выявления агрегатов, и не позволяет проанализировать распределение частиц по глубине многофазных жидкостей. Оптические методы также ранее уже находили применение для исследования ФЖ. Распределение частиц магнетита по размерам может оцениваться по интенсивности рассеянного в жидкости света (методы статического и динамического рассеяния света) [4-6], а двойное лучепреломление, вызванное наличием внешнего магнитного поля, несет информацию о поведении частиц ФЖ в этом поле [4,5]. Однако в подобных работах не учитывалась неоднородность свойств по глубине слоя жидкости и ее зависимость от типа жидкости и границы, а также изменение оптических свойств со временем. Для задач использования ФЖ в оптических устройствах целесообразно иметь возможность восстановления распределения величины коэффициента экстинкции излучения (зависящего от пространственного распределения частиц) по глубине жидкости, а также выявления зависимости этого распределения от типа жидкости, концентрации наличия границы и т.д. Таким образом, актуальной задачей является восстановление пространственного распределения оптических свойств ФЖ, а также обнаружение деградации их структуры и свойств со временем. В настоящей работе эти задачи предлагается решать с помощью ЛОА-диагностики.

Другой актуальной задачей, которую можно решить ЛОА-методами, является неразрушающий контроль структуры и свойств конструкционных материалов, в частности, полимерных композиционных материалов (ПКМ). Одними из наиболее часто используемых в авиации, ракетостроения и судостроении ПКМ являются углепластики – слоистые композитные материалы на основе полимерной матрицы и углеродного волокна. Для производства и применения углепластиков важно контролировать равномерность объемного содержания матрицы и наполнителя, а также уровень пористости материала. Это необходимо для модернизации технологий производства композитов, а также для предсказания поведения конструкции из композиционного материала в процессе эксплуатации под действием нагрузок. Для оценки объемного содержания матрицы в полимерных композитах традиционными методами являются травление и выжигание, недостатки которых состоят в том, что они не позволяют оценить локальность и разброс содержания матрицы. Пористость ПКМ часто оценивается методом рентгеновской компьютерной томографии, методами гидростатического взвешивания и капиллярными методами, а также различными видами ультразвуковых методов [7,8]. Однако методы гидростатического взвешивания и капиллярные методы не дают информации о локальном распределении внутренней пористости. Рентгеновская томография дает информацию о величине локальной пористости исследованной области и о распределении пор по размерам, но при этом имеются трудности с исследованием крупногабаритных деталей и

конструкций. Преимущество ультразвуковых методов состоит в большей оперативности и возможности исследовать конструкции и детали без их вывода из эксплуатации. Измерение фазовой скорости и коэффициента затухания продольных ультразвуковых волн или акустического импеданса может использоваться для оценки пористости материала и его процентного состава.

Традиционные ультразвуковые методики, основанные на пьезоэлектрическом возбуждении зондирующих акустических сигналов, имеют определенные трудности при создании коротких и мощных импульсов с широкой полосой частот мегагерцового диапазона [9], необходимых для исследования пористых углепластиков. Лазерное ОА-возбуждение акустических импульсов позволяет создавать источники ультразвуковых импульсов с заданной амплитудой и временной формой, определяемой параметрами лазерного излучения и свойствами самого источника. Использование лазерных импульсов наносекундной длительности дает возможность возбуждать короткие (длительностью десятки-сотни наносекунд, зависящей также от свойств ОА-источника) и мощные зондирующие импульсы с амплитудой до сотен мегапаскалей и широкой полосой частот до десятков-сотен мегагерц. Это является значительным преимуществом ОА-методики относительно пьезоэлектрических излучателей. Это позволяет реализовать систему лазерно-ультразвукового (ЛУ) неразрушающего контроля пористости и состава углепластиков. Ранее подобные ЛУ-методы использовались другими авторами для измерения размеров кристаллических зерен в различных сплавах, определения упругих модулей металломатричных композитов и обнаружения усталостных изменений [10,11].

Таким образом, степень разработанности темы является достаточной, чтобы обеспечить востребованность исследований и методологию, но оставляет не полностью решенными ряд актуальных задач.

## **Цели и задачи**

Целью данной работы является

1. Исследование пространственного распределения коэффициента экстинкции лазерного излучения в пространственно-неоднородных коллоидных средах (на примере ферромагнитных жидкостей) с использованием лазерного оптико-акустического метода.
2. Разработка методов количественного анализа локальной пористости и объемного содержания полимерной матрицы в углепластиках с использованием широкополосной акустической спектроскопии с лазерным источником ультразвуковых волн.

Конкретные задачи, решаемые в данной работе:

1. Экспериментальное исследование пространственного распределения коэффициента экстинкции лазерного излучения (на длине волны 1064 нм) в ферромагнитных жидкостях при двух различных типах акустической границы
2. Экспериментальное исследование изменения величины и пространственного распределения коэффициента экстинкции со временем в нестабильных ферромагнитных жидкостях
3. Экспериментальная проверка выполнения локальных дисперсионных соотношений Крамерса-Кронига в ограниченной полосе частот для коэффициента затухания и фазовой скорости продольных акустических волн в полимерных композиционных материалах с использованием широкополосной акустической спектроскопии с лазерным источником
4. Экспериментальное исследование влияния пористости на дисперсию фазовой скорости продольных акустических волн в углепластиках с использованием широкополосной акустической спектроскопии с лазерным источником
5. Разработка методов оперативной оценки локальной пористости углепластиков и ее распределения в материале с использованием лазерного источника ультразвука.
6. Разработка метода определения объемного содержания полимерной матрицы в углепластиках и равномерности ее распределения с использованием лазерного источника ультразвука.

### **Объект и предмет исследования**

Объектами исследования являлись коллоидные растворы - ферромагнитные жидкости, а также полимерные композиционные материалы на основе углеродных волокон (углепластики). Предметами исследования являлись методы диагностики коэффициента экстинкции света в ферромагнитных жидкостях и его изменения со временем, а также методы диагностики акустических свойств углепластиков (скорости звука, коэффициента затухания и акустического импеданса) и связь акустических свойств и структуры углепластика.

### **Методы исследования**

Коэффициент экстинкции света в ФЖ измерялся лазерным оптико-акустическим методом по временному профилю фронта возбуждаемого в жидкости ОА-сигнала, использовалась схема прямой регистрации сигналов. Наличие агрегатов частиц в ФЖ было проверено методом сканирующей электронной микроскопии. Дисперсию и затухание продольных акустических волн в углепластиках были получены по амплитудным и фазовым спектрам импульсов продольных акустических волн, прошедших через образцы, с помощью акустического спектрометра с лазерным источником широкополосных зондирующих импульсов (с прямой схемой регистрации сигналов). Пористость и состав углепластиков оценивались по величинам фазовой скорости продольных акустических волн и величинам

акустического импеданса материала, измеренным с использованием лазерно-ультразвукового дефектоскопа (рефлектометра), работающего по косвенной схеме регистрации акустических сигналов. Проводилось сравнение полученных результатов с расчетными данными изготовителя материалов и данными рентгеновской томографии.

### **Научная новизна**

1. Лазерным оптико-акустическим методом проведена диагностика оптических свойств ферромагнитной жидкости с объемной концентрацией наночастиц магнетита 0.35%-4.2% с высоким пространственным разрешением и впервые показано, что неоднородность распределения коэффициента экстинкции лазерного излучения (на длине волны 1064 нм) с глубиной зависит от типа акустической границы, свойств несущей жидкости, а также от концентрации частиц.
2. Впервые продемонстрировано использование лазерного оптико-акустического метода для наблюдения изменения коэффициента экстинкции лазерного излучения в разбавленных ферромагнитных жидкостях на водной основе (с концентрацией магнетита 0.35%-4.2%) с течением времени.
3. Впервые проведена проверка выполнения локальных соотношений Крамерса-Кронига между затуханием и фазовой скоростью продольных ультразвуковых волн в ограниченном частотном диапазоне для беспористых и малопористых полимерных композиционных материалов и полимерной матрицы.
4. Показана возможность использования широкополосных зондирующих ультразвуковых импульсов, возбуждаемых лазерным излучением наносекундной длительности в специально подобранном оптико-акустическом источнике, для получения частотных зависимостей фазовой скорости и коэффициента затухания продольных акустических волн в углепластиках, исследовано влияние пористости на дисперсию фазовой скорости.
5. Представлен метод измерения акустического импеданса для оценки пористости углепластиков, основанный на лазерном оптико-акустическом возбуждении широкополосных импульсов продольных акустических волн.
6. Представлен метод измерения объемной концентрации полимерной матрицы и углеродного наполнителя в углепластиках по величине фазовой скорости продольных акустических волн основанный на лазерном оптико-акустическом возбуждении широкополосных зондирующих импульсов.

### **Практическая ценность**

1. Представленный лазерный оптико-акустический метод восстановления пространственного распределения коэффициента экстинкции лазерного излучения может быть полезен для изучения

оптических свойств ферромагнитных жидкостей с целью разработки оптических устройств на их основе, а также может быть использован для оценки стабильности ферромагнитных жидкостей, полученных по новым технологиям, и жидкостей с новым типом стабилизатора или несущей жидкости. Наличие связи между концентрацией частиц и оптическими свойствами магнитной жидкости дает возможность использовать данный метод для определения объемного содержания магнетита в жидкости. Кроме того, данный метод может быть использован для анализа изменений оптических свойств ферромагнитных жидкостей во внешних электромагнитных полях. Метод возможно применять и для анализа структуры и оптических свойств других коллоидных сред, в том числе биологических.

2. Полученные эмпирические соотношения для связи пористости и относительной дисперсии фазовой скорости продольных акустических волн в углепластиках могут быть использованы для оперативной неразрушающей оценки пористости композитов. Подобные результаты могут быть полезны как для контроля качества получаемых материалов с целью модернизации технологий изготовления, так и для предсказания поведения конструкций и деталей из данного материала под действием внешних нагрузок.
3. Представленный лазерный оптико-акустический метод определения пористости материала на основе измерения его акустического импеданса, не требующий определения объема и массы исследуемого объекта, может быть использован для диагностики композитных конструкций сложной формы.
4. Предложенный лазерный оптико-акустический метод количественной оценки объемного содержания полимерной матрицы в углепластиках может быть использован как для тестирования контрольных образцов, так и для контроля реальных композитных конструкций.

### **Защищаемые положения**

1. Лазерный оптико-акустический метод позволяет восстановить неоднородное распределение коэффициента экстинкции лазерного излучения по глубине ферромагнитной жидкости. При длине волны излучения 1064 нм максимально возможная глубина зондирования составляет от 200 мкм (при объемной концентрации магнетита 4.2%) до 1700 мкм (при объемной концентрации магнетита 0.35%).
2. При акустически жесткой границе в приповерхностном слое ферромагнитной жидкости толщиной 1000-1700 мкм наблюдается более существенный рост коэффициента экстинкции лазерного излучения с глубиной по сравнению со случаем свободной границы, а также появляется нелинейная зависимость коэффициента экстинкции от концентрации жидкости на глубинах около 200 мкм и более (для концентраций магнетита 0.35-3.5%).
3. Наблюдаемое уменьшение величины коэффициента экстинкции лазерного излучения (на длине волны 1064 нм) и изменение его пространственного распределения со временем в разбавленной ферромагнитной жидкости на водной основе (с концентрацией 0.35%-4.2%) происходит вследствие агрегации наночастиц магнетита.

4. Амплитудно-частотный спектр ультразвукового импульса, возбуждаемого лазерным излучением наносекундной длительности в специально подобранном оптико-акустическом источнике (с коэффициентом поглощения излучения  $\approx 450 \text{ см}^{-1}$  на длине волны 1064 нм), позволяет измерять частотные зависимости коэффициента затухания и фазовой скорости продольных акустических волн в частотном диапазоне 1-10 МГц для углепластиков толщиной до 13 мм.
5. Величина дисперсии фазовой скорости продольных акустических волн в углепластике в частотном диапазоне 1-10 МГц увеличивается с ростом его пористости (от 60 м/с при пористости 0.1% до 350 м/с при пористости 4.2%).
6. Использование лазерного источника ультразвуковых импульсов позволяет реализовать методы измерения акустического импеданса и средней скорости звука в углепластиках для количественной оценки пористости и содержания полимерной матрицы.

### **Достоверность результатов**

Результаты работы являются в достаточной мере обоснованными и достоверными. Достоверность экспериментальных результатов подтверждается согласованием полученных результатов с известными литературными данными, соответствием результатов априорной информации и теоретическим расчетам, а также воспроизводимостью результатов. Достоверность результатов исследования структуры магнитных жидкостей также подтверждается электронной микроскопией, достоверность оценки пористости углепластиков подтверждается результатами рентгеновской томографии.

### **Апробация работы**

Результаты, вошедшие в настоящую работу, докладывались на следующих всероссийских и международных конференциях: «5th International Symposium on Laser-Ultrasonics and Advanced Sensing (LU2016)», (Австрия, Линц, 2016), «13th School on Acousto-Optics and Applications» (Москва, НИТУ МиСиС, 2017), международных конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов – 2016» и «Ломоносов – 2017» (Москва, МГУ, 2016 и 2017), Третьей международной конференции «Деформирование и разрушение композиционных материалов и конструкций», (Москва, ИМАШ РАН, 2018), «20th International Conference on Photoacoustic and Photothermal Phenomena», (Москва, 2019), XXXII-ой сессии Российского акустического общества (Москва, АКИН РАН, 2019), «Ломоносовские чтения», секция физики (Москва, МГУ, 2019, 2020, 2021), XVII и XVIII Всероссийской школе-семинаре «Волновые явления в неоднородных средах» имени А.П. Сухорукова (Москва, МГУ, 2020 и 2021), XXIV Международной конференции

«Новое в магнетизме и магнитных материалах» (Москва, МИРЭА, 2021), а также на семинаре кафедры общей физики и волновых процессов физического факультета МГУ. Основные результаты изложены в печатных работах [A1-A30].

### **Публикации**

Основные результаты диссертации опубликованы в 30 печатных работах, в том числе в 14 статьях в журналах Scopus, WoS, RSCI [A1-A14], 3 статьях в научных журналах из перечня ВАК РФ [A15-A17], а также в 13 публикациях в сборниках трудов конференций [A18-A30]. Полный список работ приведен в конце автореферата.

### **Личный вклад автора**

Представленные в работе результаты получены автором лично или в соавторстве при его непосредственном участии. Автором лично были проведены эксперименты по лазерной оптико-акустической диагностике ферромагнитных жидкостей и углепластиков, проведена обработка полученных данных. Обсуждение результатов проводилось совместно с соавторами, все публикации были подготовлены при определяющем участии автора.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем работы составляет 181 страницу, включая 77 рисунков и 10 таблиц. Список цитируемой литературы включает 197 наименований.

### **Содержание работы**

Во **Введении** обосновывается актуальность темы диссертационной работы, приведены цели и задачи, решаемые в работе, сформулированы научная новизна и практическая значимость работы, сформулированы положения, выносимые на защиту, а также описывается краткое содержание работы по главам.

**Глава 1** содержит обзор литературы, посвященной методам лазерной ОА-диагностики структуры и свойств неоднородных конденсированных сред. В §1.1 описаны механизмы лазерного возбуждения звука в средах (тепловой, испарительный, стрикционный, концентрационно-деформационный, давление света). Реализация того или иного механизма ОА-эффекта зависит от параметров лазерного излучения (интенсивности, длины волны), а также от свойств поглощающей среды. §1.2 посвящен исследованию оптических свойств конденсированных сред ОА-методами. Наиболее широко используемым ОА-методом исследования оптических свойств конденсированных сред является ОА-спектроскопия (или фотоакустическая спектроскопия), которая позволяет получать зависимости коэффициента поглощения света от длины волны падающего излучения. Приведены примеры работ,

посвященных применению ОА-спектроскопии для исследования оптических свойств жидкостей и твердых тел с целью анализа состава вещества, обнаружения примесей и т.д. В §1.3 приведен обзор работ по применению ОА-методов для измерений теплофизических характеристик конденсированных сред, а также для обнаружения фазовых переходов и оценки степени кристаллизации исследуемого вещества. В §1.4 кратко описано применение ОА-эффекта для исследования фотоактивных сред. §1.5 посвящен исследованию акустических свойств конденсированных сред с помощью ОА-методов. Приведены примеры работ, в которых проводилось измерение скоростей продольных и поперечных акустических волн, а также коэффициента затухания с целью связать акустические свойства с искомыми характеристиками среды. Описаны недостатки традиционных ультразвуковых методик неразрушающего контроля структуры среды и преимущества ЛУ-метода как альтернативы. Проведен обзор работ по применению ЛУ-методов для оценки размеров зерен кристаллитов, упругих модулей материала, пористости, остаточных напряжений.

В **Главе 2** представлено теоретическое описание теплового механизма ОА-возбуждения ультразвука в жидкостях и твердых телах. В § 2.1 описано тепловое ОА-возбуждение ультразвука в жидкостях на основе метода передаточных функций. Если время релаксации теплового поля в области нагрева много больше длительности лазерного импульса, то диффузией тепла в процессе лазерного нагрева среды можно пренебречь. Форма возбуждаемых ОА-импульсов зависит как от коэффициента поглощения исследуемой среды  $\mu_a$ , так и от длительности падающего лазерного импульса  $\tau_L$ , а также от типа акустической границы поглощающей жидкости, и для жесткой границы определяется следующим образом [1]:

$$v_r(\tau) = \frac{\mu_a c_0 \beta I_0}{2\rho_0 c_p} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-\mu_a c_0 |\tau-t|} dt, \quad (1)$$

где  $f(t)$  – форма лазерного импульса,  $I_0$  – интенсивность света на границе поглощающей жидкости,  $c_0$  - адиабатическая скорость звука в среде,  $\rho_0$ ,  $c_p$ ,  $\beta$  – равновесная плотность, удельная теплоемкость при постоянном давлении и коэффициент объемного расширения среды соответственно. При этом  $v(\tau)/c_0 = p(\tau)/\rho c_0^2$ . Для гауссовой формы импульса  $f(t) = \pi^{-1/2} e^{-(t/\tau_L)^2}$  интеграл (1) будет выражаться аналитически как:

$$v_r(\tau) = \frac{\mu_a c_0 \beta E_0}{2\rho_0 c_p} \times \frac{1}{2} \exp\left(\frac{\mu_a^2 c_0^2 \tau_L^2}{4}\right) \times \left\{ e^{\mu_a c_0 \tau} \left[ 1 - \Phi\left(\frac{\tau + \mu_a c_0 \tau_L}{\tau_L}\right) \right] + e^{-\mu_a c_0 \tau} \left[ 1 + \Phi\left(\frac{\tau - \mu_a c_0 \tau_L}{\tau_L}\right) \right] \right\}. \quad (2)$$

На рис. 1 приведены формы возбуждаемых ОА-импульсов (нормированных на  $p_0 = \beta E_0 / 2\rho_0 c_p$ ) в жидкости в случаях акустически жесткой ( $\rho_{ext} c_{ext} \gg \rho_{liq} c_{liq}$ ,  $\rho_{ext, liq}$  и  $c_{ext, liq}$  – плотность и скорость звука для внешней среды и рассматриваемой жидкости соответственно) и акустически

свободной ( $\rho_{ext}c_{ext} \ll \rho_{liq}c_{liq}$ ) границ между поглощающей и прозрачной средой при различных  $\tau_L$  (при  $\mu_a = 20 \text{ см}^{-1}$ ).

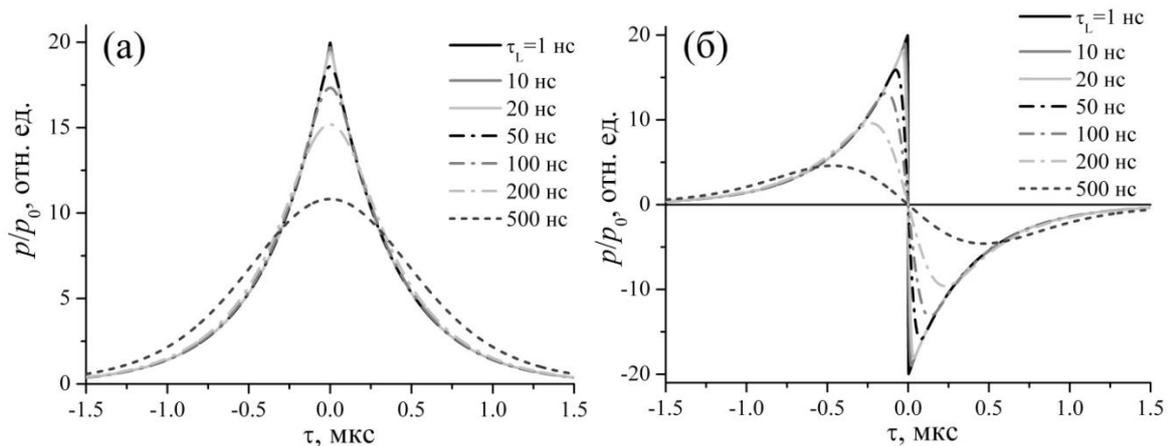


Рис. 1. Форма возбуждаемых в жидкости ОА-импульсов при различной длительности лазерного излучения при акустически жесткой границе поглощающей среды (слева) и акустически свободной (справа).

В § 2.2 приведено теоретическое описание теплового ОА-возбуждение ультразвука в практически нетеплопроводящих и теплопроводящих твердых телах, приведены передаточные функции для случаев слабой и высокой теплопроводности среды. В § 2.3 кратко рассказано о трансформации широкополосных акустических импульсов при распространении в среде. § 2.4 посвящен лазерным источникам зондирующих импульсов продольных акустических волн. Использование лазера дает возможность для создания источников т.н. «стандартных» (калиброванных) импульсов акустических волн (ОА-источников), находящих применение для диагностики структуры и свойств неоднородных материалов. Путем подбора параметров лазерного излучения, оптических, теплофизических и акустических свойств материала источника и граничных условий возбуждения звука создаются ОА-источники, генерирующие ультразвуковые импульсы с заданными спектральными характеристиками, временной формой и амплитудой. При этом в зависимости от конкретной задачи могут использоваться зондирующие ультразвуковые импульсы с определенной полосой частот. Приведены примеры используемых ОА-источников, а также временные профили и амплитудные спектры нескольких «стандартных» зондирующих импульсов с различными спектральными диапазонами (1-20 МГц, 1-40 МГц, 1-100 МГц). При используемых в данной работе интенсивностях излучения (не превышающих  $10^6 \text{ Вт/см}^2$ ) возбуждение звука в описанных источниках происходит с помощью теплового ОА-механизма. В § 2.5 описаны методы регистрации оптико-акустических сигналов, возбуждаемых в исследуемой среде: регистрация с помощью пьезоэлектрических приемников, газомикрофонный метод, и оптические методы - метод отклонения пробного оптического луча, интерферометрические схемы.

**Глава 3** посвящена лазерной оптико-акустической диагностике экстинкции света в неоднородно-поглощающих свет коллоидных растворах – ферромагнитных жидкостях (ФЖ). В §3.1 описана методика измерения коэффициента экстинкции лазерного излучения в однородно- и неоднородно-поглощающих и рассеивающих свет жидкостях. Основная идея методики заключается в том, что при поглощении в среде короткого лазерного импульса (такого, что  $\mu_{\text{eff}}c_0\tau_L \ll 1$ , где  $\mu_{\text{eff}}$  – коэффициент экстинкции излучения на используемой длине волны в исследуемой среде, определяемый коэффициентами поглощения и рассеяния,  $c_0$  – скорость звука в этой среде,  $\tau_L$  – длительность лазерного импульса) передний фронт давления ОА-сигнала  $p(\tau < 0)$  повторяет пространственное распределение тепловыделения в этой среде, и его временной профиль определяется коэффициентом экстинкции  $\mu_{\text{eff}}$ . Для сред с пространственно-однородным поглощением и рассеянием зависимость переднего фронта ОА-сигнала от времени имеет экспоненциальную форму:  $p(\tau < 0) \sim \exp(\mu_{\text{eff}}c_0\tau)$ . Если же в жидкости присутствует неоднородность распределения коэффициента экстинкции по глубине  $z$ , то формула для переднего фронта ОА-сигнала будет выглядеть следующим образом [1]:

$$p(\tau) \sim \mu_{\text{eff}}(-c_0\tau) \exp\left(-\int_0^{-c_0\tau} \mu_{\text{eff}}(\xi) d\xi\right). \quad (3)$$

Отсюда определяется пространственное распределение коэффициента экстинкции света  $\mu_{\text{eff}}(z)$  в исследуемой среде. Нагрев жидкости в данном случае можно считать практически мгновенным, а ее плотность за время действия лазерного импульса не успевает существенно измениться. Погрешность определения величины коэффициента поглощения или экстинкции определяется точностью расчета производной от натурального логарифма профиля  $\partial \ln p(\tau) / \partial \tau$  (при расчете согласно (3) в случае неоднородно-поглощающих сред) или точностью аппроксимации профиля импульса (в случае однородно-поглощающих сред), а также погрешностью измерения величины скорости звука в жидкости  $c_0$ , и не зависит от нестабильности энергии излучения, т.к. в формуле (3) используются только профили сигнала без учета изменения их амплитуды.

В § 3.2 приведены описание и схема экспериментальной установки, использованной для исследования оптических свойств однородно и неоднородно-поглощающих свет жидкостей (рис. 2). Для возбуждения ОА-сигналов в жидкостях использовалось излучение импульсного Nd:YAG лазера с модуляцией добротности (основная мода TEM00),  $\lambda=1064$  нм, длительность импульса 10 нс, энергия в импульсе 10 мДж, частота повторения импульсов 10 Гц. Временной профиль пучка имел форму близкую к гауссовой. На поверхности исследуемой жидкости создавался пучок с гладким поперечным распределением интенсивности, радиус пучка составлял порядка см. Интенсивность лазерного излучения на поверхности жидкости составляла  $I \approx 3 \cdot 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>. Для жидкостей с  $c_0 \approx 1400$  м/с в данных условиях экспериментов

диапазон измеряемых значений коэффициента экстинкции составляет от 5 до 350 см<sup>-1</sup>. Здесь и далее под коэффициентом экстинкции света будет подразумеваться коэффициент экстинкции лазерного излучения ближнего ИК-диапазона на используемой длине волны 1064 нм. Следует отметить, что в рассматриваемом случае при заданных параметрах лазерного излучения и времени облучения заметного влияния действия излучения на структуру и свойства ФЖ наблюдаться не будет. Значимость изменения температуры исследуемой жидкости в ходе эксперимента можно оценить по формуле [1]:

$$T' = \left( \frac{\mu_{\text{eff}} E_0}{\rho_0 c_p} \right) e^{-\mu_{\text{eff}} z}, \quad (4)$$

где  $E_0$  – плотность поглощенной энергии лазерного излучения,  $\rho_0$  – плотность жидкости,  $c_p$  – теплоемкость жидкости при постоянном давлении. По проведенной оценке общий нагрев поверхности жидкости (при максимальных значениях коэффициента поглощения, который может быть измерен при заданных условиях) в течение времени измерения (усреднение по 128 временным реализациям, соответствует 128 последующим лазерным импульсам) не превышает 0,05 К, что означает, что агрегатное состояние вещества заведомо не меняется и значительных тепловых потоков наблюдаться не будет.

В § 3.3 для демонстрации возможностей применения ОА-метода для измерения величины коэффициента поглощения и экстинкции света и восстановления их пространственного распределения по глубине жидкости в качестве примера рассмотрена среда со структурно-однородными оптическими свойствами – молекулярный раствор (водный раствор медного купороса  $\text{CuSO}_4$ ). В таком растворе преимущественно происходит поглощение света, а рассеяние практически отсутствует ( $\mu_{\text{eff}} = \mu_a$ ). Приведены формы зарегистрированных ОА-импульсов, показано их совпадение с теоретическими данными. С учетом  $p(\tau < 0) \sim \exp(\mu_a c_0 \tau)$ , коэффициент поглощения света в данном случае может быть измерен аппроксимацией профиля экспоненциальной функцией. В исследованных образцах раствора коэффициент поглощения света (для  $\lambda = 1064$  нм) варьировался от 7.8 до 23.3 см<sup>-1</sup>. Получена зависимость коэффициента поглощения  $\mu_a$  от объемной доли  $\text{CuSO}_4$ . Также для всех концентраций исследованных растворов была проведена процедура восстановления зависимости коэффициента поглощения света  $\mu_a$  от глубины зондирования  $z$ . Результаты показали, что зависимость  $\mu_a(z) \approx \text{const}$  для всех концентраций раствора (с учетом величины погрешности измерения, равной примерно 5%). Пример восстановленной зависимости показан на рис. 3, а.

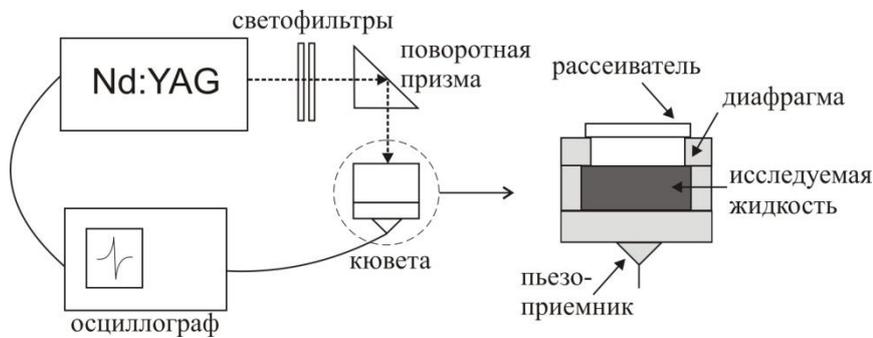


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для исследования оптических свойств жидкостей.

§§3.4-3.7 посвящены исследованию ферромагнитных жидкостей. Использование ОА-метода даст возможность обнаружить неоднородность распределения коэффициента экстинкции света (вызванную неоднородностью распределения частиц) в приповерхностном слое жидкости толщиной в десятки-сотни микрон. В §3.4 дается общая информация о ФЖ (их структура, области применения), описаны причины неоднородности их структуры и свойств. В §3.5 дана информация о жидкостях, исследованных в данной работе - окисных ФЖ с различной концентрацией частиц магнетита  $Fe_3O_4$ , изготовленных на основе двух различных несущих жидкостей – воды и керосина. Объемная концентрация наночастиц магнетита составляла от 0.35% до 3.5%, средний размер частиц 14-15 нм.

§3.6 посвящен анализу влияния типа акустической границы, концентрации частиц, и типа несущей жидкости на пространственно распределение коэффициента экстинкции света в ФЖ. Эксперимент проводился при двух различных конфигурациях: при акустически жесткой ( $\rho_{ext}c_{ext} \gg \rho_{mag}c_{mag}$ ) и акустически свободной ( $\rho_{ext}c_{ext} \ll \rho_{mag}c_{mag}$ ) границе магнитной жидкости ( $\rho_{ext,mag}$  и  $c_{ext,mag}$  – плотность и скорость звука для внешней среды и магнитной жидкости соответственно). Такие конфигурации были выбраны исходя из того, что наличие твердотельной границы на поверхности коллоидного раствора может влиять на его структуру вследствие частичной адсорбции некоторых его составляющих. При акустически жесткой границе излучение проходило в жидкость через кварцевую пластину (закрывающую сверху кювету с ФЖ), при свободной – через воздушный слой. С использованием формулы (3) были восстановлены пространственные распределения коэффициента экстинкции света по глубине для жидкостей на основе воды и керосина различной концентрации при двух типах границы. На рис. 3, б приведены сравнения пространственных распределений  $\mu_{eff}(z)$  для трех значений объемной концентрации (0.35%, 0.7% и 1.4%) для жидкости на основе воды в случаях акустически жесткой и свободной границ. Для каждой из концентраций приведена экспериментально полученная зависимость, и ее аппроксимация гладкой функцией. Из восстановленных зависимостей  $\mu_{eff}(z)$  видно, что коэффициент экстинкции на использованной длине волны света в исследованных ФЖ увеличивается с глубиной, причем при одинаковой концентрации в случае жесткой границы он возрастает гораздо сильнее, чем в случае свободной. Максимально возможная глубина зондирования зависит от величины коэффициента экстинкции света и динамического диапазона акустической системы регистрации составляет от

200 мкм (при объемной концентрации магнетита 4.2%) до 1700 мкм (при объемной концентрации магнетита 0.35%).

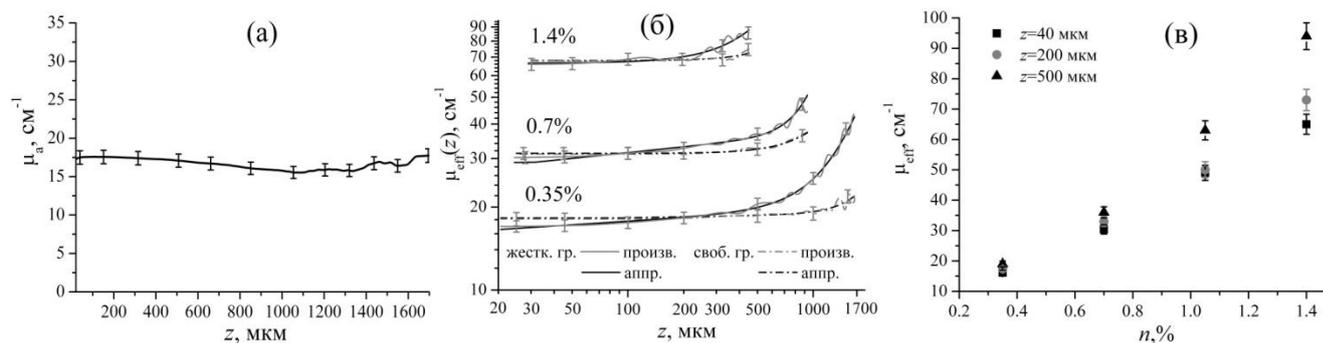


Рис. 3. Зависимость коэффициента поглощения света в водном растворе медного купороса от глубины зондирования (а), сравнение распределения коэффициента экстинкции света по глубине в случае жесткой и свободной границ для ферромагнитных жидкостей (б) и сравнение величины коэффициента экстинкции  $\mu_{eff}$  на нескольких выбранных глубинах ферромагнитной жидкости (в)

Для демонстрации зависимости степени проявления неоднородности оптических свойств ФЖ при жесткой границе от концентрации частиц магнетита была проанализирована величина коэффициента экстинкции  $\mu_{eff}$  на нескольких выбранных глубинах  $z_1$ ,  $z_2$  и  $z_3$  (40, 200 и 500 мкм). На глубине 40 мкм зависимость  $\mu_{eff}(n)$  (при  $n = 0.35\% - 3.5\%$ ) практически линейна, в то время как для глубин 200 мкм и 500 мкм зависимость становится нелинейной. При этом на глубине 500 мкм нелинейность зависимости  $\mu_{eff}(n)$  будет проявляться сильнее, чем на глубине 200 мкм (рис 3, в). Для получения связи между объемной концентрацией наночастиц магнетита и изменением коэффициента экстинкции с глубиной было проанализировано его относительное изменение  $\Delta\mu_{eff}/\mu_{eff}^{max} = (\mu_{eff}^{max} - \mu_{eff}^{min})/\mu_{eff}^{max}$ , где  $\mu_{eff}^{min}$  и  $\mu_{eff}^{max}$  – минимальная и максимальная величина коэффициента экстинкции в исследуемом диапазоне глубин для данной концентрации. Рассчитанные зависимости  $\Delta\mu_{eff}/\mu_{eff}^{max}(n)$  для двух типов жидкости в случаях жесткой и свободной границ приведены на рис. 4, а. Так как максимальная глубина зондирования ФЖ зависит от величины  $\mu_{eff}$ , то для того, чтобы учесть различие глубины зондирования в случае разных концентраций, для случая жесткой границы предлагается также рассчитать величину относительного изменения коэффициента экстинкции, отнесенную к глубине зондирования жидкости  $z_{max}$  и получить зависимость  $\Delta\mu_{eff}/z_{max}(n)$  для двух типов жидкостей (рис. 4, б).

Из полученных экспериментальных результатов следует, что неоднородность структуры, и, соответственно, оптических свойств приповерхностного слоя ФЖ зависит как от типа границы и типа несущей жидкости (вода или керосин), так и от величины объемной концентрации частиц магнетита в жидкости. При этом объемная концентрация магнетита в жидкости будет существеннее влиять на пространственное изменение  $\mu_{eff}$  в случае жесткой

границы, а при свободной границе влияние концентрации магнетита на пространственное изменение  $\mu_{\text{eff}}$  будет гораздо менее существенно, чем при жесткой границе.

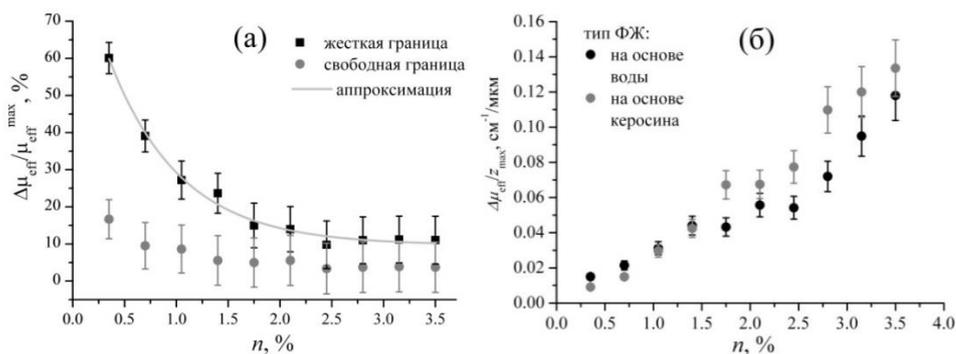


Рис. 4. Зависимости относительного изменения коэффициента экстинкции света при двух типах границ (а) и относительного изменения коэффициента экстинкции при жесткой границе, отнесенного к максимальной глубине зондирования (б) от объемной концентрации магнетита в ферромагнитных жидкостях на основе воды.

В то же время, величины среднего по глубине зондирования коэффициента  $\langle\mu_{\text{eff}}\rangle$  практически совпадают в случаях жесткой и свободной границ при одной и той же концентрации  $n$  и существует линейная зависимость между  $\langle\mu_{\text{eff}}\rangle$  и концентрацией жидкости (так как граница влияет на перераспределение частиц и неоднородность  $\mu_{\text{eff}}$  по глубине, а на среднюю величину  $\mu_{\text{eff}}$  влияет преимущественно концентрация частиц).

В §3.7 лазерный оптико-акустический метод был использован для исследования ФЖ с нарушенной стабильностью с целью выявления изменения оптических свойств со временем. Известно, что одной из важных проблем, связанных с производством и применением магнитных жидкостей, является проблема стабильности ФЖ как коллоидной системы, при этом она особенно актуальна для ФЖ на основе воды. Поэтому в качестве примера жидкости с нарушенной стабильностью были взяты водные ФЖ, дополнительно разбавленные несущей жидкостью. Для демонстрации возможностей ОА-метода проводилось измерение коэффициента экстинкции света в ферромагнитных жидкостях сразу после разбавления, а затем после некоторого определенного промежутка времени (в качестве примера были взяты интервалы 7 и 30 дней). Для того, чтобы выделить возможную пространственную неоднородность  $\mu_{\text{eff}}(z)$ , вызванную изменением структуры со временем и минимизировать влияние границы, была использована конфигурация с акустически свободной границей. Показано, что проведенное исследование демонстрирует изменение коэффициента экстинкции света на используемой длине волны и его пространственного распределения со временем. Восстановленные зависимости  $\mu_{\text{eff}}(z)$  для наименьшей и наибольшей концентраций ФЖ  $n = 0.35\%$  и  $n = 4.2\%$  показаны на рис. 5, а и 5, б. Кривые 1, 2 и 3 на рис. 3 соответствуют различному времени с момента разбавления (исходная – первый день, 7 и 30 дней). Из результатов следует, что в ФЖ из группы с меньшей концентрацией (0.35%-1.4%) наблюдается

некоторое увеличение коэффициента экстинкции света с глубиной, что, по-видимому, связано с особенностями перераспределения структуры жидкости при разбавлении и с последующей агрегацией частиц. Для исходного состояния сразу после разбавления при  $n = 0.35\%$   $\Delta\mu_{\text{eff}}$  составляет 16%, через 7 дней увеличивается до 19%, а через 30 дней – до 33 %. Подобное увеличение, хотя и в меньшей степени, наблюдается и для других образцов ФЖ ( $n = 0.7\% - 1.4\%$ ). В то же время для жидкости с концентрацией  $n = 4.2\%$  зависимости  $\mu_{\text{eff}}(z) \approx \text{const}$  в доступном для измерений диапазоне глубин с учетом погрешностей измерений являются практически константой. Это справедливо и для других образцов ФЖ из более концентрированной группы ( $n = 3.15\% - 3.85\%$ ). Также были получены зависимости среднего коэффициента экстинкции света  $\langle\mu_{\text{eff}}\rangle$  (соответствующего среднему коэффициенту экстинкции по данной глубине зондирования) от концентрации жидкости сразу после разбавления, через 7 суток и через 30 суток момента разбавления (рис. 5, в соответствует группе жидкостей  $n = 0.35\% - 1.4\%$ ) Выявлено, что через 7 суток величина коэффициента экстинкции уменьшается примерно на 20% от изначальной (в зависимости от концентрации жидкости), а через 30 суток – на 50% от начальной величины. Эта закономерность справедлива для всех концентраций исследованных жидкостей. При этом небольшое уменьшение коэффициента экстинкции света, не сильно превышающее ошибку измерения, отмечается уже на следующие сутки после разбавления. Отмеченное уменьшение величины коэффициента экстинкции света со временем является следствием структурных изменений, происходящих в разбавленной ФЖ. Существование агрегатов также подтверждается сравнением результатов сканирующей электронной микроскопии для образцов свежеразбавленной жидкости и спустя 30 дней.

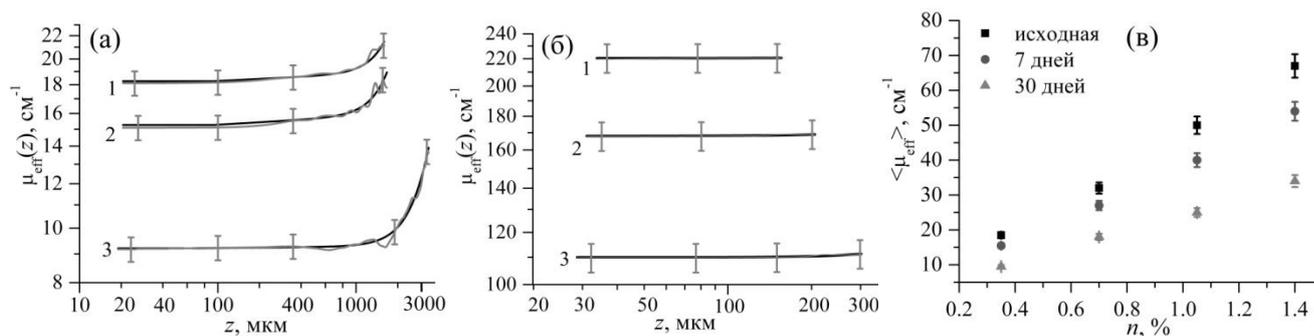


Рис. 5. Распределение коэффициента экстинкции света по глубине жидкости:  $n = 0.35\%$  (а) и  $n = 4.2\%$  (б) (1 – исходная жидкость сразу после разбавления, 2 – через 7 дней, 3 – через 30 дней) и изменение среднего по глубине коэффициента экстинкции света со временем (в).

**Глава 4** посвящена экспериментальному исследованию пористых углепластиковых композиционных материалов с использованием методик на основе лазерного возбуждения ультразвука. В §4.1. описана структура и особенности углепластиков, приведены примеры типичных дефектов их структуры. В § 4.2. дано определение понятия пористости материала и описана связь пористости с акустическими и упругими свойствами материала. Известно, что

пористость образуется в процессе производства материала и может представлять собой как сферические пустоты характерного размера порядка десятков-сотен микрометров, так и протяженные поровые кластеры или расслоения длиной до нескольких миллиметров. В настоящей работе исследовались образцы с уровнем пористости менее 10 %, при котором поры имеют преимущественно изолированную структуру и сферическую форму. В §4.3. описано устройство и принцип работы широкополосного акустического спектрометра с лазерным источником ультразвука. Основой спектрометра является ОА-ячейка, схема которой приведена на рис. 6, а. Для возбуждения ОА-сигналов в источнике использовался импульсный Nd:YAG лазер с модуляцией добротности (аналогично предыдущей главе использовалась основная мода излучения TEM<sub>00</sub>) с  $\lambda=1064$  нм,  $\tau_L = 10$  нс,  $E_{\text{имп}}=10$  мДж, и частотой повторения импульсов 10 Гц. Радиус облучающего пучка на поверхности источника мог меняться в диапазоне для изменения характерного размера возбуждаемого ультразвукового пучка и, соответственно, локальности исследования. Интенсивность излучения на поверхности источника  $I$  составляла от  $3 \cdot 10^5$  до  $1 \cdot 10^6$  Вт/см<sup>2</sup> при радиусах пучка 0.25-0.5 см. Важно отметить, что именно использование лазера с короткими лазерными импульсами позволяет создавать мощные широкополосные зондирующие импульсы для акустической спектроскопии материалов (в частности, сильно поглощающих и рассеивающих ультразвук, таких как полимерные композиты). Подбирая оптимальные параметры лазерного излучения и свойства ОА-источника, и граничных условий, можно создавать импульсы с заданным частотным диапазоном для конкретной задачи. При использовании наносекундных лазеров можно добиться возбуждения зондирующих импульсов длительностью десятки-сотни наносекунд. Для акустической спектроскопии углепластиков в качестве источника был выбран водный раствор туши, закрытый сверху кварцевой пластиной. Амплитудный и фазовый спектры опорного сигнала, возбуждаемого в данном источнике, приведены на рис. 6, б, в. Такой импульс дает возможность с помощью данного спектрометра получать частотные зависимости коэффициента затухания  $\alpha(f)$  и фазовой скорости продольных акустических волн  $C(f)$  в углепластике (толщиной до 13 мм) в спектральном диапазоне – от 0.8-1 МГц до 10-12 МГц. Данный диапазон частот был подобран исходя из его чувствительности к наличию пористости в углепластике и изменению ее величины. Оценка соответствующего нагрева источника ОА-импульсов в течение одного цикла измерений (аналогично §3.2) оценивается на уровне 0,1 К. Возбуждение звука происходит за счет теплового ОА-механизма без изменения агрегатного состояния вещества источника.

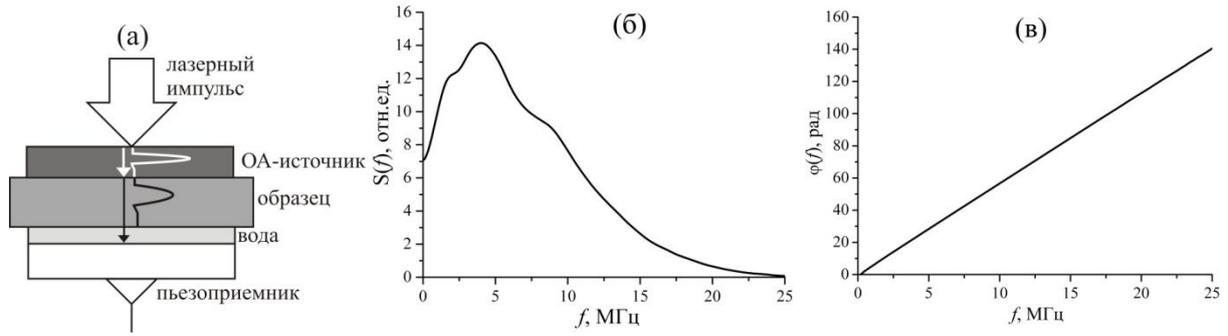


Рис. 6. ОА-ячейка широкополосного акустического спектрометра с лазерным источником ультразвука (а), амплитудный (б) и фазовый (в) спектры зондирующего ОА-импульса.

Измерение амплитудных спектров зондирующего ультразвукового импульса  $S_0(f)$  и импульса, прошедшего через исследуемый образец  $S(f)$ , позволяет рассчитать частотную зависимость коэффициента затухания  $\alpha(f)$  для образца толщиной  $H$ :

$$\alpha(f) = \frac{1}{H} \ln \frac{S_0(f)}{S(f)} + \frac{1}{H} \ln T_{\text{trans}}, \quad (5)$$

где  $T_{\text{trans}}$  – амплитудный коэффициент прохождения акустической волны. Дисперсия фазовой скорости продольных акустических волн в образце  $C(f)$  рассчитывалась с использованием измеренных фазовых спектров зондирующего ультразвукового импульса  $\varphi_0(f)$ , и импульса, прошедшего через образец,  $\varphi(f)$ :

$$C(f) = \frac{H}{\Delta T + [\varphi(f) - \varphi_0(f)] / 2\pi f}, \quad (6)$$

где  $\Delta T = T_2 - T_1$  – разность моментов начала записи в осциллографе ультразвукового импульса, прошедшего исследуемый образец, и зондирующего ультразвукового импульса,  $T_1$  и  $T_2$  отсчитываются от момента излучения лазерного импульса. Задачей §4.4 было использование данной методики для проверки выполнения дисперсионных акустических соотношений Крамерса-Кронига для коэффициента затухания  $\alpha(\omega)$  и фазовой скорости продольных акустических волн  $C(\omega)$  в ограниченном частотном диапазоне для углепластиков. Описана постановка задачи, показан переход от общих соотношений Крамерса-Кронига в неограниченной полосе частот к локальным выражениям для ограниченной полосы. При отсутствии экстремумов функций  $\alpha(\omega)$  и  $C(\omega)$  связь между дисперсией фазовой скорости и коэффициентом затухания продольных акустических волн в заданном ограниченном спектральном диапазоне  $[\omega_1, \omega_2]$  будет выглядеть следующим образом [10]:

$$\alpha(\omega) = \frac{\pi \omega^2}{2C_0^2} \frac{dC(\omega)}{d\omega} \quad (7)$$

$$C(\omega) = \left( \frac{1}{C_0} - \frac{2}{\pi} \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{\alpha(\omega')}{\omega'^2} d\omega' \right)^{-1}. \quad (8)$$

Поскольку затухание ультразвуковых волн в углепластиках обусловлено как поглощением в полимерной матрице, так и рассеянием на углеродных волокнах и порах, то для анализа влияния этих двух различных механизмов потерь на выполнение дисперсионных соотношений (7)-(8) в ограниченном частотном диапазоне были рассмотрены отдельно образцы полимерной матрицы без наполнителя и образцы беспористых и малопористых композитов. Для исследованных образцов получены частотные зависимости коэффициента затухания и фазовой скорости продольных ультразвуковых волн в диапазоне от 1 до 10 МГц. С использованием локального соотношения (5), в котором в качестве  $\alpha(f)$  брался экспериментально измеренный коэффициент затухания, были рассчитаны зависимости дисперсии фазовой скорости  $C(f)$ . На рис. 7 представлен результат соответствующих расчетов, а также экспериментально полученная зависимость  $C(f)$  для матрицы, беспористого и малопористого композитных образцов. Точность измерения  $\alpha$  и  $C$  определяется соотношением сигнал-шум для спектральной амплитуды каждой гармоники сигнала, а также погрешностью измерения толщины исследуемого образца. Установлено, что незначительная дисперсия фазовой скорости продольных акустических волн (не более 40-60 м/с) может наблюдаться даже в случае беспористых углепластиков, что связано с наличием поглощения ультразвуковых волн в полимерной матрице, обусловленным особенностями внутренней структуры полимера, а также с рассеянием ультразвука на углеродных волокнах. При этом абсолютная величина скорости звука зависит от содержания матрицы и наполнителя. Также показано, что в исследуемом спектральном диапазоне 1–10 МГц экспериментальные зависимости в пределах погрешностей измерений для всех образцов совпадают с расчетными, что доказывает справедливость локальных соотношений Крамерса-Кронига в исследованном частотном диапазоне независимо от механизма потерь энергии акустической волны при распространении в материале. Этот результат может быть полезен для вычисления зависимости  $C(f)$  через  $\alpha(f)$  (или наоборот) при проведении неразрушающей диагностики материалов с целью большей оперативности и удобства измерений.

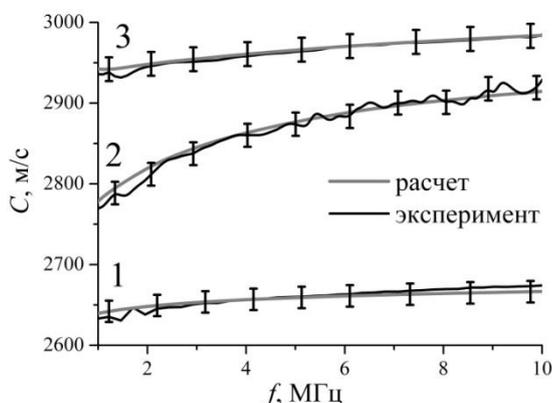


Рис. 7. Зависимости фазовой скорости продольных акустических волн от частоты: 1- полимерная матрица, 2 – малопористый углепластик, 3 – беспористый углепластик.

В §4.5 также методом широкополосной акустической спектроскопии с лазерным источником исследовалось влияние пористости на величину дисперсии фазовой скорости

продольных акустических волн в углепластиках. Исследованные однонаправленные углепластики имели уровень объемной пористости от 0% до 4.2% и обладали различным содержанием полимерной матрицы и углеродного волокна. Получены частотные зависимости фазовой скорости продольных акустических волн  $C(f)$  в диапазоне 1-10 МГц (рис. 8, а). При этом дисперсия скорости имеет место для всех образцов, но ее величина для образцов с различной пористостью будет отличаться. Величина фазовой скорости  $c$  на высоких частотах стремится к величине скорости  $C_0$  для беспористого углепластика, зависящей только от содержания матрицы и наполнителя. Для получения зависимости дисперсии фазовой скорости от пористости углепластика рассмотрено ее относительное изменение  $\Delta C = (C_0 - C_{min})/C_0$ , где скорость  $C_0$  соответствует беспористому материалу с аналогичным составом. Зависимость  $\Delta C(P)$  (рис. 8, б) может быть аппроксимирована по методу наименьших квадратов степенной функцией, которая может быть использована для оценки пористости углепластиков.

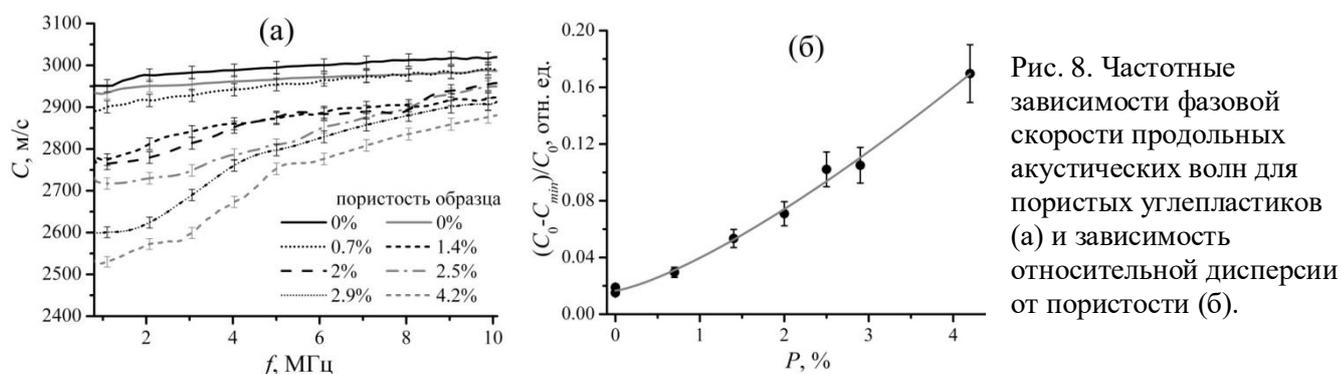


Рис. 8. Частотные зависимости фазовой скорости продольных акустических волн для пористых углепластиков (а) и зависимость относительной дисперсии от пористости (б).

Вторая часть главы (§§4.6-4.7) посвящена количественной оценке пористости углепластиков при одностороннем доступе к объекту исследования. В § 4.6 описано устройство и принцип работы лазерно-ультразвукового дефектоскопа (рефлектометра), работающего по косвенной схеме измерений (рис. 9, а). Использовался Nd:YAG лазер с диодной накачкой и модуляцией добротности.  $\lambda = 1064$  нм,  $E_{имп} = 300$  мкДж,  $\tau_L = 10$  нс, частота повторения импульсов 500 Гц, интенсивность излучения на поверхности источника  $I = 2-4 \cdot 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>, радиус пучка на поверхности источника составлял 1.5-2 мм. В качестве ОА-источника использован черный пластик, временная форма и амплитудный спектр зондирующего импульса приведены на рис. 9 б, в. При поглощении лазерного импульса происходит неоднородный нестационарный нагрев приповерхностного слоя источника, его последующее тепловое расширение приводит к возникновению двух импульсов продольных акустических волн. Один из них проходит в призму-звукопровод (цифра 1 на рис. 9, а) и является зондирующим в данной системе, а другой через ОА-источник проходит в иммерсионную жидкость, при этом из-за рассогласования акустических импедансов жидкости и образца часть сигнала отразится от границы раздела жидкость-образец (цифра 2, рис. 9,а). Оставшаяся часть импульса проходит внутрь образца и может быть использована для измерения скорости звука в нем.

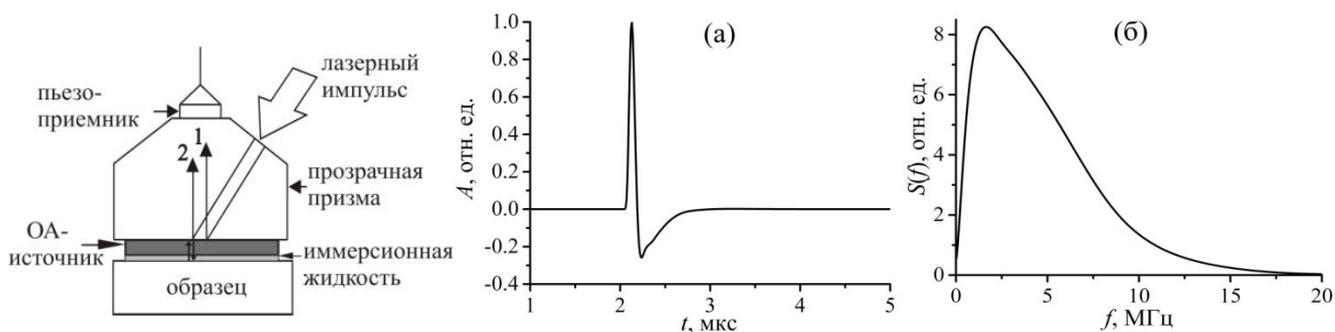


Рис. 9. Используемый оптико-акустический преобразователь (рефлектометр) (а), амплитудный (б) и фазовый (в) спектры зондирующего импульса.

§ 4.6 посвящен количественной оценке локальной пористости лазерно-ультразвуковым методом по измеренной величине акустического импеданса материала. Преимущество такой методики заключается в том, что нет необходимости в измерении толщины образца, что позволяет применять ее для объектов переменной толщины и сложной формы.

Импеданс образца может быть рассчитан по измеренным амплитудам опорного (отраженного от кварцевой пластины с известным импедансом) и отраженного от исследуемого образца сигналов с использованием следующей формулы:

$$Z_c = Z_{H_2O} \frac{1+R}{1-R} = Z_{H_2O} \frac{A_{ref} + R_{ref}A}{A_{ref} - R_{ref}A}. \quad (9)$$

Для учета рассеяния на шероховатой поверхности вместо амплитуд отраженных ультразвуковых сигналов предложено использовать максимальные значения их первообразных

$I(t) = \int_{-\infty}^t U(\tau) d\tau$ , где  $U(\tau)$  – временной профиль регистрируемого ультразвукового сигнала. Тогда

для расчета акустического импеданса исследуемого образца вместо (9) будет использоваться выражение:

$$Z_c = Z_{H_2O} \frac{I_{max\ ref} + R_{ref}I_{max}}{I_{max\ ref} - R_{ref}I_{max}}, \quad (10)$$

где  $I_{max\ ref}$  и  $I_{max}$  – максимальные значения первообразных отраженных ультразвуковых сигналов для опорной пластины и исследуемого образца соответственно. Возбуждение зондирующих импульсов и прием импульсов, отраженных от исследуемого объекта осуществляли с использованием лазерно-ультразвукового рефлектометра. При этом на результат измерений влияет только разность  $I_{max\ ref}$  и  $I_{max}$ , а амплитуда сигнала, возбуждаемого в ОА-источнике, влиять не будет. Относительная погрешность измерения  $I_{max\ ref}$  и  $I_{max}$  определяется отношением сигнал/шум для системы регистрации акустических сигналов. Для используемой установки погрешность  $\Delta I/I \approx 1-1.2\%$ , что приводит к относительной погрешности измерения акустического импеданса  $\Delta Z/Z \approx 1.6-1.8\%$ . По измеренному акустическому импедансу может быть рассчитана пористость материала. Из зависимостей модуля всестороннего сжатия и

модуля Юнга от соотношения объемов твердой фазы образца (без пор) и полного объема всего образца, можно получить выражение, связывающее фазовую скорость продольной акустической волны в материале и его пористость. В случае малой пористости ( $P \leq 20\%$ ) для изолированных сферических пор оно может быть записано в виде [11]:

$$C_{\text{comp}} = C_0 \sqrt{1 - P^{2/3}}, \quad (11)$$

где  $C$  и  $C_0$  – фазовые скорости продольных акустических волн для аналогичных по составу пористого и беспористого образцов соответственно. С использованием (11), акустический импеданс пористого композитного образца может быть выражен следующим образом:

$$Z_c = \rho C = \rho_0 C_0 (1 - P) \sqrt{1 - P^{2/3}} = Z_0 (1 - P) \sqrt{1 - P^{2/3}}. \quad (12)$$

Для проверки правильности методики проведен тестовый эксперимент по измерению акустических импедансов материалов с заранее известными свойствами (сталь, алюминий, латунь), результаты совпали со справочными данными в пределах погрешностей измерений. Далее представленная методика применялась для исследования перекрестно-армированных и однонаправленных образцов углепластика. Примеры результатов измерения локальной пористости по данной методике приведены на рис. 10, а (для перекрестно-армированных) и рис 10, б (для однонаправленных образцов). Локальность тестирования составляла 2-3 мм в плоскости укладки углеродной ткани. Выявлена существенная локальность величины пористости для обоих типов образцов и показано, что локальная пористость в выбранном участке может отличаться от средней по объему более чем в два раза. Полученные результаты согласуются с данными рентгеновской томографии.

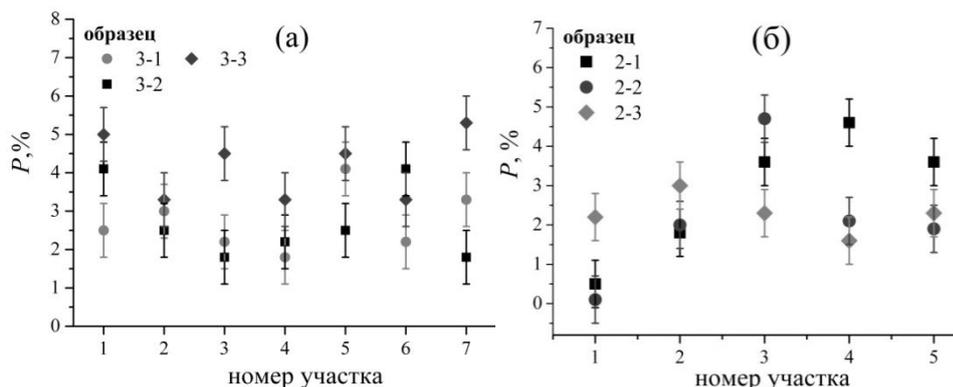


Рис. 10. Локальные значения пористости для перекрестно-армированных (а) и однонаправленных (б) углепластиков.

В §4.7. предложено оперативно оценивать локальную пористость материала по величине скорости продольных ультразвуковых волн в образце, измеренной по разности  $\Delta T$  времен прихода на пьезоприемник импульса, отраженного от границы раздела вода-композит, и импульса, отраженного от тыльной поверхности композита толщиной  $H$ :  $C_{\text{comp}} = 2H/\Delta T$ . По измеренным скоростям ультразвука с использованием формулы (11) были получены величины локальной пористости  $P$  для углепластиковых плоскопараллельных образцов. Проведено

сравнение результатов с результатами, полученными по методу из §4.6, а также с данными рентгеновской томографии. Некоторое расхождение объясняется тем, что данный метод не учитывает дисперсию, однако при невысоких пористостях (менее 3-4%) такой метод можно использовать для оперативной предварительной оценки состояния образца или конструкции.

**Глава 5** посвящена количественному исследованию состава углепластиков. Известно, что из-за несовершенства технологий производства в углепластиках может присутствовать неравномерность содержания матрицы и наполнителя, что негативно влияет на его прочностные свойства. Для этой цели также использовался лазерно-ультразвуковой метод (схема с односторонним доступом к объекту). Используемая экспериментальная установка была полностью аналогична представленной § 4.6 с соответствующими параметрами лазерного излучения. В § 5.1. описана методика расчета объемного содержания полимерной матрицы в углепластике по измеренным фазовым скоростям продольных акустических волн в образце. Для этого используется формула:

$$C_{\text{comp}}^2 = \frac{1}{\rho_{\text{comp}}} \left[ \frac{n}{\rho_{\text{matr}} C_{\text{matr}}^2} + \frac{(1-n)}{\rho_{\text{fill}} C_{\text{fill}}^2} \right]^{-1}, \quad (13)$$

где  $\rho_{\text{comp}}=n\rho_{\text{matr}}+(1-n)\rho_{\text{fill}}$ ,  $n$  – объемное содержание матрицы,  $\rho_{\text{matr}}$ ,  $\rho_{\text{fill}}$ ,  $C_{\text{matr}}$ ,  $C_{\text{fill}}$  – плотности и скорости звука для полимерной матрицы и углеродного наполнителя соответственно. Пример полученной зависимости скорости ультразвука от концентрации матрицы в углепластике показан на рис. 11, а.

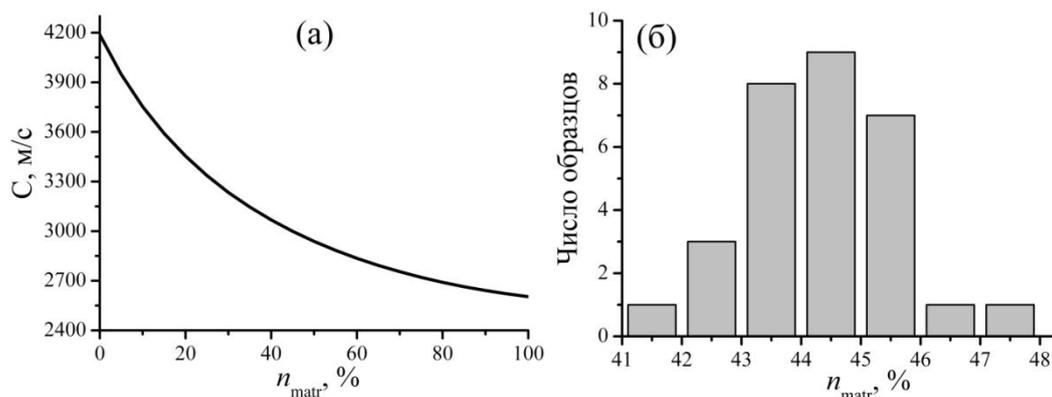


Рис. 11. Зависимость фазовой скорости ультразвука от содержания матрицы в углепластике (а) и примеры распределения локальной объемной концентрации матрицы для серии образцов (б).

В §5.2. описаны исследуемые углепластики. В данной главе исследовались перекрестно-армированные композиты, ориентация армирующих волокон в последовательных плоскостях укладки составляла  $-45^{\circ}/0^{\circ}/45^{\circ}$ . Выбор таких образцов был обусловлен тем, что наличие уложенных под разными углами слоев является важным фактором, влияющим на неоднородность распределения связующего в образце. В §5.3. было проведено исследование равномерности объемного содержания матрицы и наполнителя для двух серий

плоскопараллельных углепластиковых образцов (рассматривалась их центральная область 1\*1 см). Получены распределения числа образцов по величине объемной концентрации матрицы - количество образцов, соответствующее измеренной объемной концентрации. Пример такого распределения приведен на рис. 11, б. Установлено, что концентрация матрицы в исследованных образцах неравномерна, выявлены образцы как с недостатком матрицы, так и с ее избытком. Оценена средняя концентрация в двух сериях образцов, и показано, что в пределах погрешности она согласуется с заводскими данными, предоставленными производителем материала. В § 5.4 была исследована конструкция –трехстрингерная углепластиковая панель. Получены распределения объемной концентрации матрицы в плоскости укладки углеродной ткани (число участков измерений с определенной величиной концентрации) для двух типов областей с различной конфигурацией. Результаты показали, что конфигурация участка конструкции оказывает влияние на неравномерность объемного содержания матрицы. Полученные величины средней объемной концентрации по всем исследованным участкам соответствуют данным, заявленным производителем.

В **Заключении** кратко сформулированы основные результаты работы и выводы.

### **Основные результаты и выводы**

1. Продемонстрировано использование лазерного оптико-акустического метода для восстановления одномерного пространственного распределения коэффициента экстинкции лазерного излучения на длине волны 1064 нм по глубине ферромагнитной жидкости. Показано, что объемная концентрация магнетита, тип акустической границы и свойства несущей жидкости оказывают влияние на относительное изменение коэффициента экстинкции света с глубиной. В разбавленных ферромагнитных жидкостях на водной и керосиновой основах с объемной долей магнетита 0.35%-4.2% при акустически жесткой границе наблюдается рост коэффициента экстинкции с глубиной (на длине волны 1064 нм) по сравнению со случаем свободной границы. В этом случае появляется нелинейная зависимость коэффициента экстинкции света от концентрации жидкости на глубинах 200 мкм и более.
2. Впервые продемонстрировано использование лазерного оптико-акустического метода для наблюдения изменения коэффициента экстинкции лазерного излучения в нестабильных разбавленных ферромагнитных жидкостях на водной основе со временем. Обнаружено, что через 7 суток после разбавления величина усредненного по глубине коэффициента экстинкции уменьшается примерно на 20% от первоначального, а через 30 суток уменьшается в два раза. Снижение коэффициента экстинкции с течением времени является следствием образования агрегатов частиц в разбавленных жидкостях.

3. Продемонстрировано, что возбуждение зондирующих ультразвуковых импульсов лазерным излучением наносекундной длительности в специально подобранном оптико-акустическом источнике дает возможность реализовать широкополосную акустическую спектроскопию в диапазоне 1-10 МГц для углепластиков толщиной до 13-15 мм. Для углепластиков с различным объемным содержанием матрицы и наполнителя и различной средней пористостью были получены частотные зависимости фазовой скорости продольных акустических волн в диапазоне 1–10 МГц. Обнаружено, что во всех исследованных образцах наблюдается дисперсия фазовой скорости, причем она тем больше, чем выше пористость материала (от 60 до 350 м/с при пористостях материала от 0.1 до 4.2%). Получены эмпирические зависимости относительной дисперсии скорости ультразвука от пористости материала.
4. Показано совпадение в пределах точности измерений рассчитанных и экспериментально полученных частотных зависимостей фазовой скорости для образцов полимерной матрицы, беспористых и малопористых углепластиков в спектральном диапазоне частот 1-10 МГц, что подтверждает применимость приближенной локальной формы соотношений Крамерса-Кронига независимо от конкретного механизма потерь энергии ультразвуковых волн при распространении в материале.
5. Представлена методика количественной оценки пористости с лазерным возбуждением зондирующих импульсов, основанная на измерении акустического импеданса исследуемого образца. Обнаружено, что исследованные образцы перекрестно-армированных и однонаправленных углепластиков имеют неравномерное распределение пористости в плоскости укладки волокон. Рассчитана средняя объемная пористость образцов, которая составила от 0.1 до 4.7%. Результаты совпадают с данными рентгеновской томографии в пределах погрешности измерений.
6. Представлен метод определения локальных изменений объемного содержания полимерной матрицы и углеродного наполнителя в углепластиках по фазовой скорости ультразвука, основанный на лазерном возбуждении зондирующих ультразвуковых импульсов. Изменение объемного содержания матрицы на 3-4% соответствует изменению скорости звука на 40-50 м/с. Показана возможность обнаружения участков с избыточным и недостаточным содержанием матрицы, количественно оценено содержание матрицы в образцах и в выбранных областях углепластиковой конструкции. Результаты согласуются с данными, представленными производителем.

## Список публикаций

### Статьи в журналах Scopus, WoS, RSCI, а также в Перечне изданий МГУ:

- A1. Karabutov A.A., Sokolovskaya Yu G. Laser optoacoustic measurement of the volume concentration of epoxy resin in carbon fiber reinforced plastic composites. *Moscow University Physics Bulletin*, 2018, V. 73, № 6, p. 622-626. (Карабутов А.А., Соколовская Ю.Г. Лазерный оптико-акустический метод измерения объемной концентрации эпоксидной смолы в углепластиковых композитах. *Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия*, 2018, № 6, с. 45-49.) (WoS IF=0.672, доля вклада автора 0.7)
- A2. Karabutov A.A., Podymova N.B., Sokolovskaya Yu G. Local Kramers–Kronig relations between the attenuation coefficient and phase velocity of longitudinal ultrasonic waves in polymer composites. *Acoustical Physics*, 2019, V. 65, № 2, p. 158-164. (Карабутов А.А., Подымова Н.Б., Соколовская Ю.Г. Локальные соотношения Крамера-Кронига для коэффициента затухания и фазовой скорости продольных ультразвуковых волн в полимерных композитах. *Акустический журнал*, 2019, том 65, № 2, с. 182-189.) (WoS IF=0.856, доля вклада автора 0.7)
- A3. Sokolovskaya Yu G., Podymova N.B., Karabutov A.A. Verification of the Kramers-Kronig relations between ultrasonic attenuation and phase velocity in a finite spectral range for CFRP composites. *Ultrasonics*, 2019, V. 95, p. 37-44. (WoS IF=2.89, доля вклада автора 0.6)
- A4. Sokolovskaya Yu G., Podymova N.B., Karabutov A.A. Application of Laser-Ultrasonic Technique of Acoustic Impedance Measurement with Signals Detection by Backward-Mode Scheme for Porosity Content Evaluation in CFRP Laminates. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2020, V. 39, № 3. (WoS IF=1.995, доля вклада автора 0.8)
- A5. Sokolovskaya Yu G., Podymova N.B., Karabutov A.A. Application of the Laser Optoacoustic Method for Studying the Spatial Distribution of the Light Extinction Coefficient in Ferromagnetic Fluids. *Moscow University Physics Bulletin*, 2020, V. 75, № 4, p. 354-362. (Соколовская Ю.Г., Подымова Н.Б., Карабутов А.А. Применение лазерного оптико-акустического метода для исследования пространственного распределения коэффициента экстинкции света в ферромагнитных жидкостях. *Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия*, 2020, том 75, № 4, с. 55-63.) (WoS IF =0.672, доля вклада автора 0.7)
- A6. Sokolovskaya Yu G., Zharinov A.N., Karabutov A.A., Podymova N.B. Determinating the volume content of a polymeric matrix in CFRP structures using a laser-ultrasonic method. *Mechanics of Composite Materials*, 2020, V. 56, № 2, p. 185-194. (WoS IF=1.333, доля вклада автора 0.7)
- A7. Sokolovskaya Y.G., Podymova N.B., Karabutov A.A. Laser optoacoustic method for measurement of light extinction coefficient and investigation of its spatial distribution in colloidal media. *International Journal of Thermophysics*, 2020, V. 41, p. 86. (WoS IF=1.608, доля вклада автора 0.7)
- A8. Sokolovskaya Y.G., Podymova N.B., Karabutov A.A. Laser optoacoustic method for quantitative porosity assessment of carbon fiber reinforced plastic composites based on acoustic impedance measurement. *Acoustical Physics*, 2020, V. 66, № 1, p. 81-88. (Соколовская Ю.Г., Подымова Н.Б., Карабутов А.А. Лазерный оптико-акустический метод количественной оценки пористости углепластиков на основе измерения их акустического импеданса. *Акустический журнал*, 2020, том 66, № 1, с. 86-94.) (WoS IF=0.856, доля вклада автора 0.8)
- A9. Sokolovskaya Yu G., Podymova N.B., Karabutov A.A. Laser optoacoustic study of the structural inhomogeneity of a magnetic fluid by reconstruction of the spatial distribution of the light extinction coefficient. 2020. *Acoustical Physics*, V. 66, № 3, p. 268-276. (Соколовская Ю.Г., Подымова Н.Б., Карабутов А.А. Исследование структурной неоднородности магнитной жидкости посредством восстановления пространственного распределения коэффициента экстинкции света с использованием лазерного оптико-

акустического метода. *Акустический журнал*, 2020, т. 66, № 3, с. 284-293.) (WoS IF=0.856, доля вклада автора 0.7)

A10. Sokolovskaya Y.G., Podymova N.B., Karabutov A.A. Quantitative evaluation of porosity in unidirectional CFRPs using laser ultrasonic method *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2020, V. 56, № 3, p. 201-208. (Соколовская Ю.Г., Подымова Н.Б., Карабутов А.А. Количественная оценка пористости однонаправленных углепластиков с использованием лазерно-ультразвукового метода. *Дефектоскопия*, 2020, № 3, с. 14-22.) (WoS IF=0.692, доля вклада автора 0.7)

A11. Sokolovskaya Yu G., Podymova N.B., Karabutov A.A. Using Broadband Acoustic Spectroscopy with a Laser Source of Ultrasound to Study the Frequency Dependences of the Phase Velocity of Longitudinal Acoustic Waves in Porous Carbon Fiber Reinforced Plastic Composites *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2021, V. 85, № 1, p. 93-97. (Соколовская Ю.Г., Подымова Н.Б., Карабутов А.А. Исследование частотных зависимостей фазовой скорости продольных акустических волн в пористых углепластиках с использованием широкополосной акустической спектроскопии с лазерным источником ультразвука. *Известия Российской академии наук. Серия физическая*, 2021, том 85, № 1, с. 127-133.) (Scopus IF=0.476, доля вклада автора 0.7)

A12. Sokolovskaya Y.G., Podymova N.B., Karabutov A.A. An Optoacoustic Method for Analyzing Spatial Inhomogeneity of Light Extinction and Its Time Variations in Diluted Magnetic Fluids. *Colloid Journal*, 2021, V. 83, № 2, p. 245-251 (Соколовская Ю.Г., Подымова Н.Б., Карабутов А.А. Оптико-акустический метод для анализа пространственной неоднородности экстинкции света и ее изменения со временем в разбавленных магнитных жидкостях. *Коллоидный журнал*, 2021, том 83, № 2, с. 214-221.) (WoS IF=0.937, доля вклада автора 0.8)

A13. Sokolovskaya Y.G., Podymova N.B., Karabutov A.A. Application of broadband laser-ultrasonic spectroscopy for nondestructive testing of the porosity in carbon fiber reinforced plastics with various volume contents of carbon fibers. *Inorganic Materials:Applied Research*, 2021, V. 12, № 5, p. 1428-1433 (Соколовская Ю.Г., Подымова Н.Б., Карабутов А.А. Применение широкополосной лазерно-ультразвуковой спектроскопии для неразрушающего контроля пористости углепластиков с различным объемным содержанием углеродного волокна. *Перспективные материалы*, 2021, № 3, с. 76-84.) (Scopus IF=0.75, доля вклада автора 0.7)

A14. Sokolovskaya Yu G., Podymova N.B., Karabutov A.A. Analysis of changes in optical properties with time as a way to assess the instability of the structure of diluted aqueous-based ferromagnetic fluids. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2021, том 532. (WoS IF=2.993, доля вклада автора 0.7)

#### Статьи в научных журналах из перечня ВАК РФ:

A15. Соколовская Ю.Г., Карабутов А.А. Лазерно-ультразвуковая дефектоскопия конструкций из мультиаксиальных полимерных композиционных материалов. *Конструкции из композиционных материалов*, 2018, № 1, с. 56-61. (доля вклада автора 0.8)

A16. Соколовская Ю.Г., Жаринов А.Н., Карабутов А.А. Применение лазерно-ультразвукового метода для контроля неоднородностей распределения полимерной матрицы в углепластиковых конструкциях. *Контроль. Диагностика.*, 2018, № 9, с. 48-53. (доля вклада автора 0.8)

A17. Соколовская Ю.Г., Подымова Н.Б., Карабутов А.А. Лазерно-ультразвуковой метод измерения акустического импеданса для определения пористости перекрестно-армированных углепластиков. *Контроль. Диагностика.*, 2020, № 3, с. 56-63. (доля вклада автора 0.7)

#### Публикации в сборниках трудов конференций:

A18. Alexander Karabutov, Yulia Sokolovskaya, Varvara Simonova, Alexey Zharinov, Igor Kudinov Laser ultrasound testing of CFRP composite strings mechanical properties в сборнике *5th International Symposium*

on Laser-Ultrasonics and Advanced Sensing (LU2016), Book of Abstracts, место издания RECENDT-Research Center for Non Destructive Testing GmbH Austria, тезисы, с. 100.

A19. Соколовская Ю. Г. Лазерно-ультразвуковой контроль изделий из полимерных композитных материалов в сборнике *Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам "Ломоносов - 2016". Секция "Физика"*, место издания *Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова*, том 2, тезисы, с. 6-7

A20. Sokolovskaya Yu G., Karabutov A.A. Nondestructive evaluation of porosity in carbon fiber reinforced plastic materials by laser-ultrasonic method в сборнике *13th School on Acousto-Optics and Applications*, 2017 место издания *National University of Science and Technology MISIS, Moscow*, тезисы, с. 57.

A21. Соколовская Ю. Г. Измерение пористости углепластиковых композитных материалов методом лазерно-ультразвуковой дефектоскопии в сборнике *XXIV Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам "Ломоносов-2017". Секция "Физика". Сборник тезисов*, место издания *Москва, Физический факультет МГУ*, с. 514.

A22. Соколовская Ю.Г., Карабутов А.А. Диагностика структурных особенностей и повреждений в полимерных композиционных материалах с использованием лазерного оптико-акустического метода в сборнике *Труды третьей международной конференции "Деформирование и разрушение композиционных материалов и конструкций (DFCMS-2018)", посвященной 80-летию ИМАШ РАН*, место издания *М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований*, с. 128-129

A23. Соколовская Ю.Г., Подымова Н.Б., Карабутов А.А. Дисперсионные соотношения для коэффициента затухания и фазовой скорости акустических волн в полимерных композиционных материалах. Сборник *Научная конференция «ЛОМОНОСОВСКИЕ ЧТЕНИЯ». Секция физики. 15-25 апреля 2019.*, Москва.

A24. Соколовская Ю.Г., Подымова Н.Б., Карабутов А.А. Проверка выполнения локальных соотношений Крамерса-Кронига для коэффициента затухания и фазовой скорости продольных акустических волн в полимерных композиционных материалах с использованием лазерного оптико-акустического метода. Сборник *Программа и аннотации докладов XXXII-ой сессии Российского акустического общества*, 2019, серия *ISBN 978-5-89118-800-6, М.: ГЕОС*, с. 102-103

A25. Sokolovskaya Yu G., Podymova N.B., Karabutov A.A. Laser optoacoustic method for measurement of light extinction coefficient in colloid media в сборнике *20th International Conference on Photoacoustic and Photothermal Phenomena 2020 (ICPPP20)*.

A26. Соколовская Ю.Г., Подымова Н.Б., Карабутов А.А. Исследование пространственного распределения коэффициента экстинкции света в ферромагнитных жидкостях с использованием лазерного оптико-акустического метода в сборнике *Сборник тезисов докладов научной конференции «Ломоносовские чтения 2020». Секция физики*, издательство *Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова (Москва)*, с. 5-7.

A27. Соколовская Ю.Г., Подымова Н.Б., Карабутов А.А. Исследование частотных зависимостей фазовой скорости продольных акустических волн в пористых углепластиках с использованием широкополосной акустической спектроскопии с лазерным источником ультразвука. *Сборник трудов XVII Всероссийской школы-семинара «Волновые явления в неоднородных средах» имени А.П. Сухорукова («Волны-2020»)*, серия *Секция 8. Акустика неоднородных сред*, с. 2-5

A28. Соколовская Ю.Г., Подымова Н.Б., Карабутов А.А. Исследование изменения оптических свойств разбавленных магнитных жидкостей со временем с использованием лазерного оптико-акустического метода. Сборник трудов *Ломоносовские чтения 2021 секция Физика. Тезисы докладов*, с. 18-20

A29. Соколовская Ю.Г., Подымова Н.Б., Карабутов А.А. Исследование нарушений периодичности структуры углепластиковых композиционных материалов лазерно-ультразвуковым методом. *Труды школы-семинара «Волны-2021»*, серия *Акустика неоднородных сред*, издательство *Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова (Москва)*, с. 43-45

A30. Соколовская Ю.Г., Подымова Н.Б., Карабутов А.А. О возможности использования лазерного оптико-акустического метода для исследования ферромагнитных жидкостей. *Сборник трудов XXIV Международной конференции «Новое в магнетизме и магнитных материалах»*, серия *Секция 11. Магнитные наноструктуры*, место издания *Москва*, тезисы, с. 11-74-11-77

### **Список цитируемой литературы**

1. Гусев В.Э., Карабутов А.А. Лазерная оптоакустика. М.: Наука, 1989. 305 с.
2. Patel C.K.N., Tam A.C. Pulsed optoacoustic spectroscopy of condensed matter // *Review of Modern Physics*. 1981. V. 53. N 3. P. 517-550.
3. Такегоми С., Тикадзуми С. Магнитные жидкости: Пер. с японск. М.: Мир, 1993, 272 с.
4. Ерин К.В. Об изменении распределения частиц и агрегатов по размерам при разбавлении магнитных жидкостей // *Коллоидный журнал* 2017. Т. 79. № 1. С. 32-37
5. Mohapatra D.K., Philip J. Investigations on magnetic field induced optical transparency in magnetic nanofluids// *Optical Materials*. 2018. V. 76. P.97
6. Zhao Y., Zhang Yu., Lv R., Wang Q, Novel optical devices based on the tunable refractive index of magnetic fluid and their characteristics // *Opt. Laser. Eng.* 2012 V. 50. P. 1177-1184
7. Nsengiyumva W., Zhong S., Lin J., Zhang Q., Zhong J., Huang Yu. Advances, limitations and prospects of nondestructive testing and evaluation of thick composites and sandwich structures: A state-of-the-art review. // *Composite Structures*. 2021. V. 256, 112951.
8. Chimenti D.E. Review of air-coupled ultrasonic materials characterization // *Ultrasonics*. 2014. V. 54. P. 1804–1816.
9. Труэлл Р, Эльбаум Ч., Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела: пер. с англ. М.: Мир, 1972, 307 с.
10. Dong F., Wang X., Yang Q., Liu H., Xu D., Sun Y., Zhang Y., Xue R., Krishnaswamy S. In-situ measurement of Ti-6Al-4V grain size distribution using laser-ultrasonic technique. // *Scripta Materialia*. 2018. V. 154. P. 40-44.
11. Lee H.T., Ando S., Coenen J.W., Mao Y., Kasada R., Riesch J., Ueda Y. Micro- and macro-elastic properties of tungsten fiber-reinforced tungsten composites probed by nano-indentation and laser ultrasonics. // *Nuclear materials and energy*. 2019. V. 19. P. 262-266
12. O'Donnell M., Jaynes E.T., Miller J.G. Kramers-Kronig relationship between ultrasonic attenuation and phase velocity. // *Journal of the Acoustical Society of America*. 1981. V. 63. N3. P. 696-701.
13. Поляков В.В., Головин А.В. Влияние пористости на скорости ультразвуковых волн в металлах // *Письма в ЖТФ*. 1994. Т. 20. Вып. 11. С. 54-57.