НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ "ДАЛЬСТАЦДАРТ"

На правах рукописи

Кондратьев Александр Иванович

УДК 620.179

ИССЛЕДОВАНИЕ БЕСКОНТАКТНЫХ МЕТОДОВ ВОЗБУЖДЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ 01.04.06 Акустика

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-матеметических наук

Научный руководитель старший научный сотрудник, к.ф.-м.н. Бондаренко А.Н.

Хабаровск-1983 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 5

ГЛАВА I. РЕГИСТРАЦИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ 12

1. Выбор методов регистрации 12
2. Измерение колебаний лазерными интерферометрами 14
3. Емкостный црием УЗ-колебаний 20

ГЛАВА 2. ЕМКОСТНЫЙ МЕТОД ВОЗБУВДЕНШ 28

1. Краткий аналитический обзор.... 28
2. Анализ работы емкостного преобразователя 29
3. Экспериментальные исследования. Обсуждение резуль­татов 47

ГЛАВА 3. ВОЗБУВДЕНИЕ УЗ-КОЛЕБАНИЙ ЭЛЕКТРОИСКРОВЫМ МЕТОДОМ. 64

* 1. Краткий аналитический обзор 64
  2. Анализ механизмов возбуждения 65
  3. Экспериментальные исследования. Обсуждение резуль­татов 76

ГЛАВА 4. ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД ВОЗБУВДЕНШ УЗ-КОЛЕБАНИЙ 92

1. Краткий аналитический обзор 92
2. Теоретический анализ механизмов возбуждения 93
3. Описание экспериментальной установки 110
4. Экспериментальные результаты и их обсуждение....... НО

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 135

ЛИТЕРАТУРА 138

ПРИЛОЖЕНИЯ 151

П.І. Методика измерения скорости продольных УЗ-волн с

помощью емкостных преобразователей 151

П.2. Методика измерения дисперсии скорости и затухания

продольных УЗ-волн 156

П.З. Методика измерения скорости сдвиговых волн 163

П.4. Акты внедрения 168

з

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

*С* - скорость света *Л* - длина волны света

* длительность лазерного импульса *&* - коэффициент отражения света

Хо - интенсивность оптического излучения *Есв* - энергия оптического излучения «к - коэффициент температуропроводности *Л -* коэффициент теплопроводности *<£д* - коэффициент линейного распифения *£* - сила *Р* - давление

* константы Ламе

*а і* - скорость продольных УЗ-волн *о2* - скорость сдвиговых УЗ-волн *Ейк* - энергия, переносимая ультразвуковым импульсом *Р* - плотность материала

нормальная и касательная составляющие напряжений *и, М\*.* - компоненты смещений в ультразвуковом импульсе *V* - колебательная скорость *г,* 2. - координаты

* длина £ - время
* длительность ультразвукового импульса *J-* - частота ультразвуковых колебаний

*R}L}C.* - сопротивление, индуктивность и емкость *і* - ток

*U -* напряжение *Кус ~* коэффициент усиления

*Н(1)~* единичная функция Хэвисайда *т.* дельта функция

УЗ - импульс - ультразвуковой импульс ЭП - эффективность преобразования

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время значительно возрос интерес к бесконтакт­ным, широкополосным методам возбуждения ультразвуковых (УЗ) коле­баний . Это обусловлено необходимостью повышения точности

измерения упругих характеристик материалов, увеличения чувстви­тельности к выявлению мелких дефектов; необходимостью ввода УЗ- колебаний в образец с необработанной или горячей поверхностью и т.д. Так, например, в работе [4J указывалось на то, что наличие промежуточных слоев между пьезопреобразователем и образцом не по­зволяют проводить измерения скорости и затухания ультразвука с погрешностью менее 10“% и *1%* соответственно. Кроме того, узко- полосность пьезопреобразователей не обеспечивает возможности од­новременного измерения этих параметров в широком диапазоне частот и не позволяет оперативно исследовать структуру материалов. Приме­нение бесконтактных методов, например, оптических позволяет уст­ранить этот недостаток [III-II4] и открывает возможности для по­вышения точности измерения акустических величин.

Бесконтактные методы возбуждения можно разделить на следую­щие группы: электромагнитные; ударные; потоками быстрых частиц; емкостный; электроискровой и оптический (щелевой метод [2]здесь не будет рассматриваться, т.к. он обладает ярко выраженными резо­нансными свойствами). В настоящее время наиболее полно исследова­ны электромагнитные методы возбуждения *[ 1-2]* . Однако эти методы

обладают низкой эффективностью преобразования электромагнитной

7 9

энергии в акустическую ( ~ 10 \* 10 ), которая к тому же резко

падает с увеличением частоты и зависит от материала образцов.

Ударные методы возбуждения целесообразно применять в диапа­зоне частот до I МГц, т.к. граничная частота ) пропорциональ­на ( V, )\*■ [з] ( V# - скорость ударника относительно образца, в

котором возбуждаются УЗ-колебания). Для увеличения *£гр* необхо­димо увеличивать ^ до очень больших значений ( ^ 10^ 4- 10 м/с), цри этом происходит разрушение поверхности образца.

При взаимодействии потоков быстрых частиц (электронов, про­тонов, оС - частиц) с поверхностью образца генерируются УЗ-коле-

*Р\* 7

бания достаточно высокой амплитуды ( ~ 10 +10 Па) и длитель­ностью в несколько десятков наносекунд *[2]* . Недостатками этого метода являются: сложность и громоздкость оборудования; необхо­димость радиационной защиты; сложность управления сечением пучка частиц.

Емкостный метод[20-26] , не обладая дистанционностью (в отличие от остальных методов), имеет по сравнению с пьезоэлектри­ческим то преимущество, что при его осуществлении преобразователь не находится в акустическом контакте с образцом. Этим методом возбуждались УЗ-импульсы (в режиме радиоимпульсов) амплитудой до 10^ Па и частотой от I МГц до 1000 МГц.

Электроискровой метод f 51-53] являясь самым цростым, по-ви- димому, позволяет возбуждать УЗ-импульсы с достаточно широким спектром и может быть использован для имитации сигналов акустиче­ской эмиссии или калибровки пьезоцреобразователей [54] . Однако литературных данных об амплитудно-временных параметрах УЗ-импуль- сов, генерируемых этим методом, нет.

Оптический метод [62-106] , интенсивно развивающийся с по­

явлением мощных лазеров, позволяет возбуждать в образцах из раз­личных материалов УЗ-импульсы наносекундного диапазона [ 107 J амплитудой до 10^ \* 10® Па [100, 101] . Единственным недостат­

ком этого метода является относительная сложность существующих лазерных устройств.

Несмотря на достаточно широкий ряд теоретических и экспери­ментальных работ бесконтактные методы возбуждения УЗ-колебаний

изучены еще недостаточно полно ***[z]*** , не исследованы амплитудно­временные параметры УЗ-импульсов и влияние на них различных фак­торов, не определены коэффициенты преобразования электромагнитной энергии в акустическую, не получено аналитических выражений для расчета формы УЗ-импульсов. Эти недостатки обусловлены тем, что в большинстве работ (за исключением [24,25,107] ) для приема УЗ- колебаний использовались пьезопреобразователи.

В связи с перспективностью бесконтактных методов возбужде­ния УЗ-колебаний и недостаточно полной их изученностью в работе рассмотрены три метода: емкостный, электроисщювой и оптический.

Целью настоящей работы является: детальное исследование емкостного, электроискрового и оптического методов возбуждения УЗ-колебаний с применением широкополосных бес­контактных методов их регистрации.

В соответствии с поставленной целью решались следующие зада­чи:

1. Выбрать методы регистрации УЗ-колебаний.
2. Исследовать амплитудно-временные параметры УЗ-импульсов.
3. Определить зависимость параметров УЗ-импульсов от условий

возбуждения:

а) от параметров возбуждающего электрического импульса; размера электрода и силы прижатия его к образцу - при емкостном методе возбуждения;

б) от параметров разрядной цепи; способа возбуждения и расстояния от разрядника до образца - при электро­искровом методу возбуждения;

в) от интенсивности, длины волны, длительности лазерного импульса; температурной зависимости коэффициента по­глощения и от наличия покрытий на поверхности образца - при оптическом методе возбуждения.

1. Исследовать механизмы возбуждения, приводящие к генера­ции УЗ-колебаний при электроискровом и оптическом методах возбуж­дения.
2. Определить эффективность преобразования электромагнитной энергии в акустическую, установить пути ее повышения.

Защищаемые положения диссертационной работы можно сформули­ровать следующим образом.

1. Емкостный метод позволяет возбувдать УЗ-импульсы длитель­ностью от десятков наносекунд до единиц микросекунд, амплитудой до 2\*10“^ м.
2. При электроискровом методе возбуждения основным механиз­мом генерации УЗ-колебаний является действие ударной волны, воз­никающей в искровом канале. Временная форма генерируемых УЗ-им- пульсов не зависит от параметров разрядной цепи.
3. Оптический метод позволяет возбуждать в металлах УЗ-им-

8 ТТ

пульсы длительностью порядка 10 с и менее (до КГХ с), ампли­тудой до 7\*10”® м.

1. Одним из механизмов генерации УЗ-колебаний является дей­ствие ударной волны, возникающей вследствие теплового пробоя,воз­духа вблизи поверхности образца.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения.

В первой главе диссертации обосновывается необходимость применения бесконтактных методов регистрации УЗ-колебаний. Приво­дятся характеристики и описания двухлучевого лазерного интерферо­метра и емкостного преобразователя (исследование характеристик емкостного преобразователя в режиме приема широкополосных УЗ-им- пульсов проведены автором в работе *[19]* ).

Построение глав 2-4 одинаково и их содержание состоит из краткого аналитического обзора и оригинальной части, состоящей

из теоретических и экспериментальных исследований.

Вторая глава посвящена емкостному методу возбуждения. В те­оретической части приводится анализ работы емкостных преобразова­телей в режиме излучения: исследовано влияние силы прижатия и ог­раниченности размеров возбуждающего электрода на параметры УЗ-им- пульсов; приводятся выражения для расчета коэффициента преобразо­вания электрической энергии в акустическую. В экспериментальной части проводится сопоставление результатов измерений с теорией. Показано, что выражения, полученные для расчета формы УЗ-импуль- сов, достаточно хорошо согласуются с экспериментом; увеличение си­лы прижатия приводит к уменьшению длительности УЗ-импульса [30- 32, эффективность преобразования цропорциональна квадрату амплитуды возбуждающего электрического импульса и обратно пропор­циональна кубу толщины диэлектрической прокладки, максимальная величина коэффициента преобразования для слюдяной прокладки тол-

К *А*

щиной 10 м составляет 1\*10 .

В третьей главе приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований электроискрового метода возбуждения УЗ-колебаний. Основное внимание уделялось термоупругому действию тока разряда и ударной волне. Показано, что термоупругий вклад

*rj*

проявляется при значениях зарядной емкости *(С )* более 5 \* 10” Ф (одним из электродов является сам образец); при возбуждении иск­рой, возникающей на расстоянии от образца форма УЗ-импульса обус­ловлена действием ударной волны [ 55] , получено приближенное выражение для расчета формы УЗ-импульса, дающее погрешность ме-

*гу*

нее *50%* цри *RC <* 5\*10 с ( *R -* сопротивление разрядной це­пи); для увеличения эффективности преобразования необходимо уменьшать /? и увеличивать пробивное напряжение *Unpf* значение коэффициента преобразования при *-* 1500 В, *Я* = 0,03 0м сос-

*п*

тавило величину ^ 6\*10 .

В четвертой главе цриведены теоретические и эксперименталь­ные результаты для оптического метода возбуждения. Исследовано влияние температурной зависимости коэффициента поглощения, длины волны лазерного излучения и наличие покрытий на амплитудно-вре­менные параметры УЗ-импульсов и эффективность преобразования оп­тической энергии в акустическую. Установлено, что основными меха­низмами возбуждения является термоупругость и давление ударной волны, возникающей вследствие теплового пробоя воздуха (при воз­буждении в вакууме испарение материала с поверхности образца)

*[109]* . Температурная зависимость коэффициента поглощения при­

водит к более быстрому росту амплитуды УЗ-импульсов от интенсив­ности лазерного излучения [108] ; увеличение длины волны света

приводит к изменению формы УЗ-импульса, причем эти изменения на­иболее заметны при малых значениях диаметра лазерного пучка [НО] Наличие на поверхности образца тонких пленок воды, масла или ту­ши приводит к значительному увеличению амплитуды УЗ-импульса при интенсивности лазерного излучения меньше некоторых пороговых зна­чений, эффективность преобразования увеличивается при этом пример- но в 100 раз (слой воды) и достигает значений ~ 5\*10 .

Основные выводы предлагаемой работы можно сформулировать следующим образом.

1. Бесконтактными методами возбуждаются УЗ-импульсы в широ­ком диапазоне частот, определяемом для емкостного и оптического методов длительностями электрического и лазерного импульсов соот­ветственно. Для электроискрового метода спектр частот УЗ-импульса определяется,в основном, состоянием воздуха вблизи поверхности образца и при нормальных условиях составляет цримерно 0-7 МГц.
2. Эффективность преобразования и амплитудно-временные пара­метры УЗ-импульсов определяются для емкостного метода: силой при­жатия электрода к образцу; параметрами возбуждающего электриче-'

ского импульса; диаметром электрода; материалом и толщиной диэ­лектрической прокладки.

Для оптического метода: параметрами оптического импульса; диаметром лазерного пятна; длиной волны лазерного излучения; сос­тоянием поверхности образца.

*п*

Для электроисрокового метода (при *С ^* 5\*10 Ф только ЭП и амплитуда): величиной пробивного напряжения; параметрами разряд­ной цепи.

На основании проведенных исследований были разработаны ме­тодики бесконтактного измерения скорости и затухания УЗ-волн.

В приложении приведены: описание установки для измерения групповой скорости УЗ-волны с применением емкостных преобразова­телей; методика измерения дисперсии скорости и затухания УЗ-волн [lI2, ИЗ] : методика измерения скорости сдвиговых волн оптиче­ским методом [ill] . В заключении приведены акты внедрения.

Основные материалы диссертации опубликованы в работах [19, 30,32,41,55,108-113,118] и научно-техническом отчете [31] .

Результаты работы докладывались: на смотр-конкурсах моло­дых ученых НПО ’’Дальстандарт" (1978,1982г.г.), на Всесоюзном фи­зическом семинаре (г.Хабаровск,1979г.), на Всесоюзной конференции по прикладной физике (г.Хабаровск,1981г.) и на международной кон­ференции (г.Москва, 1982г.).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты, полученные в настоящей работе можно сформулировать следующим образом.

Емкостный метод возбуждения.

1. Получены простые выражения, позволяющие рассчитывать амплитудно-временные и энергетические параметры УЗ-импульсов с погрешностью менее 30%.
2. Впервые теоретически и экспериментально исследовано влия­ние силы црижатия электрода к образцу на амплитудно-временные и энергетические параметры УЗ-импульсов. Показано, что увеличение силы прижатия приводит к уменьшению амплитуды и длительности УЗ- импульсов, а также к уменьшению коэффициента преобразования элект­рической энергии в акустическую. При этом, когда давление элект­рода на образец превосходит 3\*10^ Н/м2 коэффициент преобразования слабо зависит как от материала образца прокладки, так и от дли­тельности возбуждающего электрического импульса.

Электроискровой метод.

1. Впервые показано, что основными механизмами возбуждения

в случае, когда одним из электродов разрядника является сам обра­зец является термоупругость, обусловленная нагревом искрового ка­нала током разряда, и ударная волна, обусловленная резким выделе­нием тепла в искровом канале в начальной стадии развития пробоя. Причем термоупругость проявляется при больших значениях разрядной

п

емкости *С* 5\*10 Ф). При возбуждении искрой, возникающей

в разряднике, находящемся на некотором расстоянии от образца ос­новное действие оказывает ударная волна.

1. Получено приближенное выражение, позволяющее рассчиты­вать амплитуды УЗ-импульсов с погрешностью менее 50%.
2. Впервые показано, что для увеличения эффективности пре­образования необходимо уменьшать сопротивление разрядной цепи *R* и увеличивать пробивное напряжение.
3. Впервые показано, что временные параметры УЗ-импульса практически не зависят от параметров разрядной цепи и пробивного

п

напряжения (при *С <* 5\*10 Ф).

Оптический метод возбуждения.

1. Впервые экспериментально исследованы амплитудно-временные параметры УЗ-импульсов, возбуждаемых лазерным излучением. Показа­но, что при малых интенсивностях излучения *Т0* длительность и фор­ма ультразвукового и лазерного импульсов совпадают. При интенсив­ностях, близких к пороговому значению теплового пробоя *Inof>* , на амплитудно-временные параметры УЗ-импульса существенное влияние оказывает температурная зависимость коэффициента поглощения. При 10>Х*п0р* УЗ-импульс состоит из "короткой" составляющей амплиту­дой *Цт* и "полки" амплитудой *ипол* длительностью равной Z/'tf,-#,)/#» определяемой искрой теплового пробоя (где £ - толщина образца;

*Q17* Я? - скорости продольной и сдвиговой волн). Получены доста­точно точные выражения для расчета *Um* и *Un0Jf .*

1. Впервые исследовано влияние длины волны лазерного излуче­ния на параметры УЗ-импульса.
2. Впервые показано, что увеличение интенсивности свыше

ТО О то р

2,5\*10 Вт/м в воздухе или вакууме и 1,2\*10 Вт/м при нанесе­нии покрытий из воды, масла или туши нецелесообразно, так как при значениях *10* выше этих пределов эффективность преобразования оп­тической энергии в акустическую снижается. Максимальное значение эффективности, реализованное в настоящей работе, составило величи­ну ~ 5\*10“^ (покрытие из воды *10* = 9\*10^ Вт/м^).

1. На основании результатов исследований разработаны:устрой­ство для измерения скорости УЗ-волн с применением емкостных преоб­

разователей; методика измерения дисперсии скорости и затухания продольных УЗ-волн; методика измерения скорости сдвиговых волн оп­тическими методами.

Работа выполнена в лаборатории оптико-механических измере­ний научно-производственного объединения "Дальстандарт".

Автор искренне признателен за поддержку и постоянное внима­ние к работе своему научному руководителю к.ф.-м.н., старшему на­учному сотруднику А.Н.Бондаренко.

Автор выражает также глубокую благодарность сотрудникам объединенияЖБ. Дроботу, В.П.Троценко, В.И.Архипову, Ю.М.Крини- цыну, С.Е.Подымахину, В.А.Луговому, С.А.Гусакову и всему коллек­тиву лаборатории за многочисленные,полезные обсуждения, ценные замечания по вопросам, затронутым в диссертации, а конструктору СКВ В.Г.Возжаеву за разработку и изготовление дифференциального усилителя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шкарлет Ю.М. Бесконтактные методы ультразвукового контроля.- М.: Машиностроение, 1974, 56 с.
2. Буденков Г.А., Гуревич С.Ю. Современное состояние бесконтакт­ных методов и средств ультразвукового контроля (обзор).- Дефек­тоскопия, 1981, № 5, с.5-33.
3. Гольдсмит Д.Удар.-М.: Стройиздат, 1965,-420с.
4. Труэл Р., Эльбаум Ч., Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела.-М.: Мир, 1972, 307 с.
5. Королев М.В. Широкополосный апериодический преобразователь

ультразвуковых колебаний.-Дефектоскопия, 1973, № 4, с.12-16.

1. ***Tomas HJ., Warren С. W. Ап Optica В method of measurement***

Qmatt \!Lirakon$- Pklt. Мац., 1928, *v.* S} a/33, p. 112S-1138.

1. ***PaBmer С. H. Green R. E. OpblcoB proUng of J\ со и siie emission u/ove$, A/ondesiruc-Liue fevCiQuoiion of MaleriaPs. (ocfiitd***

***Burke, V Weiss.- PEenum Presst //ew York and London1197E p.347-379,***

1. Троценко В.П. Разработка и исследование оптических методов и средств измерения малых акустических сигналов на основе стабиль­ных газовых лазеров. Автореф.дисс.канд.техн.наук.-Ленинград,

1978, 21 с.

1. Бондаренко А.Н., Маслов Б.Я., Троценко В.П. Оптическая установ­ка для измерения сверхмалых акустических колебаний.- Приборы и техника эксперимента, 1975, № 6, с.211-213.
2. Бондаренко А.Н., Троценко В.П. Многолучевой интерферометр для измерения сверхмалых амплитуд механических колебаний.- Измери­тельная техника, 1978, № 7, с.56-57.
3. Борн М., Вольф Э. Основы оптики.- М.: Наука, 1973- 719 с.
4. *KoEsky H. The phopQCjQlion of- stress Pи fats In Vcseoe- 2q site SoPic/8V.JppP. Phys.t 1Q5Bt aer. S} v. 10,*

/> *693* - *110.*

1. *Akko&t Bot-ег F.} OoBdsmM IK £ Pa site wave propose - Ыоп Cn Qn Єхропеп4шР rod. —Ini. У. Mecfi. StiXf 4920, V.QS, \*4, p. 199-гОІ.*
2. Гитис Н.Б., Добромыслов В.М., Сажин В.В. Определение некото­рых параметров датчиков ультразвуковых дефектоскопов.- Дефек­тоскопия, 1971, № I, с.51-57.
3. ***WadBey И. А/. Sc.ru 6 и СВ. Л Stud и of deformation and frcttlure processes ui Q tow- яііоу si ее. P &у***

*О со us tic emission irQn$ie.nt QnctPysis, — Лсій. Met.^* ***19791 v. £7t л/ 41 p. S1&- 61G.***

1. Брагинский В.Б., Манукин А.Б. Измерение малых сил в физиче­ских экспериментах.- М.: Наука, 1974, - 151 с.
2. Брагинский В.Б., Митрофанов В.П. и др. Измерение слабых акус­тических волн при помощи емкостного датчика.- Приборы и тех­ника эксперимента, 1971, № 4, с.241-244.
3. Брагинский В.Б. Физические эксперименты с пробными телами.- М.: Наука, 1970, - 136 с.
4. Бондаренко А.Н., Дробот Ю.Б., Кондратьев А.И. Применение ем­костного метода для регистрации коротких акустических импуль­сов.- Дефектоскопия, 1981, № 5, с.109-11I.
5. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике.- М.: Изд-во И.Л., 1957, - 520 с.
6. ***Leg ros iewinder ~Z v BiguQrd P. Ge.nirolion of***

***UPI rfi Sound Gy Q diePee inc. Transduced. - tJ. Л со и si. Soc. Jnter.} 1972, v.52, a/1} p. 196-Ш.***

*ZZ, Сопіте tt И. Vr. f &re.QseotE М.Л. CapocUive. driver* ***Jiniie OmpEilude. uilrQeonit wQve$ in So Sid S.*** *—* ***Jfi>siks. Pop. 7ib- Xni. Syrnp' A/onhn Jtcousi bPQcsit\*^, 1916, И. /, p. 9<?~g4***

1. ***Con-irePt у.Н.Зг., BreaseoiP M.A. CctpecUive driver Jor measurement of- и tiro sonic v^ove \/tiocii^ Cn Soiids\* — IdHrQ sorties. Symp. Pt'Of. MiPivQnkeP ? h/ew York / 19741 p. 539.***
2. **Болтарь K.O., Мансфельд Г.Д. Возбуждение ультразвуковых им­пульсов в твердых телах. - Приборы и техника эксперимента, 1977, № I, с.128-131.**
3. **Болтарь К.О., Котелянский И.Н., Мансфельд Г.Д. Исследование диэлектрического электроакустического преобразователя.- Акуст. ж., 1977, т.23, №4, с.544-549.**
4. ***Mbrfftnsiern (г. BBeclrookusUScbtг ЕІееіггеі ЗйНШъ- wctndier-, — Jkusiiка / 197$, v. 40, p. %f-90.***
5. ***Иеппіоп СLe>\*Lnder J. <4 пей/ prLnzipPt -for ifte de- $Lfyn of eon denser eltcirei -£rQn$ducers, — Jf. Jtcousf, Зое. Jtmer.? 1972, v. S3 f у A, p. 12$9- 1231.***
6. **Стреттон Дж.А. Теория электромагнетизма . - М.-Л.: Гостехиз- дат, 1948, - 456 с.**
7. **Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. - М.: Наука, 1968, - 558 с.**
8. **Бондаренко А.Н., Дробот Ю.Б., Кондратьев А.И. Возбуждение уп­ругих колебаний емкостным методом.- Дефектоскопия, 1979,№ 6, с.99-101.**
9. Исследование методов генерации и измерений малых ультразву­ковых перемещений поверхности твердых тел (диапазон частот I кГц-30 МГц, диапазон амплитуд 5\*Ю~84-Ю”^м): Отчет (НПО "Дальстандарт", руководитель темы А.Н.Бондаренко. - Тема 16.02.15.06, № ГР 76047269, инв № Б744845.-Хабаровск, 1979,

131 с., ил.

1. Дробот Ю.Б., Кондратьев А.И., Луговой В.А. Возбуждение корот­ких упругих импульсов емкостным методом.- Дефектоскопия,1983,

№ 3, с.35-37.

1. Ворович И.И., Александров В.Н., Бабешко В.А. Неклассические смешанные задачи теории упругости.-М.: Наука, 1974, - 455с.
2. Краткий справочник металлиста под ред.Малова А.Н.- М.: Маши­ностроение, 1972, - 81 с.
3. Навацкий В. Теория упругости.- М.: Мир, 1975,,- 872 с.
4. Филиппов И.Г., Егорычев О.А. Нестационарные колебания и диф­ракция волн в акустических и упругих средах.-М.: Машинострое­ние, 1977, - 303с.
5. Гакенхеймер Д. Численные результаты в задаче Лэмба о действии сосредоточенной единичной нагрузки.- Прикладная механика, 1970,

№ 2, с.272-273.

1. Гакенхеймер Д., Макловиц К. Неустановившееся возбуждение упру­гого полупространства движущейся над его поверхностью точеч­ной нагрузкой.- Прикладная механика, 1969, № 3, с.131-135.
2. ***Рок this С L The Seismic SutJ-oce Pu^se Proceedings oj. ihe /\/оШпоё Jcademy of faiences f i9S&7 v. i4,***

***p. tfSQ-HO.***

1. ***£oson G. The T}L$p£ctce.men-Ls Produced Cn on***

*НйЦ Space a Sadenitf. JppPicd ^urfQce Force. — у of ihe InsiUuie. of Ма+ето&ся and I^s JppPi — cohortst 1966, v. V* ***/,*** *p. 299-32$.*

1. Кондратьев А.И. Возбуждение сдвиговых волн емкостным методом.

В кн.: Использование современных физических методов в нераз­рушающих исследованиях и контроле. Тез.докл.,Хабаровск, 1981,

1. с.98-99.
2. Бейтмен Т., Эрдэйен А. Справочная математическая энциклопе­дия. Таблицы интегральных преобразований, т.I-М.: Наука, 1969, 343 с.
3. Климова Д.Н., Огурцов К.И. Количественные оценки упругих волн напряжений в плоской задаче Лэмба. В сб.: Исследования по уп­ругости и пластичности.- Л.: ЛГУ, 1966, № 5, с.34-44.
4. М. Fa **h** Рапе **W.** The Sound kodiaUon **-j-yom a** Condenser JJisefjCtrge. *—* PhiP. №a£ 1934f v. 1$f p. <£4-26.
5. Абрамсон H.C., Гегечкори H.M. Осциллографическое исследование искрового канала.- ЖЭТФ, 1951, т.21, № 4, с.484-492.
6. Гегечкори Н.М. Экспериментальные исследования искрового кана­ла разряда.- ЖЭТФ, 1951, т.21, № 4, с.493-506.
7. Сканави Г.И. Физика диэлектриков (область сильных полей)- М.: Изд-во физ.-мат. лит-ры, 1958, 907 с.
8. Мик.Дж.Крэгс Дж.Электрический пробой в газах.- М.: Изд-во иностр.лит-ры, 1966,- 605 с.
9. Davies д. Й. Shock wQves in Mr qI pressures.—

The pyoc.eedin<fs of ^he Physical Societyf 194&, v. *6/,*

*У* 344, f>. 105-- HD.

1. Драбкина С.И. К теории развития канала искрового разряда.- ЖЭТФ, 1951, т.21, № 4, с.475-483.
2. А.С. 637166 (СССР) Импульсный акустический излучатель (Днеп­ропетровский Ордена Трудового Красного знамени гос.университет Авт.изобрет. А.И.Жосан, Д.Н.Артеменко.- Заявл. 16.02.77,

№ 2457751/18-10; МКИ ВОб 1/02; Открытия, изобретения,пром. образцы, товарные знаки, 1978, № 46, с.16.

1. Пат. 3782177 (США) *tfeiod and oppardiur for non did rue* - *4 іcts 4е$4іл£ j JlisLtjnor 4o jrfic Uniitd Sifties о-jr -the. A/a-LionoP J-tro паи tits and Spact Jldministration* , *Wo- shin^ion*, *Л. С*. ^ Авт.изобрет. *ІУ1. H. Удтез 9 G-. Hose?* ; —- Заявл. 20.04.72; № 246.056: Опубл.01.04.74; МКЙ *G* 0129/04; НКИ 73-71 5v.- Способ испытания материалов без их разрушения и аппаратура для осуществления этого способа.
2. Chytiien А/. Stress u/Qvt propQcjaUon Jrom eieciric.Q */* dishorcjz on PindricaP aPu minium **rod.** — UEirosounds^

*/97$, 16, v £, p. 69 -76.*

1. Грешников В.А., Дробот Ю.Б. Акустическая эмиссия.-М.: Изд-во Стандартов, 1976, - 271 с.
2. Жуковский С.С., Кондратьев А.И. К использованию электроискро­вого метода возбуждения УЗ-колебаний.- В кн.: Использование современных физических методов в неразрушающих испытаниях и контроле. Тез.докл.,Хабаровск, 1981, ч.2, с.100-101.
3. Новацкий В. Вопросы термоупругости.- М.: изд-во АН СССР,

1962, - 380 с.

1. Новацкий В. Динамические задачи термоупругости.- М.: Мир,

1970, - 256 с.

1. Броуд Г. Расчеты взрывов на ЭВМ. Гидродинамика взрывов. Серия

новое в зарубежной науке. Механика. - М.: Мир, 1976,вып.4,-

270 с.

1. Даниловская В.И. Температурные напряжения в упругом полупрост­ранстве, возникающие вследствии внезапного нагрева его границ.- Прикладная матем. и мех.,1950, т.14, № 3, с.316-318.
2. Даниловская В.И. Температурное поле и температурные напряже-

ния, возникающие в упругом полупространстве, вследствии пото­ка лучистой энергии, падающей на границу полупространства.- Изв. АН СССР, отд.техн.наук., мех. и машиностроение, 1959,

№ 3, с.129-134.

1. Даниловская В.И., Зубчанинова В.Н. Температурные напряжения, возникающие в цилиндрах под действием светового потока. -Физ. и хим. обработки материалов, 1969, № 4, с.16-18.
2. *РоРтег Л.У.7 J-smus J.F, J of homo^tnisQiiDn and*

**dispersion** of Poser **Induced** и/Qvej. - JppP, 4Q?0,

**v-0, \*4 Л *&37-339.***

1. Kuioirp К .j Yoshi/iiko //, Optical! EyUalion of- <Acoti$4ik putsB in SoPids.— Japan> JfppS • PhtjS.} 19731 v.yl3l

***л/ 6t p. &Q4.***

1. XuBoia к, DpUkaP exc.Ue.cJ ePafiic wQves in SePids. *—*

**SoEids** SMe. Communs 1971, v. 9 \*/<23 a.<204S~-c!D47.

> \* • */ /*

1. Бункин Ф.В., Комиссаров В.М. Оптическое возбуждение звуковых волн (обзор).-Акуст.ж., 1973,т.19, № 3, с.305-320.
2. PerSiYQP С. М. l~Q$e.r- Genet-died sitess ti/4Ves ino Dis­persive ера sice. Hod. - y. of Jppf. PhijS' j 1967t *V.* 38, АГ 13, p. 5313-S3IS.
3. Catome В Г CPark МЛ. MocPiet С.В Gznira-iion о-f- Jfoousiic

C:\Users\Pavel\AppData\Local\AppData\Local\Temp\FineReader11.00\media\image88.png

*v* у J

Ritiu Laser-induced Te^maP Situs

***Iwnsitnts. - Jtfft. Ptyt. Uit., Мі, V. 4-, » 6. p. 95-97.***

1. Бункин Ф.В., Карлов H.B. и др. Возбуждение звука при поглоще­нии лазерного импульса поверхностным слоем жидкости.-Письма в ЮТФ, 1971, т.13, № 9, с.479-483.
2. Божков А.И., Бункин Ф.В., Савранский Б.В. Генерация звука в жидкости при облучении ее поверхности лазерным импульсом с мо­дулированной интенсивностью.-Письма в ЖГФ,1975,т.I,№9,с.435-43 9
3. Божков Л.И., Бункин Ф.В. Генерация звука в жидкости при пог­лощении в ней лазерного излучения с модулированной доброт­ностью.- Квантовая электроника, 1975,т.2,№ 8,с.17бЗ-177б.
4. Батыгин Н.М., Букатый В.И., Хмелевцев С.С. Генерация акусти­ческих волн, возникающих в процессе взаимодействия лазерного импульса с водой.- Акуст.ж., 1976,т.22,№ 5,с.652-656.
5. ***ВеРВ Масса iPe &.S. Shoe# wave generation in dir Qncf in Water Ct?3 - ТЕЛ Paser radiation •— ЛррР.***

***Opt. , 1974, v. 10, p. 1037- 1031.***

1. *Bushonam Babnes, Г. Laser generated iherwodPasiic*

***shock braves, in Piguids. — J. voc. and TechneP^***

***7973 v. 10, « £f p. 1037 ~ 1032.***

1. Ашмарин Н.И. и др. Ударные волны, возникающие при воздействии лазерного импульса на прозрачные тела.-В сб.: Квантовая элект­роника, № 6 - М.: Сов.радио,1971, с. 126-128.
2. EichPer Н. } Sioften И.Тепто Р exti-to tion of и№ro sonic

***leaves ёц Poser Light. —Opt oommuns.j 197£t >vj p.£?39-<?4/.***

1. Похов Ю.М., Моспанов B.C., Фивейский Ю.Д. Термоупругие напря­жения в твердых прозрачных диэлектриках, возникающие под дей­ствием фокусированного луча лазера.- В сб.: Квантовая электро­ника, № 3, - М.: Сов.радио,1971, с.67-72.
2. Лямшев Л.М., Наугольных К.А. Оптическая генерация звука. Не­линейные эффекты (обзор).-Акуст.ж.,1981, т.27, № 5,с.641-649.
3. Еремченко Д.В., Морозов Б.Н. Термоупругие напряжения, возни­кающие в прозрачном диэлектрике под действием несфокусирован­ного лазерного излучения.-Физика твердого тела, 1970,т.12,

№ 3, с.848-851.

1. йас/cfes л. Є BLuoh C.F., WiPktnsort С. *Д* W. Jcousi u/Qvl generation IhbOUflb €$£C ^У05 'І'йб li Ve mixSlng of ImsO dig It і &£Qm$. B^mpos. Иос/. Dplies*,* Л/йи/ Voyk} A/- *V. ,*

***і 96 7. - ВмкРіп г А/. Y. t Po Ptjtechn Ptess, 196 7 p. 219-242.***

1. Савиных Г.A. 0 возбуждении звука при взаимодействии двух ла­зерных лучей.- В сб.: Нелинейная оптика. Новосибирск: Наука, 1968, с.415-417.
2. Макшанцев Б.И., Ковалев А.А. 0 воздействии излучения ОКГ на твердые прозрачные диэлектрики.- Квантовая электроника, 1975, т.2, № 7, с.1552-1554.
3. Bushanom & Bornes P.S. laser- generaiecf iermoePtts- **їіс $hotk** wove **Cn Picjuicfs.- У. ЛррР. PhyS. f 197Sf** v. **46,** */і;* **p.** 2074**-зоіг.**
4. Бонч-Бруевич A.H., Разумова Т.К., Старобогатов И.О. Исследо­вание возникновения ультразвуковых волн в поглощающих и проз­рачных жидкостях при прохождении мощного оптического излуче­ния.” Письма в ЖГФ, 1975, № I, № 2, с.65-68.
5. Ивакин Е.В. Интерференционно-оптическое возбуждение акустиче­ских колебаний в поглощающих средах.- Письма в ЖТФ, 1976,т.2, № 10, с.466-469.
6. Скибарко А.П., Базунов И.В. и др. Генерация УЗ волн при облу­чении поверхности тела модулированным по интенсивности свето­вым потоком.- Тр.Моск.авиац.ин-та, 1975, вып.332,с.5-137.
7. Есипов И.В., Наугольных К.А. Об оптической генерации звука. Материалы IX Всес.акуст.конф.,1977, секц.4, М., 1977, с.17-19.
8. Лямшев Л.М., Седов Л.В. К теории генерации звука.- Акуст.ж., 1977, т.23, № 3, с.411-419.
9. Косаев С.Г., Лямшев Л.М. Генерация звука при поглощении моду­лированного лазерного излучения в жидком полупространстве с крупномасштабными неровностями границы.- Акуст.ж.,1977,т.23,

№ 2, с.265-272.

1. Косаев С.Г., Лямшев Л.М. О генерации звука в жидкости лазер­ными импульсами произвольной формы. - Акуст.ж.,1978,т.24,

№ 4, с.534-539.

1. Лямшев Л.В. Об оптической генерации звука в жидком полупрост­ранстве при наличии слоя другой жидкости на его границе.- Акуст.ж., 1977, т.23, №5, с.788-796.
2. Лямшев Л.М. Оптическая генерация звука в жидком полупростран­стве, граничащим с твердым слоем.- Акуст.ж.,1979, т.25,№ 4, с.566-574.
3. Бурмистрова Л.В., Карабутов А.А., Руденко О.В., Черепецкая Е.Б. О влиянии тепловой нелинейности на термооптическую генерацию звука.-Акуст.ж. ,1979, т.25, №4, с.616-619.
4. Дунина Т.А., Егерев С.В., Лямшев Л.М., Наугольных К.А. К не­линейной теории теплового механизма генерации звука лазерным излучением.- Акуст.ж., 1979, т.25, №4, с.622-625.
5. RoQch J.F.j ZacjLeiocjP У. М. Shack wqvc (jenerQiion

*in dtePechic. PitjLficfs QsLncj Ц - swihihecl Posers. — Phot.*

***IEEE, 1969, v.SPf a/9f p. І693 - 1691.***

1. f?e.Qdy *У.* F. laser - produced shock and ihztr rePaUon

***io moieriaP domocjt.- JE££. Quarti. EPtciron t 197&, v. 14, p. 79-it.***

1. Дунина T.A., Егерев С.В., Лямшев Л.М., Наугольных К.А.,Па­

шин А.Е. Гидродинамические эффекты при оптическом пробое жидкости.- Акуст.ж., 1982, т.28, № 2, с.192-201.

1. Аскарьян Г.А., Прохоров Г.Ф. и др. Возбуждение звука в жид­кости за счет испарения. - ЖЭТФ, 1963, т.44, № 2,с.180-184.
2. Буденков Г.А. Возбуждение упругих волн в твердом теле лучем

лазера вследствии термоупругого эффекта.-Дефектоскопия,1979,

№ 2, с. 75-81.

1. Буденков Г.А. Возбуждение волн в упругом полупространстве при тепловых воздействиях конечной длительности.- Дефектоско­пия, 1979, № 3, с.75-82.
2. *Гоу У.* Л.; Ьап Д.М laser induced stress u^aves in

6061*-* Тв aPuminium*. -* Jpj>P. Opt.f 1973, v. 12t л/ 11, p. 2S47- - 2S41.

1. Fox У. Я. Ejjeck of neater and pa ini too tin у s cm Pcrser- i\* radiated targets. - fypP- Phys. Lett%J 1974, v. 24, a/ 10, p. U1-4G4.
2. Кузнецов A.E. и др. Регистрация волн напряжения, вызываемых лучом ОКТ.- Физ. и хим. обработки металлов, 1968, № 3,с.3-6.
3. CaPder WiPeox W.W. TezhniCjut for mtQfure.me.nt of ePas-

*t*tic. constants Poser energy deposition.- Res. Seient.Initrum^ 1974, v. 4S] лі 12, p. 1SS7- 1&Г9.

1. Кржижановский P.E., Рожин О.Ф., Филиппов H.M. Направленность прямоугольного излучателя ультразвуковых импульсов, возбужда­емых излучением лазеров.-Дефектоскопия, 1980, № 4,с.107-109.
2. Siecjrist М.^ iCrteuPiihe F.K. Shock and compression By

TEA-СОг-Poser puise? d^ostieaPEg enhanced iy iicjuid Pagers Spread an surfaces of Sotids*. -* JppP. Phys. }

1973, v. 2, Af 1, p. 43-44.

1. ***И ay ее T. ^Л-tmistPad R.A.^ KtthP P. Laser-induced stresses in coated and anсоqted targets. - # Phys>., 197St***

v. *?* a/ S', p. 49% *-* SOM.

1. Бондаренко A.H., Дробот Ю.Б., Круглов С.В. Оптическое возбуж­дение и регистрация наносекундных импульсов цри неразрушающих испытаниях.-Дефектоскопия, 1976, № 6, с.85-88.
2. Бондаренко А.Н., Вологдин В.К., Кондратьев А.И. Влияние температурной зависимости коэффициента поглощения на форму акустического импульса при лазерном возбуждении.-Акуст.ж., 1980, т.26, № 6, с.828-832.
3. Архипов В.И., Бондаренко А.Н., Кондратьев А.И. Исследование возбуждения упругих импульсов лазерным излучением в метал­лах. -Акуст. ж. ,1982, т.28, №3, с.303-310.

НО. Архипов В.И., Бондаренко А.Н., Кондратьев А.И. Влияние дли­ны волны излучения на форму упругих импульсов при лазерном возбуждении.- Акуст.ж., 1984, т.30, № I, с.

1. Архипов В.И., Бондаренко А.Н., Кондратьев А.И. Измерение скорости сдвиговых волн оптическими методами. В кн.: Исполь­зование современных физических методов в неразрушающих иссле­дованиях и контроле.: тез.докл.,Хабаровск, 1981,часть 2, с. 173-175.

C:\Users\Pavel\AppData\Local\AppData\Local\Temp\FineReader11.00\media\image89.png

1. ***bondoh^nko Л М., Jjrotoh У Kondratyev М.Т UPlro$Ound yeBocity Parser Jfleier. PoAer Sessions. Tenth usortcf con-f. on non destructive Testing. Thyrsdafl^ ih Moscow t 19Z2, 12-с.21, р.гОі-г50.***
2. Бондаренко A.H., Кондратьев А.И., Измерение дисперсии ско­рости и затухания упругих волн- Акуст.ж.,1981, т.27, № I, с.51-55.
3. Бондаренко А.Н., Дробот Ю.Б., Вологдин В.К. Оптическое уст­ройство для измерения групповой скорости ультразвука.-Изме­рительная техника, 1980, № 3, с.68-69.
4. Анисимов С.И., Имас Я.Д., Романов Г.С., Ходыко Ю.В. Действие излучения большой мощности на металлы.-М.: Наука, 1970,-272с.
5. Мо/ы WE. } HqPP R.5. Expe.himentctP termqP aopPincj

*of hstr itotns, - J. Phys.' 197І, v. 49, p. ssst-'&et.*

1. Таблицы физических величин. Справочник под ред.Кикоина И.К.- М.: Атомиздат,1976, - 639с.
2. Kostenko MI., Sitocjanow *tflv* tfondmbiev A.I. ThtrmoPy enhoncecf ґ£$роп$е of meioP *-* oxide *-* metoP cfiodeg. - Opt*.* £ommun.; 19%if у-36, л/с?, p. 140~ 1Jf^t
3. Щукин В.А. Скорости распространения ультразвуковых волн в различных металлах и сплавах. - Дефектоскопия, 1977, № 3, с.65-68.
4. Шкиров B.C., Уральский М.П. Затухание и скорость ультразву­ка в некоторых титановых сплавах.- Дефектоскопия, 1974,№ 5, с.130-132.