

Министерство просвещения Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Уральский государственный педагогический университет»
Институт математики, физики, информатики
Кафедра физики, технологии и методики обучения физике и технологии

**Определение скорости и затухания ультразвука в расплавах фазо-
импульсным методом**

Выпускная квалификационная работа

Квалификационная работа

допущена к защите:

Усольцев Александр

Петрович

Зав. Кафедрой

Исполнитель:

Петрухин Александр Александрович,
студент группы ФИ-1931

подпись

дата

подпись

Научный руководитель:

Попель Петр Станиславович,
доктор физико-математических наук,
профессор

подпись

Екатеринбург, 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. СКОРОСТЬ И ЗАТУХАНИЕ УЛЬТРАЗВУКА КАК СВОЙСТВО, ЧУВСТВИТЕЛЬНОЕ К СТРУКТУРЕ ЖИДКОСТИ	5
2. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В ЖИДКОСТЯХ	10
3. МЕТОДИКА И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ И ЗАТУХАНИЯ УЛЬТРАЗВУКА ФАЗОВО-ИМПУЛЬСНЫМ МЕТОДОМ	22
3.1. Аппаратура измерения	22
3.2. Методика проведения измерений	30
3.3. Оценка погрешности измерений	31
4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ СРЕДНЕЙ ШКОЛЫ	34
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	54
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	55

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире науки и технологий ультразвук занимает ключевое место. Его уникальные характеристики обеспечивают его широкое применение в различных областях. В секторе медицинской техники, например, ультразвук особенно востребован. Он активно используется в ультразвуковых сканерах, эхографических аппаратах и других инструментах для диагностики и исследования разнообразных патологий. Кроме медицины, ультразвук находит свое применение и в промышленности: контроль качества, ультразвуковую сварку, склеивание, определение толщины и выявление дефектов в материалах, а также очистку изделий от различных видов загрязнений.

В представленной работе детально изложены подходы к использованию акустических технологий для анализа свойств расплавленных материалов. Неоспоримая значимость данного исследования заключается в критической роли акустических измерений в современной науке и промышленности. Акустические методы могут использоваться для контроля физических и химических свойств расплавов, что позволяет оптимизировать процессы производства и обеспечивать высокое качество конечной продукции.

Целью данной работы является описание методики и аппаратуры измерения акустических параметров расплавов импульсно-фазовым методом и создание методической разработки с использованием результатов исследования в учебном процессе средней школы.

Для достижения данной цели исследования были поставлены следующие задачи:

- 1) Изучить основные принципы распространения ультразвуковых волн в жидких металлах, полуметаллах и полупроводниках;

- 2) Изучить существующие подходы к определению акустических характеристик в жидкостях: краткое описание аппаратуры для измерений скорости распространения и затухания ультразвуковых волн в жидких металлах;
- 3) Освоить теоретические аспекты импульсно-фазовой техники и структуру экспериментальной установки: анализ ключевых компонентов установки, методические рекомендации к выполнению экспериментов и погрешность измерительных данных;
- 4) Составить планы внеклассных мероприятий, посвященных теме применения ультразвуковых технологий и анализа акустических характеристик в жидких средах.

1. СКОРОСТЬ И ЗАТУХАНИЕ УЛЬТРАЗВУКА КАК СВОЙСТВО, ЧУВСТВИТЕЛЬНОЕ К СТРУКТУРЕ ЖИДКОСТИ

Ультразвук представляет собой механические вибрации, превышающие порог человеческого слуха в диапазоне выше 20 кГц. Эти колебания передаются через среду в виде ультразвуковых волн, аналогично распространению фотонов света. Однако, в отличие от света, который может перемещаться через вакуум, ультразвук требует наличия материальной среды - будь то газ, жидкость, или твердое вещество – для своего распространения.

На заре XX века, с изобретением разнообразных радиоаппаратур и открытием принципа пьезоэлектричества, началось ускоренное развитие области ультразвуковой акустики. Ультразвук, обладая очень короткими длинами волн, от долей миллиметра до нескольких сантиметров, позволил внедрить акустические методы для глубокого изучения разнообразных материалов – от газов и жидкостей до твердых тел. При этом особенности ультразвука устраняют препятствия, связанные с контролем условий эксперимента, таких как температура, частота, давление и другие параметры. В результате, благодаря прогрессу в акустике стало возможным детальное изучение структуры материалов и изучение динамических процессов на молекулярном уровне. Это слияние идей и методов акустики и молекулярной физики способствовало появлению новой дисциплины – молекулярной акустики.

Сначала исходные данные экспериментов объяснялись на базе традиционной модели распространения акустических волн в материале, но наблюдаемые изменения в характеристиках, задающих этот процесс, стимулировали разработку новых концептуальных подходов. В контексте жидких металлов, полуметаллов и полупроводников эти изменения оказались минимальными, позволяя тем самым применять классическую модель для описания распространения ультразвуковых волн в данных средах.

В контексте механики сплошных сред, касаемо изучения изотропных материалов при анализе однонаправленного распространения плоских продольных волн, возникающих в результате механических нарушений в упругой и вязкой среде, используется замкнутая система уравнений, относящийся к области линейной акустики.

Уравнение движения:
$$\rho \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = \frac{\partial f}{\partial x} \quad (1)$$

Уравнение непрерывности:
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial t} \quad (2)$$

Реологическое уравнение состояния:
$$f = E \frac{\partial U}{\partial x} + \eta \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial t} \quad (3)$$

Уравнение состояния:
$$\delta P = \frac{1}{\beta_T} \frac{\delta \rho}{\rho} + \frac{\alpha_T}{\beta_T} \delta T \quad (4)$$

Уравнение энергии:
$$c_V \delta T - \frac{T \alpha_T}{\beta_T \rho^2} \delta \beta = 0 \quad (5)$$

Здесь ρ – плотность, U – смещение частицы, f – напряжение, E – эффективный модуль ($E = k + \frac{4}{3}\mu$, где k – модуль всестороннего сжатия, т.е. характеристика способности вещества сопротивляться всестороннему сжатию, μ – модуль сдвига), T – температура, η – эффективная вязкость, P – давление, β_T – изотермическая сжимаемость, α_T – температурный коэффициент расширения, c_V – теплоёмкость при постоянном объеме.

Основываясь на гипотезе об отсутствии объемной вязкости в сжимаемых материалах и, следуя системе уравнений, Стокс в 1845 году разработал уравнения, которые описывают распространение упругих волн в вязкой и сжимаемой среде:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} - v_S \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} - \frac{4}{3} \frac{\eta}{\rho} \frac{\partial^3 U}{\partial x^2 \partial t} =$$

где v_S - обозначает скорость адиабатического распространения фазы волны, которая, согласно уравнению Лапласа, определяется как:

$$v_S^2 = \frac{1}{\beta_S \rho} \quad (7)$$

В анализе феномена плоской гармонической волны, распространяющейся вдоль оси и испытывающей ослабление амплитуды из-за вязкости среды, выведено уравнение (6) в качестве решения.

$$U = U_0 e^{-\alpha x} \cos(\omega t - kx) \quad (8)$$

где ω обозначает циклическую частоту колебаний, k является волновым числом, определяющим количество волн на единицу длины, α – это амплитудный коэффициент поглощения, или коэффициент, характеризующий уменьшение амплитуды волны на единицу длины её распространения.

Вставив выражение для U , указанное в формуле (8), в уравнение (6), получаем следующее:

$$k^2 - \alpha^2 = \frac{\omega^2 v_S^2}{v_S^4 + \frac{16\eta^2 \omega^2}{9\rho^2}} \quad \text{и} \quad 2\alpha k = \frac{\frac{4\eta' \omega^2}{3\rho}}{v_S^4 + \frac{16\eta'^2 \omega^2}{9\rho^2}}$$

Исходя из предположения, что переменная $\frac{16\eta^2 \omega^2}{9\rho^2} \ll v_S^4$, Стокс получил уравнение для вычисления коэффициента поглощения звука:

$$\alpha = \frac{2\eta \omega^2}{3\rho v_S^3} \quad (9)$$

Кирхгоф усовершенствовал систему уравнений для замкнутых систем, включив в неё уравнение теплопроводности, указав на то, что затухание может быть вызвано не только вязкостью, но также и теплопроводностью среды:

$$T \frac{\partial s}{\partial T} = \frac{\kappa}{\rho} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (10)$$

где S обозначает энтропию, а \aleph является показателем теплопроводности. Внутри всего объема жидкости температура демонстрирует изменчивость, что обусловлено особенностями распространения ультразвуковых колебаний, протекающих без тепловых потерь. Это способствует перемещению тепловой энергии от участков с повышенной температурой к областям с пониженной температурой. Принимая во внимание поправку Кирхгофа, формулировка уравнения (9) модифицируется следующим образом:

$$\alpha = \frac{2\pi^2 f^2}{\rho v_s^3} \left[\frac{4}{3} \eta + \aleph \left(\frac{1}{c_V} - \frac{1}{c_P} \right) \right] \quad (11)$$

где α — коэффициент поглощения, f — частота звука, ρ — плотность среды, через которую распространяется звук, v_s — скорость звука в этой среде, η — динамическая вязкость среды, \aleph — показатель теплопроводности, c_V и c_P — удельные теплоемкости при постоянном объеме и давлении, соответственно. Эта формула позволяет эффективно рассчитывать потери акустической энергии при её распространении в различных средах, учитывая влияние температуры, давления и других физических свойств материала.

Уравнение (11), называемое формулой Стокса-Кирхгофа, вместе с соотношением Лапласа (7) выражают ключевые выводы в рамках классической теории распространения звуковых волн.

Взаимосвязь между скоростью распространения волны и ее поглощением в различных средах является результатом определенных физических параметров, как показывают формулы (7) и (11). В последнем уравнении подробно анализируются параметры, связанные с удельной теплоемкостью материалов и их способностью проводить тепло. Удельная теплоемкость, отражающая количество тепла, необходимое для изменения температуры вещества, сильно зависит от структуры и молекулярной динамики внутри вещества, тем самым подчеркивая ее значимость как структурно-чувствительного показателя.

Физический смысл коэффициента теплопроводности κ (из закона Фурье) состоит в том, что эта величина равна удельному тепловому потоку при единичном градиенте температур [4]. Прохождение теплового потока зависит от строения вещества. Таким образом, все величины в правой части уравнения (11): $\rho, v_s, \eta, \kappa, c_V, c_P$ – являются структурно-чувствительными характеристиками вещества. Следовательно, коэффициент поглощения является структурно-чувствительным параметром распространения упругой волны.

Дополнительно к основным характеристикам, таким как скорость волн и показатель поглощения, которые определяют поведение упругих волн, можно изучать влияние изменений условий равновесия, например, давления, температуры, и состава среды, на упомянутые параметры. Эти влияния описываются через производные величины и рассматриваются как второстепенные показатели.

$$\left(\frac{1}{v_s} \frac{\partial v_s}{\partial P}\right)_{T,X}; \left(\frac{1}{v_s} \frac{\partial v_s}{\partial T}\right)_{P,X}; \left(\frac{1}{v_s} \frac{\partial v_s}{\partial X}\right)_{P,T} \text{ и } \left(\frac{1}{\alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial P}\right)_{T,X}; \left(\frac{1}{\alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial T}\right)_{P,X}; \left(\frac{1}{\alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial X}\right)_{P,T}$$

где X – состав.

Анализируемые дополнительные характеристики распределения эластичных колебаний представляют собой физические свойства материала, проявляя вариации в межатомных связях под влиянием температуры и химической реактивности.

2. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В ЖИДКОСТЯХ

Фундаментальные методологии для создания экспериментальных процедур изучения металлических жидкостей были позаимствованы у специалистов в органической химии. В ходе анализа жидких металлов встречаются уникальные препятствия, обусловленные характеристиками исследуемых материалов. Важной проблемой является неспособность использовать оптические методики для определения акустических характеристик из-за непрозрачности этих веществ. Также, для изучения жидкометаллических сплавов, которые существуют при высоких температурах, требуется применение специальных звукоизолированных устройств с возможностью погружения в расплавленный материал и подключения к системе активного охлаждения.

Техники для измерения скорости звука классифицируются на прямые и косвенные. Прямые методы включают в себя определение, основываясь на измерении длины и времени прохождения звуковой волны через материал. Скорость вычисляется из уравнения:

$$v_s = \frac{h}{t} \quad (12)$$

где h и t – соответственно длина и время прохождения звукового импульса.

Косвенные техники включают изучение, проводимое через расчеты длины волны λ и частоты f аудиосигналов.

В данном контексте, скорость звука определяют:

$$v_s = \lambda f \quad (13)$$

На сегодняшний день в научном мире существует обширный арсенал исследовательских методик, включающий в себя как прямые, так и

косвенные методы измерений. Обе категории методов эволюционируют параллельно, без очевидного преимущества одной над другой в плане развития. В связи с этим, автор настоящего исследования считает целесообразным анализировать прогресс в области научных исследовательских методологий, следуя хронологическому принципу.

В 1925 году Пирс в Соединенных Штатах с помощью собственно разработанной аппаратуры, именуемой как ультразвуковой интерферометр Пирса, который позволял с высокой точностью измерять скорость распространения и уровень поглощения ультразвука в газах, выявил необычное поведение в углекислом газе. Он наблюдал выраженную дисперсию звука, то есть изменение скорости его распространения в зависимости от частоты, и отклонение в поведении коэффициента поглощения звука с изменением его частоты.

Интерферометр, названный в честь Пирса, также известен как интерферометр с единственным преобразователем. Это обусловлено использованием явления интерференции, когда две волны — одна излученная преобразователем, другая отраженная от перемещающегося зеркала, соединяются, создавая интерференционный рисунок.

Стандартный ультразвуковой интерферометр (см. рисунок 1) представляет собой акустическую камеру 1 с исследуемой средой, в которой пьезоэлектрическим преобразователем 2 возбуждаются ультразвуковые волны. На некотором расстоянии 1 от пьезопреобразователя расположен плоский рефлектор 5, от которого отражается волна, способный перемещаться вдоль распространения волны.

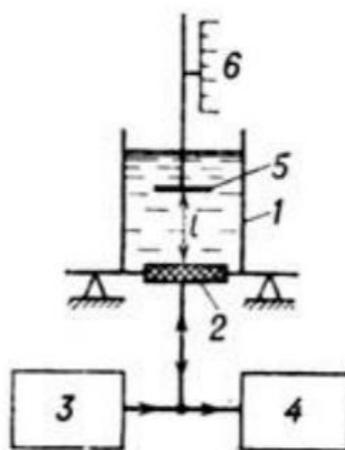


Рис.1. Блок-схема интерферометра, где 1 – акустическая камера, 2– пьезопреобразователь, 3 – генератор высокочастотного напряжения, 4 – схема регистрации, 5 – рефлектор, 6 – отсчетный механизм

Для достижения строгой параллельности, поверхности рефлектора и пьезоэлектрического преобразователя выравниваются между собой. В пространстве интерферометрической камеры создается акустическое поле, представлением которого служат плоские волны. Эти волны выполняют многочисленные отражения между преобразователем и рефлектором. Данный процесс корректен при условии, что размеры рабочих поверхностей обоих элементов в поперечном сечении существенно превосходят длину волны ультразвука. Отклик преобразователя на акустические воздействия квантифицируется через измерение напряжения U на его контактах, возникающего в результате возбуждения электрическим током от генератора. С изменением положения рефлектора, напряжение U показывает периодическую динамику от максимума к минимуму через каждые $\lambda/2$, где λ обозначает длину акустической волны в анализируемой среде. Скорость распространения ультразвука в среде вычисляется как $v_s = \lambda f$, тогда как значение коэффициента поглощения ультразвуковых волн можно определить через анализ уменьшения экстремумов на графике отклика или исследования их ширины.

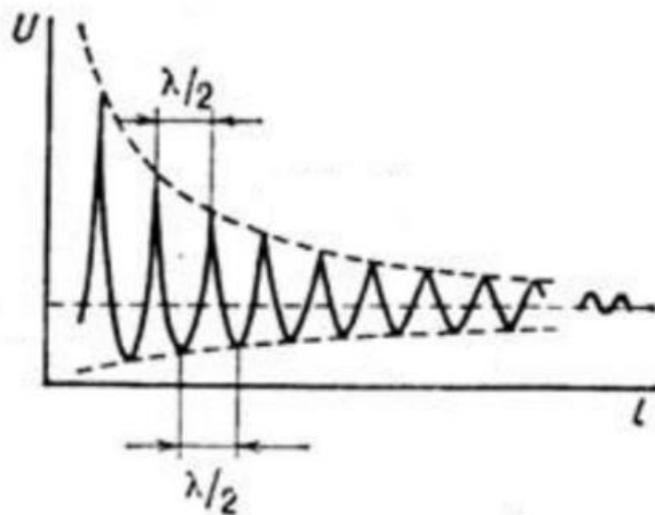


Рис. 2. Кривая реакции - зависимость напряжения U на пьезопреобразователе от расстояния l между рефлектором и пьезопреобразователем

Ключевой фактор, генерирующий систематические ошибки в анализируемой технике, заключается в диспаратности между актуальными условиями проведения эксперимента и идеализированными предпосылками о действии униформной волновой фронты, циркулирующей по линии детекции. Это расхождение особенно возрастает, когда длина волны не является незначительной по сравнению с габаритами оборудования, включающего камеру, детектор и отражатель, используемые в интерферометрии, приводя к дифракционным аномалиям, которые могут вносить искажения в итоговые измерения. В случае, когда отсутствует строгая параллельность между детектором и отражателем, а также наблюдается неоднородность в амплитуде и фазе волн на поверхности детектора, на графике зависимости U от l (длины волны) появляются нештатные пики и смещения в локациях стандартных экстремумов, что искажает результаты анализа.

В указанных источниках литературы [7] и [8] приведены данные о минимальных возможных относительных погрешностях в измерениях скорости распространения ультразвуковых волн, значения которых лежат в диапазоне от 10^{-4} до 10^{-6} . Для оценки поглощения ультразвуковой энергии материалом в мегагерцевом диапазоне частот, относительная погрешность

измерения коэффициента поглощения ультразвуковых волн находится в пределах от 2 до 20 на 10⁻². Авторы подчёркивают важность учета дифракционных искажений, которые могут значительно снизить точность измерений, и предлагают компенсировать эти погрешности путём введения корректирующих поправок. Они утверждают, что для правильного определения этих поправок целесообразно использовать численные методы расчета.

Использование интерференционного метода стало ключевым в анализе акустических свойств твердых тел, после чего значительно возросло число исследований, направленных на изучение изменений скорости распространения и поглощения ультразвуковых волн в различных средах, начиная с газов и заканчивая жидкостями. Со временем, было выполнено множество экспериментов и теоретических разработок, охватывающих широкий спектр условий — от перемен температуры и давления до фазовых переходов. Данные исследования способствовали глубокому пониманию молекулярной структуры газов и жидкостей. Кроме того, полученные результаты имеют значительное практическое применение в промышленности, где они служат для контроля технологических процессов через анализ данных об ультразвуковом поглощении и скорости.

Иновационную технику разработки предложили Вьюгов и Гуменюк, которые применили традиционный подход используя оборудование интерферометра с активацией единственного активного элемента и мобильного отражателя для проведения измерений. Для роли активного элемента выбрали стержень, материалом которого служило то же вещество, что и у изучаемого объекта. В рамках проведенного эксперимента удалось разрешить проблематику обеспечения акустической связи. Тем не менее, методика обладает ограничением: выполнение замеров возможно лишь в строго ограниченном диапазоне температур, приближенных к точке

кристаллизации изучаемого вещества. При этом, погрешность в рамках полученных данных колеблется между 0,2 и 0,3 процента.

Несколько исследователей, упомянутых в работах с 11 по 14 номер, также применили к своим экспериментам акустический интерферометр, работающий в режиме непрерывного излучения, который отличается упрощенной архитектурой и повышенной измерительной точностью. Для генерации акустических волн использовался излучающий пьезоэлектрический элемент, который размещался непосредственно в контакте с жидким металлом. Однако, такое размещение пьезоэлемента негативно сказалось на диапазоне температур, доступных для проведения измерений, сузив его пределы.

Метод, основанный на использовании импульсов, был впервые применен исследователями Пелламом и Галтом в Соединенных Штатах Америки, а также Ноздревым, Кошкиным и Яковлевым в Союзе Советских Социалистических Республик (см. рисунок 3).

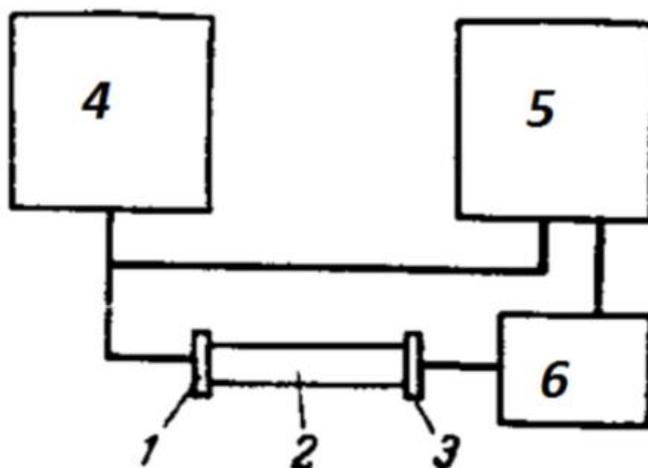


Рис.3. Блок-схема измерения скорости ультразвука импульсным методом:
1-пьезокристалл; 2-образец; 3-приемный пьезокристалл; 4-генератор.

Процесс излучения содержит последовательные шаги. При помощи кварцевого преобразователя, который функционирует циклически, внутрь изучаемого объекта направляются ультразвуковые волны. Эти волны, после

прохождения через объект, трансформируются обратно в электрические колебания. В этом контексте, возможно использование как одиночного преобразователя в сочетании с рефлектором, так и пары преобразователей. Затухание ультразвукового сигнала измеряется путем анализа уменьшения его амплитуды в зависимости от дистанции прохождения в исследуемой среде. Определение скорости звука производится через измерение задержки в приходе сигнала. Для определения акустических характеристик методом ультразвуковых импульсов используется два основных метода: с изменяемым расстоянием и с неизменяемым расстоянием между точками измерения.

Применение импульсного метода с неизменным интервалом между точками измерения не гарантирует высокую степень точности получаемых данных. Этот подход оправдан лишь для определения конкретных значений скорости распространения акустических волн при стандартных условиях температуры. Однако при попытках изучения зависимости скорости звука от широкого диапазона температурных изменений возникают трудности из-за того, что вариации скорости звука с ростом температуры находятся в пределах погрешности измерительных приспособлений.

Использование мобильного рефлектора (или альтернативного волновода) устраняет погрешности, вызванные незначительными отличиями в конфигурации импульсов, отраженных от стержневой поверхности и рефлектора.

В литературе упоминаются исследователи, применявшие метод импульсного эха для определения скорости распространения ультразвуковых волн в расплавах. Вместо непосредственного измерения длительности прохода акустических волн через расплав, данный подход предусматривает выполнение измерений путём сопоставления с временем распространения ультразвука через специально подготовленную ячейку-эталон. Эта ячейка

заполняется жидкостью, для которой характеристики скорости звука являются точно установленными — как правило, в качестве таковой используются вода или ртуть.

Фазовый метод для измерения звуковой скорости (рис.4) находит широкое применение. В данной методике осуществляется сравнение фаз двух колебательных процессов: передаваемого через анализируемую среду и эталонного. Для выполнения измерений применяют как непрерывные, так и импульсные волны. Фиксация различий фаз может происходить в акустической системе с использованием пьезоэлектрического преобразователя или в электронной системе через детекторы сигналов. В качестве приборов для зафиксирования разности фаз используют осциллограф, фазовый вольтметр или фазовый измеритель.

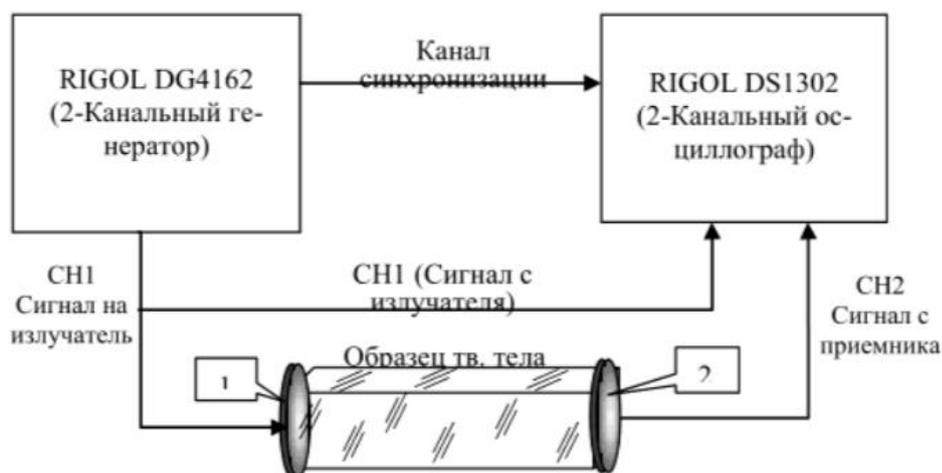


Рис.4. Блок-схема установки для измерения скорости акустических волн фазовым методом: 1-излучающий преобразователь; 2-принимающий преобразователь

Байдов, Гитис, Дымов, Кунин, Михайлов предложили технологию для модификации скорости звука, известную как импульсно-фазовая техника. Этот подход основывается на анализе электрического взаимодействия между импульсом и его высокочастотной модуляцией. Они указывают на ключевую трудность – вопрос согласования поверхности акустических волнопроводов с исследуемыми металлическими расплавами. Теоретические и практические

аспекты этой методики детализированы в третьей главе соответствующей работы.

Гитис, Михайлов и Химунин создали аппарат, применяя технологию электроакустической обратной связи для функционирования в расширенном диапазоне температур. Этот подход опирается на применение двух фиксированных акустических волноводов. Задача заключается в том, что отправленный в анализируемую среду сигнал фиксируется, усиливается и направляется на контрольный генератор, тем самым обеспечивая его синхронизацию. Сущность метода заключается в трансформации процесса измерения времени в процесс измерения частоты повторения сигналов. Устройство может функционировать в разнообразных режимах, а именно: в режиме пропускания и отражения через каждый из волноводов.

Обычно скорость звука вычисляется с помощью формулы:

$$c = \frac{2df_1f_2}{2f_1f_2 - f_1 - f_2}$$

где d – расстояние между торцами стержней, f – частота повторения импульсов в системе стержни-расплав, f_1 и f_2 – частота повторения импульсов в каждом стержне. Погрешность измерений оценивали в 1,5-3,5 % [6].

Несмотря на преимущества данного метода, при его применении наблюдались определенные сложности связанные с наличием импульсов, отраженных неоднократно внутри стержней. Эти отраженные сигналы вместе с основным рабочим импульсом передавались на источник сигнала, вызывая проблемы с его синхронизацией. Для уменьшения данного эффекта применялась техника обрезки концов стержней, при которой они формировались не в перпендикулярном положении к оси, что способствовало уменьшению помех.

Впервые наблюдая необычное изменение температуры влияющее на скорость звука в расплавах, ученые положили начало развитию молекулярной акустики в области жидких металлоидов и полупроводников. Данный феномен увеличения скорости звука в плотных веществах до работ Гитиса и Михайлова был зарегистрирован только для воды и воспринимался как уникальное явление. Исследователи отметили эту аномалию, проявляющуюся также в жидком состоянии серы и селена, проведя точные измерения скорости звука в этих субстанциях.

В 2002 году группой ученых, включая Тетерина Е.П., Тарасова И.Е., и Потехина Д.С., был получен патент на инновационную аппаратуру, предназначенную для определения скоростей ультразвуковых волн в жидкостях. Данный аппарат (представленный на рисунке 5) включает в себя пьезоэлектрический преобразователь 1, который расположен внутри цилиндра 2, заполненного исследуемой жидкостью. В центральной части цилиндра, положение которого точно выровнено по его оси, находится поршень-отражатель 3. Для создания магнитного поля используется соленоид 4, подключенный к источнику питания 5, контролируемому через ЭВМ 6. Система также включает аналого-цифровой преобразователь 7, подсоединенный к усилителю сигнала 8, который, в свою очередь, подключен к амплитудному детектору 9. Этот детектор связан с пьезопреобразователем 1 и выходом генератора высокой частоты 10, обеспечивая точность измерений ультразвуковых волн в жидкостях.

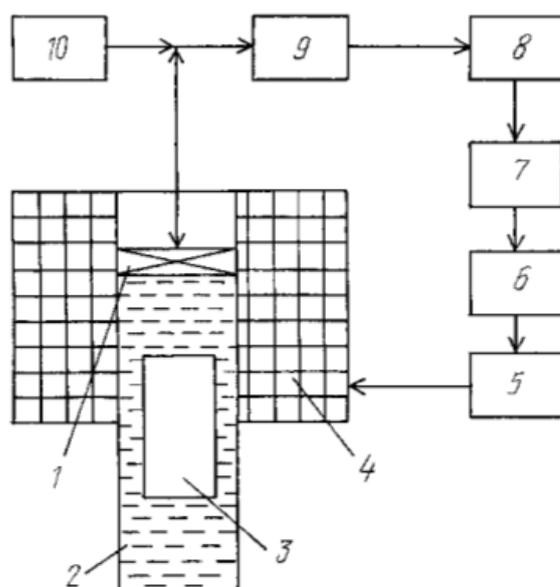


Рис. 5. Блок-схема устройства, реализующего предлагаемый способ

Метод измерения скорости распространения ультразвуковых волн включает излучение и прием ультразвукового сигнала через жидкость с использованием пьезоэлектрического датчика. При этом анализируется волна, отразившаяся от движущегося в среде поршня, функционирующего как отражатель.

Техника основывается на импульсном принципе, когда поршень-рефлектор получает нестационарное перемещение в пределах установленного промежутка L . Во время всего процесса перемещения поршня активно регистрируют изменения частоты $F(t)$ с использованием доплеровского эффекта в возвратном ультразвуковом сигнале, который генерируется пьезоэлектрическим датчиком и передается в жидкость. Расчёт скорости распространения ультразвуковых волн производят на основе формулы:

$$c = \frac{2fL}{\int_0^t F(t)dt}$$

Интеграл $\int_0^t F(t)dt$ представляет собой площадь, формируемую между кривой $F(t)$ и осью времени t за промежуток времени, когда поршень-

рефлектор перемещается на стабильное расстояние L ; f обозначает частоту генерируемой ультразвуковой волны.

3. МЕТОДИКА И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ И ЗАТУХАНИЯ УЛЬТРАЗВУКА ФАЗОВО-ИМПУЛЬСНЫМ МЕТОДОМ

3.1. Аппаратура измерения

Во второй главе описывается новаторская методика, разработанная исследовательской группой в составе Байдова, Гитиса, Дымова, Кунина и Михайлова, как отмечается в источнике [16]. Принцип метода основывается на зафиксированном эффекте электрической интерференции импульсных сигналов, обладающих высокочастотной структурой. Исследователи применили метод импульсной интерферометрии, в ходе которой сигнал после прохождения сквозь расплав, получая усиление от приемного устройства, суммируется с эталонным синусоидальным напряжением. Этот процесс приводит к интерференционному гашению сигнала при условии равенства амплитуд и противоположных фаз, результирующий сигнал в этом случае обращается в ноль. Датчик, перемещаемый через интервалы, равные длине ультразвуковой волны в образце, позволяет получить периодически повторяющуюся интерференционную картину. Метод имеет выдающееся преимущество, заключающееся в невосприимчивости к помехам от последующих отраженных импульсов за счет фокусировки измерительного процесса на первичном сигнале. Точность измерений оценена в 0,2% погрешности. Тем не менее, методика требует корректировки длины волновода, что представляет серьезную сложность при высоких температурных условиях и необходимости поддержания герметичности измерительной среды, как указывается в источнике [16].

Основная структурная схема аппаратуры, разработанной и сконструированной С.Г. Кимом в 1989 году, показана на рисунке 6.

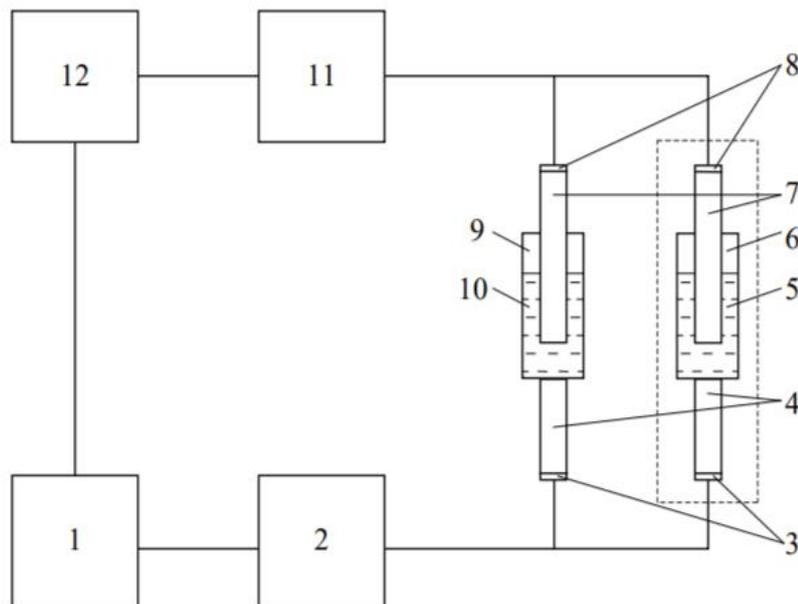


Рис. 6. Блок-схема установки:

1 - генератор импульсных сигналов, 2 - генератор синусоидальных сигналов, 3 и 8 – пьезоэлементы, 4 и 7 – волноводы, 5 – исследуемый образец, 6 – контейнер для исследуемого образца, 9 – контейнер для эталонной жидкости, 10 – эталонная жидкость, 11 – селективный усилитель, 12 – осциллограф

Генератор модели Г5-72 (1) производит прямоугольные сигналы с длительностью от 1 до 5 микросекунд на частоте приблизительно 2 кГц. Эти сигналы модулируются высокочастотным синусоидальным напряжением, получаемым из генератора Г4-143, оснащенного функцией синхронизации частоты (2). Амплитуда этих импульсов поддается точной настройке в диапазоне от 0 до 1,2 вольта. Сформированные импульсы направляются к пьезоэлектрическим передатчикам (3) как в исследовательской камере с анализируемым образцом (6), так и в контрольной камере с дистиллированной водой для сравнения (9). Эти элементы, изготовленные из поликристаллической пьезоэлектрической керамики, преобразуют электрические колебания в механические и обратно. Произведенный акустический сигнал в пьезоэлементе (3) передается через статичный нижний волновод (4), проходит сквозь анализируемый расплав в контейнере (6), далее через мобильный верхний волновод (7) и достигает приемного пьезоэлемента (8). Аналогичные процессы преобразования

сигнала осуществляются и в контрольной камере (9). Контрольная камера служит линией задержки и состоит из бара, изготовленного из аналогичного материала, что и волноводы (синтетический кварц), подключенного параллельно исследовательской камере, установленного на подвесе и размещенного на экспериментальной установке. В ее контейнер заливается дистиллированная вода, которая поддерживается при стабильной комнатной температуре. Для корректировки акустических базовых дистанций исследовательской и контрольной камер, обеспечивая совпадение обоих сигналов, длины задержек в контрольной камере точно настраиваются. После синхронизации сигналов волноводы контрольной камеры фиксируются и остаются неподвижны на всем протяжении дальнейших экспериментов.

Сигналы, полученные из датчиков измерительной и эталонной ячеек после прохождения через процесс обратного пьезоэлектрического преобразования с использованием пьезоэлементов (8), направляются в селективный приемник (11) для фильтрации нежелательных помех. Затем, очищенные сигналы передаются на осциллограф С1-77 (12) для визуализации.

Для ролей как излучающего, так и приемного пьезопреобразователя выбраны круглые пьезоэлектрические пластины с диаметром 5 мм и толщиной 0,36 мм, выполненные из (ЦТС) – пьезокерамики. Этот материал демонстрирует превосходные электромеханические свойства по сравнению с другими пьезоэлектрическими и пьезокерамическими материалами. В отличие от пьезопреобразователей, изготовленных на основе кварца, ЦТС пьезоэлектрики обладают широкой резонансной полосой и требуют меньшее возбуждающее напряжение. При подаче на них напряжения амплитудой свыше 0,5 В, в пластинах генерируются сильные механические колебания. Резонансная частота данных пьезоэлементов составляет 33,1 МГц.

Как было описано ранее, длительности задержек для обеих ячеек настраиваются на приблизительно равные значения. Это действие приводит к тому, что сигналы, проходящие через цепь, создают интерференционный узор. Эффекты их взаимодействия, усиленные блоком (11), визуализируются на дисплее осциллографа (12). Интервалы между последовательными пиками и впадинами на этом узоре соответствуют длине волны ультразвука. С точным знанием частоты ультразвуковой волны, скорость её распространения можно точно вычислить, используя соответствующую формулу.

$$v_s = \lambda f$$

где λ – длина волны, f – частота.

Мобильность верхнего звуковода в функциональном блоке позволяет его регулировку по вертикали. Такое регулирование, отслеживаемое с помощью микрометрического устройства, приводит к модификации фазового разрыва между волнами, исходящими из испытуемой и стандартной секций. В результате на экране осциллографа видны интерференционные эффекты затухания общего сигнала. Методика измерения базируется на определении количества n – моментов полного исчезновения амплитуд объединённых волн, обусловленных их высокой частотой, в ходе перемещения верхнего акустического канала испытуемой секции на определённое расстояние Δh .

Измерение волнового периода осуществляется через уравнение:

$$\lambda = \frac{\Delta h}{n}$$

где n -число интерференционных минимумов укладывающихся на длине Δh .

Тогда скорость ультразвука:

$$v_s = \frac{\Delta h}{n} f$$

– данная мера представляет собой усредненную скорость распространения ультразвуковых волн в слое жидкости толщиной Δh , находящемся непосредственно у торца верхнего волновода. Уникальная особенность импульсно-фазового метода заключается в его способности точно определять скорость ультразвука в разнообразных зонах расплава на микроуровне.

На изображении 6 представлена схема, которую можно модифицировать для определения амплитудного коэффициента поглощения ультразвуковых волн α , убрав из неё компаратор из исходной конфигурации генераторов. В результате изменений, на экране осциллографа будет виден ультразвуковой сигнал, прошедший через объект исследования. Такой подход позволяет анализировать изменения амплитуды принимаемого сигнала в зависимости от того, как изменяется дистанция, которую проходит акустическая волна внутри материала. Расчет коэффициента поглощения ультразвука производится на основании соотношения, полученного из измеренных данных.

$$\alpha = -\frac{1}{x_2 - x_1} \ln \frac{A_2}{A_1}$$

где A_1, A_2 – амплитуда сигнала при различных расстояниях x_1 и x_2 .

Очевидно, что применение этой методики в условиях значительного временного промежутка (до пяти-шести часов) между измерениями амплитуд при неизменной температуре было абсолютно неэффективным при отсутствии мониторинга за функционированием генераторов 1 и 2, а также приемника 9, как указано на рисунке 7. Следовательно, рационально использовать стандартную ячейку для мониторинга состояния электрической системы, обеспечивая стабильность амплитуды стандартного сигнала на протяжении всего исследования. По параметрам надежности этот метод сравним с абсолютным методом измерения коэффициента поглощения звука, однако его точность оказывается выше [4].

Иллюстрация №7 демонстрирует в продольном разрезе устройство. Чтобы обеспечить необходимую прочность конструкции, элементы системы поддерживаются тремя опорами 2 (одна из опор не отображена на изображении для лучшей визуализации). Расположение опор стабилизировано при помощи базы 25 снизу и удерживается верхним диском.

Рабочая камера состоит из:

- фланца 21 с коннекторами для подсоединения нижнего акустического канала, систем вакуумирования, введения газа и прокладывания термопар;
- двух водоохлаждаемых токоподводов 19 и 20;
- водоохлаждаемого бокового кожуха 14;
- верхнего фланца 12 с входом для верхнего акустического кабеля.

В конструкции рабочей камеры используются уплотнительные элементы из вакуумной резины для обеспечения герметичности между ее составными частями. Данная камера размещается между уровнями 11 и 22. Для достижения горизонтального положения конструкции применяются три регулировочных винта на уровне 11, служащие для фиксации верхнего фланца. Контроль за вертикальным перемещением верхнего звукопровода 13 обеспечивается с помощью микрометрического винта 5, закрепленного на уровне 6. Для точного измерения указанного перемещения применяется индикаторный микрометр 3, установленный на уровне 4.

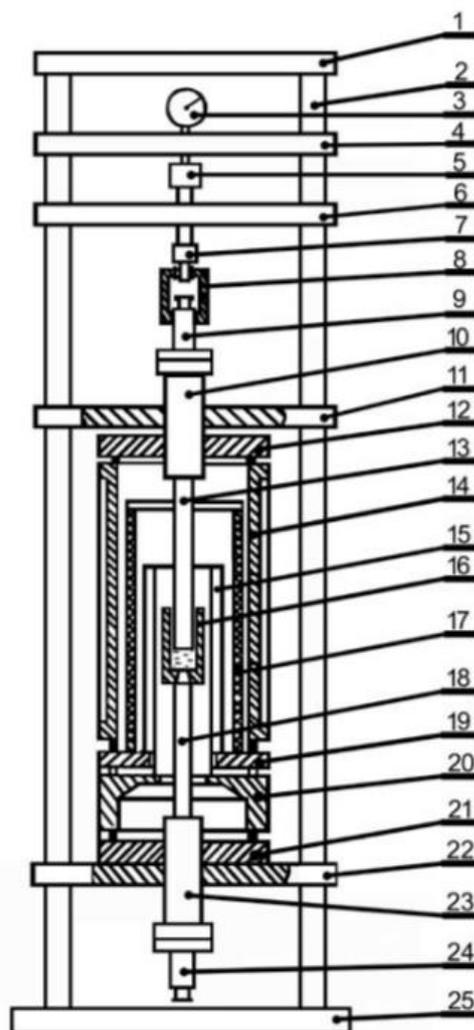


Рис. 7. Вертикальный осевой разрез аппарата для высокотемпературных и высокочастотных исследований акустических параметров расплавов

Акустические волокна с порядковыми номерами 13 и 18 фиксируются в двухсекционных устройствах охлаждения и держания 10 и 23 с использованием конических фиксаторов и эластичных уплотнительных элементов. В данные устройства интегрируются волноводы 9 и 24, обладающие особыми проектными характеристиками. Для процедуры исследования образец располагается в специализированной емкости 16, которая имеет соединение с акустическим волновым проводником, расположенным в нижней части системы.

Для того чтобы достигнуть высоких температур, применяется графитовый нагревательный элемент номер 15, состоящий из двух цилиндрических компонентов, через которые протекает электрический ток в

обратных направлениях. Это предотвращает создание переменных магнитных полей, способных нарушить точность экспериментальных данных при анализе проводимости расплавленных материалов. Для крепления используются внешняя и внутренняя части нагревательных элементов, соединяемые с токопроводящими выводами 19 и 20 соответственно. Чтобы минимизировать потери тепла, применяются защитные экраны, заполненные теплоизоляционным материалом 17.

Измерение температуры осуществляется при помощи двух термопар, чьи датчики помещаются в специализированные устойства на поверхности контейнера. Для регулировки положения верхней части акустического трансдюсера используется адаптер с изготовленными на нем отверстиями для подключения ультразвукового кабеля, который фиксируется в волноводе при помощи нарезанных резьб. К этому адаптеру прикрепляется основание через шариковый подшипник, обеспечивающий точное соединение, в котором зафиксирован конец микрометрического винта для точных регулировок.

Процесс тепловой обработки образца производится с использованием двухпроводного графитового нагревательного элемента, электропитание к которому подается через специализированный понижающий трансформатор, обладающий мощностью в 20 кВт. Достигаемая верхняя граница температуры для этого нагревательного устройства равняется 1500 К. Для установления и поддержания точного температурного режима в зоне воздействия тепла применяется программируемый терморегулятор высокой точности марки РИФ-101. Мониторинг за температурными показателями осуществляется при помощи термопары из хромеля и алюмеля, с горячим спаем, закрепленным в ближайшем расположении к теплогенерирующему элементу.

3.2. Методика проведения измерений

Во время проведения стандартных экспериментов, нацеленных на определение акустических характеристик расплавов в равновесном состоянии, для начала помещали образец в предназначенную для измерений камеру. Далее, с помощью форвакуумного насоса, из рабочего пространства удаляли воздух, доводя остаточное давление до значения в 10^{-2} мм ртутного столба. После этого пространство камеры наполняли гелием, процесс вакуумирования и наполнения гелием повторяли дважды для наиболее эффективного очищения от газовых примесей. Измерения акустических параметров расплава проводили при установившемся давлении в 1 атмосферу.

Как только параметры атмосферы внутри экспериментального объема достигали стабильности, начинался процесс термического воздействия на исследуемый материал. Для предотвращения образования трещин и последующего разрушения кварцевой плавильной посуды, процедура нагревания осуществлялась поэтапно: температура повышалась на 25 кельвинов при каждом этапе с проведением изотермической выдержки продолжительностью до 30 минут и при среднем увеличении температуры на 2 К в минуту. Чтобы оптимизировать акустическую связь между волноводами и металлическим расплавом, на их концы наносился слой индия.

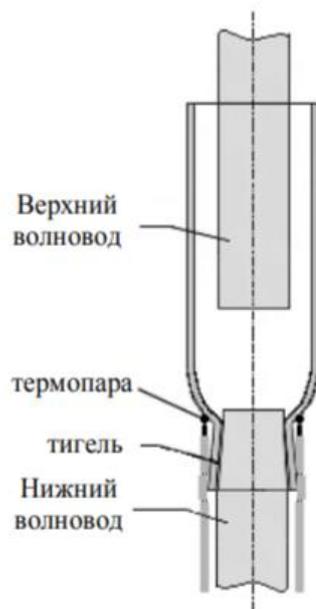


Рис. 8. Измерительная ячейка

Для мониторинга температуры использовали две термопары из хромеля и алюмеля (см. рис. 6). Ошибка в определении температуры не превышала ± 1 К. Процесс замеров включал этапы постепенного нагрева и последующего плавного охлаждения, с обязательными изотермическими паузами на каждой контрольной точке, продолжительностью не менее 20 минут [17].

3.3. Оценка погрешности измерений

Погрешность при определении скорости ультразвуковых волн можно вычислить, применяя уравнение $v_s = \left(\frac{\Delta h}{n}\right)f$, что позволяет преобразовать его в упрощенный вид для расчета относительной погрешности методики:

$$\frac{\delta v_s}{v_s} = \sqrt{\left(\frac{\delta h}{\Delta h}\right)^2 + \left(\frac{\delta f}{f}\right)^2}$$

Поскольку цена деления используемого индикаторного микрометра Tesa Digico-10 часового типа равна 0,001 мм, относительная погрешность $\delta h/\Delta h$ при Δh от 2 до 5 мм составляет от 0,25 до 0,1 %. При базовой частоте 31 МГц с паспортным разбросом частот в 50 Гц имеем $\frac{\delta f}{f} = 10^{-4}\%$. Таким образом, погрешность определения скорости звука зависит только от величины Δh .

Исходя из уравнения $\alpha = -\frac{1}{x_2 - x_1} \ln \frac{A_2}{A_1}$, получается формула для расчета относительной погрешности измерения коэффициента поглощения α :

$$\frac{\delta\alpha}{\alpha} = \sqrt{\left(\frac{\delta A}{\Delta A}\right)^2 + \left(\frac{\delta h}{\Delta h}\right)^2}$$

Погрешность измерения амплитуды ультразвуковой волны δA и погрешность показателей индикаторного микрометра δh составляют 0,5 мм и 0,005 мм соответственно. Изменение высоты Δh равно примерно 20 мм, в то время как изменение амплитуды ΔA при данном Δh варьируется в зависимости от уровня поглощения ультразвука материалом, выраженного через коэффициент α . В случае с жидкими металлами, отношение $\frac{\alpha}{f^2}$ лежит в диапазоне от $3 \cdot 10^{-15}$ до $10^{-14} \text{ м}^{-1} \cdot \text{с}^2$. Применив эти данные к формуле для α , которая выглядит как $\alpha \approx -(1/A) \cdot (\Delta A / \Delta h)$, находим, что ΔA находится в интервале 2–5,5 мм. Следовательно, относительная погрешность измерения амплитуды $\delta A / \Delta A$ составляет 4 – 12%, а относительная погрешность измерения высоты $\delta h / \Delta h$ — 0,03%.

Следовательно, общая относительная погрешность измерения скорости звука оценивается на уровне 0,2%. В то же время, аналогичный подсчет погрешности для значения коэффициента поглощения звука указывает на показатель в 8%.

Ошибки становятся минимальными, когда соблюдается условие $D/\lambda \geq 30$, где D - диаметр волновода.

Детальный анализ погрешностей при исследовании акустических свойств, представленный ранее, можно считать оптимальным примером. Однако в практических условиях величина ошибок зачастую превосходит указанные значения из-за внешних факторов, связанных с ограничениями используемых методов и техник измерения. Так, изменения в температурном распределении образца в процессе перемещения волновода, особенно при

высоких температурах, приводят к расхождениям в измерениях скорости звука в материале (v_s), вычисляемой по упомянутой формуле, с фактическими температурными условиями, фиксируемыми термопарой. Также к увеличению погрешности приводят конструктивные особенности, например, трудности достижения строгой параллельности между торцами волноводов при их смещении и возможные прецессионные движения верхнего волновода относительно осевой линии нижнего при вращении микрометрического устройства.

Следовательно, созданный метод и оборудование обеспечивают измерение скорости звуковых волн в металлических материалах с повышенной деликатностью и точностью.

Измерение коэффициента поглощения акустических волн возможно лишь в тех расплавах, где данный процесс заметен на частотах вплоть до 5 МГц.

4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ СРЕДНЕЙ ШКОЛЫ

В рабочей программе средней школы тема акустики проходится в 11 классе. Название темы «Звук. Скорость звука. Громкость звука. Высота тона. Тембр звука» [1]. В качестве внеурочных занятий к данной теме можно добавить углубленный материал по теме «Ультразвук. Исследование скорости и затухания ультразвука в среде». Эту тему можно разделить на два учебных часа:

- Урок открытия новых знаний по теме «Ультразвук. Распространение ультразвука в среде»
- Урок открытия новых знаний по теме «Методы исследования скорости и затухания ультразвука. Импульсно-Фазовый метод»

Данные уроки предоставляют возможность углубленного изучения раздела акустики.

При составлении конспектов данных уроков нужно учитывать математический аппарат, которым владеют обучающиеся в 11 классе. Обучающиеся владеют материалами по темам «Логарифмические функции» и «Исследование функции при помощи производной», однако не стоит нагромождать урок обилием формул. Также стоит учитывать возрастные особенности обучающихся 11 класса. В план урока стоит добавить парную или групповую работу.

Далее будут представлены технологические карты разработанных уроков.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ КАРТА УРОКА 1

Тема урока	Ультразвук. Распространение ультразвука в среде
Тип (форма) урока	Урок открытия новых знаний
Цель урока	Формирование у учащихся представления об ультразвуковых волнах и особенностях распространения их в среде
Этапы и задачи урока <i>(соотнести этапы с типом урока)</i>	<p><u>1 этап:</u> Задача этапа: Создать условия для возникновения внутренней потребности включения в деятельность</p> <p><u>2 этап :</u> 2.1. Задача: Выявить затруднения 2.2. Задача: Разработать план выхода из создавшегося затруднения 2.3. Задача: Реализовать выбранный план по разрешению затруднения</p> <p><u>3 этап:</u> Задача: закрепить знания полученные на уроке</p> <p>4 этап: Задача: Проведение самоанализа и рефлексии учебной деятельности</p>

Образовательные ресурсы	
Формы и приемы работы	<u>Формы</u> : фронтальная, парная <u>Приемы</u> : беседа, анализ текста
Основные понятия	Ультразвук, скорость ультразвука, затухание ультразвука,

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Предметные	Метапредметные	Личностные
<p>Знать, что такое ультразвук; Знать уравнение скорости ультразвука и коэффициента поглощения ультразвука; Уметь описывать порядок выведения уравнений скорости и затухания ультразвука;</p>	<p>самостоятельно формулировать и актуализировать проблему, рассматривать её всесторонне; определять цели деятельности, задавать параметры и критерии их достижения; выявлять закономерности и противоречия в рассматриваемых физических явлениях; владеть навыками получения информации</p>	<p>готовность и способность обучающихся к саморазвитию и личностному самоопределению, сформированность их мотивации к обучению и целенаправленной познавательной</p>

	<p>физического содержания из источников разных типов, самостоятельно осуществлять поиск, анализ, систематизацию и интерпретацию информации различных видов и форм представления;</p>	<p>деятельности, способность ставить цели и строить жизненные планы</p>
--	--	---

ОРГАНИЗАЦИОННАЯ СТРУКТУРА УРОКА

Этапы урока	время	Деятельность учителя	Деятельность обучающихся	Формы организац ии взаимодей ствия (дополнит ельно: методы и приемы)	Результаты этапа и формы контроля
I.		Наводящими вопросами помогает учащимся	Отвечают на вопросы,	беседа	Сформулированы тема

Этап		сформулировать тему и цель урока	формулируют тему и цель урока		и цель урока
II Этап		<p>2.1. Помогает учащимся выявить основные вопросы темы:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Что такое ультразвук? • Как рассчитать скорость ультразвука • Что такое коэффициент поглощения ультразвука? • Как рассчитать коэффициент поглощения? <p>2.2. Предлагает учащимся в парах ознакомиться с текстом, чтобы ответить на выявленные вопросы</p> <p>2.3. Помогает парам учащихся, отвечает на вопросы</p>	<p>2.1. Выявляют основные вопросы темы</p> <p>2.2. Получают раздаточный материал</p> <p>2.3. Знакомятся с выданным текстом, обсуждают в паре ответы на вопросы, записывают ответы в тетрадь</p>	<p>Беседа, работа в паре, анализ текста</p>	<p>2.1. Выявлены основные вопросы темы</p> <p>2.2. Предложен способ ответа на вопросы темы</p> <p>2.3. Получены ответы на вопросы темы</p>
III		Предлагает учащимся задания на первичное	Выполняют задания	Фронтальн	Пробное применение

Этап		закрепление знаний		ая и самостоятельная работа	знаний
IV. Рефлексивный		Учитель ходит по рядам и собирает стикеры	На доску в руках учителя клеят стикеры зеленого, желтого или красного цвета: Зеленый – хорошо понял материал Желтый – не весь материал был усвоен Красный – вообще ничего не понял	Фронтальная	Учащиеся оценивают своё усвоение материала, а учитель запоминает детей, плохо усвоивших материал урока
Домашнее задание		Учитель выдает домашнее задание: Повторно ознакомиться с материалами, записанными в тетрадь в процессе урока	Учащиеся записывают в дневники	Фронтальная	

--	--	--	--	--	--

Для реализации мотивационного этапа учителю предлагаются следующие наводящие вопросы, которые направлены на формулировку учащимися темы и цели урока:

1. Что такое звук?
2. На какие три диапазона делятся звуковые волны?
3. Что такое ультразвук?
4. Какие свойства распространения ультразвука вы знаете?

На вопрос 4 учащиеся не смогут дать ответ и учителю необходимо предложить разобраться в этом вопросе. Таким образом учащиеся смогут сформулировать тему и цель урока.

Для реализации следующих этапов учителю понадобится раздаточный материал – текст, анализ которого учащиеся будут проводить. Данный текст представлен далее.

Текст для учащихся.

Ультразвуковые волны представляют собой вибрации, чья частота превышает порог восприятия человеческого слуха, обычно начинающийся с 20 кГц.

Изучение распространения ультразвуковых волн в таких средах, как жидкие металлы, полуметаллы и полупроводники, можно осуществлять, опираясь на фундаменты классической акустической теории. В контексте анализа прохождения плоской продольной ультразвуковой волны через среду, обладающую свойствами сжимаемости и вязкости, используется комплексный подход, включающий в себя систему из пяти основных математических уравнений.

Опираясь на данные уравнения и предполагая, что в сжимаемых жидкостях не существует объемной вязкости, Стокс в 1845 году формулировал уравнение, которое описывает распространение упругой волны в такой вязкой и сжимаемой среде.

$$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} - v_s^2 \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} - \frac{4\eta}{3\rho} \frac{\partial^3 U}{\partial x^2 \partial t} = 0$$

где v_s – скорость адиабатического распространения волны, определяемая согласно уравнению:

$$v_s^2 = \frac{1}{\beta_s \rho}$$

где β_s обозначает коэффициент объемной сжимаемости среды, а ρ представляет собой плотность данной среды.

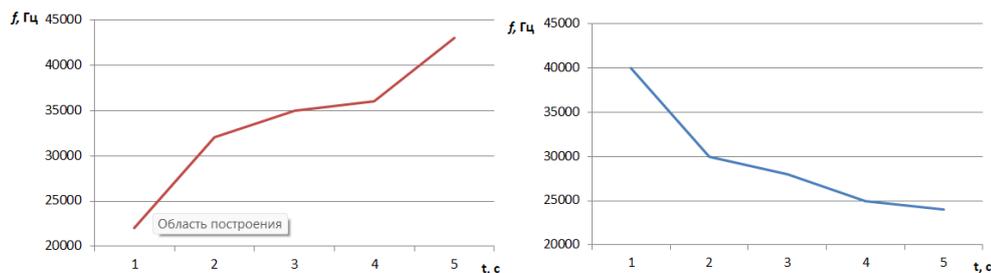
При анализе распространения плоской гармонической волны в одномерном пространстве, учитывая аттенуацию из-за вязкостивых и теплопроводных потерь среды, в волновом уравнении появляется дополнительный член, отображающий аттенуацию волны. Этот параметр, определяющий степень поглощения энергии волны средой, известен как коэффициент аттенуации и может быть вычислен используя соответствующую формулу.

$$\alpha = \frac{2\pi^2 f^2}{\rho v_s^3} \left[\frac{4}{3} \eta + \kappa \left(\frac{1}{c_V} - \frac{1}{c_P} \right) \right]$$

где f обозначает частоту колебаний, κ является параметром, описывающим внутреннее трение жидкости или газа, κ представляет собой показатель способности материала передавать тепловую энергию, c_V и c_P соответственно указывают на количество энергии, требуемой для нагревания единицы массы вещества без изменения его объема или под давлением.

Задания для первичного закрепления знаний:

1. На графиках ниже представлены зависимости частоты и скорости волны от времени. Выберите правильные утверждения и поясните свой ответ:



- А. Если на обоих графика одинаковая жидкость, то скорость распространения волны одинаковая при тех же условиях
- Б. На первом графике длина волны увеличивается
- В. На первом графике коэффициент поглощения увеличивается
- Г. На втором графике коэффициент поглощения увеличивается

Ответ: А и В

А – скорость ультразвука, исходя из формулы, не зависит от частоты, а зависит от свойств среды.

В – Исходя из формулы для коэффициента поглощения волны, коэффициент поглощения прямо пропорционален частоте. Чтобы коэффициент поглощения увеличился, необходимо увеличение частоты волны, что соответствует первому графику.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ КАРТА УРОКА 2

Тема урока	Методы исследования скорости и затухания ультразвука. Импульсно-Фазовый метод
Тип (форма) урока	Урок открытия новых знаний
Цель урока	Формирование представления о методах измерения акустических параметров в жидких металлах
Этапы и задачи урока <i>(соотнести этапы с типом урока)</i>	<p><u>1 этап:</u> Задача этапа: Создать условия для возникновения внутренней потребности включения в деятельность</p> <p><u>2 этап:</u> Задача: Актуализировать материал по теме прошлого урока</p> <p><u>3 этап:</u> Задача: Изучить новый материал</p> <p><u>4 этап:</u> Задача: Проведение самоанализа и рефлексии учебной деятельности</p>
Образовательные ресурсы	
Формы и приемы работы	<p><u>Формы:</u> фронтальная</p> <p><u>Приемы:</u> беседа, фронтальный опрос, тест</p>

Основные понятия		
ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ		
Предметные	Метапредметные	Личностные
<p>Знать основные методы измерения акустических параметров</p> <p>Знать расчетные формулы для скорости и коэффициента поглощения ультразвука</p> <p>Уметь различать методы измерения акустических параметров</p>	<p>владеть навыками получения информации физического содержания из источников разных типов, самостоятельно осуществлять поиск, анализ, систематизацию и интерпретацию информации различных видов и форм представления</p>	<p>готовность и способность обучающихся к саморазвитию и личностному самоопределению, сформированность их мотивации к обучению и целенаправленной познавательной деятельности, способность ставить цели и строить жизненные планы</p>

ОРГАНИЗАЦИОННАЯ СТРУКТУРА УРОКА

Этапы урока		Деятельность учителя	Деятельность обучающихся	Формы организац ии взаимодействия (дополнительно: методы и приемы)	Результаты этапа и формы контроля
I. Этап (мотивация)		Наводящими вопросами помогает учащимся сформулировать тему и цель урока	Отвечают на вопросы, формулируют тему и цель урока	беседа	Сформированы тема и цель урока
II Этап:		Учитель проводит тест по материалу прошлого урока	Учащиеся отвечают на вопросы теста	тест	Учащиеся вспомнили материал прошлого урока, получили

					отметки
III Этап:		Объясняет новый материал, предлагает учащимся зарисовать блок-схему и заполнить таблицу	Внимательно слушают материал, записывают материал, аккуратно зарисовывают схему, заполняют таблицу	фронтальная	Изучен новый материал
IV Этап:		Предлагает учащимся ответить на вопросы: Что вы поняли на уроке? Чему вы научились? С какими трудностями столкнулись?	Отвечают на вопросы	фронтальная	Проведена рефлексия по изученному материалу
Домашнее задание		Выдает домашнее задание на следующий урок: Повторно ознакомиться с материалами, записанными в тетрадь в процессе урока	Записывают задание в дневник	фронтальная	

Для реализации мотивационного этапа преподавателю предлагается вывести на доску таблицу со значениями скорости ультразвука в расплавленных металлах и задать следующие вопросы:

1. Табличные значения какой величины представлены на доске?

2. Каким образом были получены данные значения?
3. Как экспериментально определить значение скорости ультразвука?

На вопрос 3 учащиеся не смогут дать ответ и учителю необходимо предложить разобраться в этом вопросе. Таким образом учащиеся смогут сформулировать тему и цель урока.

Для реализации этапа актуализации знаний по теме прошлого урока учителю далее предлагаются тестовые материалы.

Тестовые материалы по теме «Ультразвук. Распространение ультразвука в среде»

1. Ультразвук – это звуковые волны, которые находятся в диапазоне частот:
 - А. $16 < f < 20000$ Гц;
 - Б. $f > 20000$ Гц;
 - В. $f < 16$ Гц.
2. Величина, которая показывает, как быстро звуковая волна распространяется в среде – это:
 - А. Скорость ультразвука;
 - Б. Частота ультразвука;
 - В. Длина ультразвуковой волны.
3. Коэффициент, который показывает, как конкретная среда останавливает конкретную звуковую волну, называется:
 - А. Коэффициент теплопроводности;
 - Б. Коэффициент поглощения;
 - В. Температурный коэффициент расширения.
4. Среди приведенных ниже формул выберите правильную формулу скорости ультразвука в сжимаемой вязкой среде:
 - А. $v_S = \frac{1}{\beta_S \rho}$
 - Б. $v_S^2 = \frac{\rho}{\beta_S}$
 - В. $v_S^2 = \frac{1}{\beta_S \rho}$
5. Среди приведенных ниже вариантов ответов выберите ошибочный:

Коэффициент поглощения зависит от свойств среды:

 - А. Теплоемкость среды;
 - Б. Скорость ультразвука;
 - В. Частота ультразвука

Для реализации этапа изучения нового материала учителю предлагаются материалы, представленные ниже.

Методы определения акустических характеристик водных сред:

- Интерференционный метод – это техника, базирующаяся на принципе взаимодействия двух волн: волны, испускаемой преобразователем, и волны, отраженной от движущегося рефлектора.
- Импульсный метод является техникой, где исследование выполняется следующим образом: ультразвуковые волны, генерируемые кварцевым ультразвуковым преобразователем, проходят через объект исследования, впоследствии преобразуются обратно в электрические колебания. Затем, скорость этих ультразвуковых волн определяется путем измерения времени задержки этих волн, тогда как их поглощение измеряется через оценку амплитуды полученных волн.
- Фазовый метод представляет собой технику, в рамках которой выполняется измерение и сопоставление фаз двух электрических сигналов.
- Импульсно-фазовая техника - это подход, основанный на измерении электрической интерференции, включающей в себя сигналы с высокой частотой.
- Технология электроакустической обратной связи – это методика, опирающаяся на использование пары фиксированных акустических волноводов. Акустический сигнал, отправленный в объект исследования, захватывается, подвергается усилению, и затем направляется обратно в контрольный генератор, обеспечивая его синхронизацию. Это позволяет преобразовать

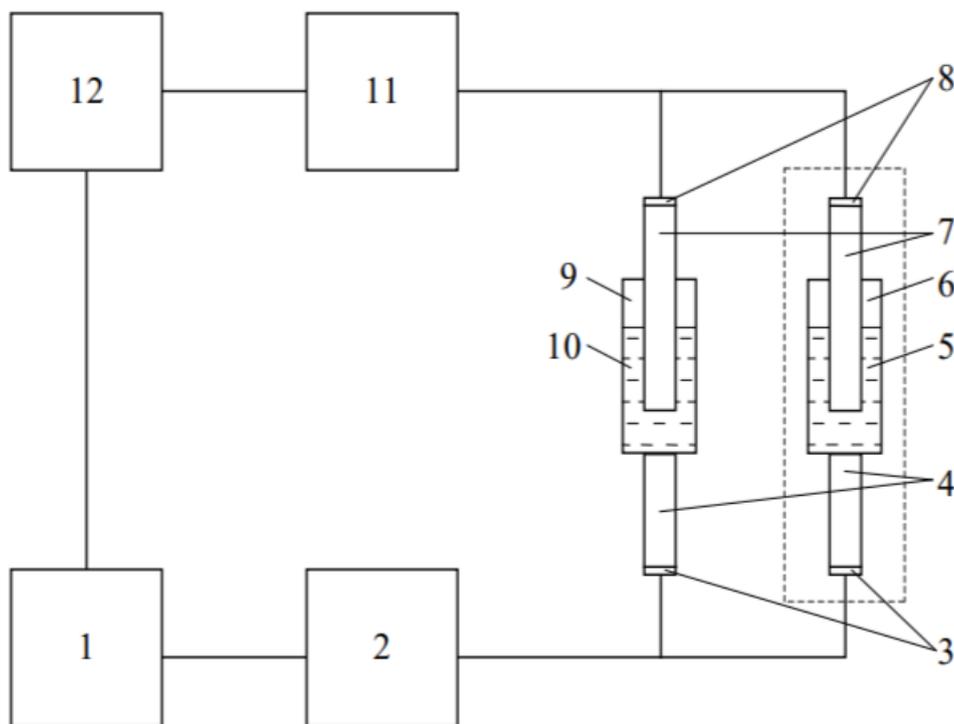
процедуру отслеживания временных интервалов в процесс, основанный на определении частоты повторения сигнала.

Фазо-импульсный метод.

Метод, впервые предложенный Байдовым, Гитисом, Дымовым, Куниным и Михайловым, базируется на изучении электрической интерференции высокочастотных сигналов.

Основное достоинство этой методики состоит в исключении влияния последующих сигналов на измеряемый результат, поскольку она регистрирует только первичный сигнал. В то же время, ключевой минус заключается в обязательности определения протяженности, что обуславливает сложности в конструкции, особенно при высоких температурах и необходимости поддержания герметически закрытого пространства.

Блок-схема установки:



Текст для заполнения таблицы:

Блок-схема конструкции, разработанной и смонтированной в 1989 году С.Г. Кимом, демонстрируется на иллюстрации.

Генератор модели Г5-72 (1) производит прямоугольные сигнальные импульсы, имеющие временной интервал от 1 до 5 микросекунд и репетиционный рейт около 2 кГц. Эти сигнальные кванты насыщаются синусоидальным высокочастотным напряжением, извлекаемым из стандартизированного источника сигналов Г4-143, организованного с встроенной системой синхронизированной измерительной частоты (2). Границы амплитуды данных импульсов поддается бесступенчатой корректировке в диапазоне от нуля до 1,2 вольта. Указанные электрические колебания направляются к транзиттерным пьезоэлектрическим компонентам (3) исследовательского блока с анализируемым образцом (6) и контрольного блока с чистой водой (эталонная ячейка) (9). Используемые пьезокомпоненты, выполненные из пьезоэлектрической керамики, трансформируют колебательную электрическую энергию в механическую и обратно. Сформированный в пьезоэлементе (3) аудиосигнал передается через фиксированный нижний волновод (4), анализируемый расплав в контейнере (6), мобильный верхний волновод (7) к приемному пьезоэлементу (8). Аналогичный процесс трансформации наблюдается и в эталонном блоке (9). Данный эталонный блок функционирует как задерживающая линия, состоящая из стержня, изготовленного из аналогичного материала, что и волноводы (плавленый кварц). Он соединен параллельно к аналитическому блоку, закреплён на подвесе и установлен на экспериментальной платформе. В его контейнер заливается дистиллированная вода, температура которой удерживается на уровне комнатной. Для калибровки экспериментальной установки необходимо синхронизировать длины задержек исследовательской ячейки и эталонной, настраивая акустическую длину последней. При достижении совпадения обоих сигналов, волноводы эталонного блока фиксируются и в дальнейшем в течение всего эксперимента не изменяют своего положения.

Измерительные и опорные сигналы, прошедшие через процесс обратного пьезоэлектрического преобразования в пьезоэлементах, передаются на селективный приёмник, где происходит фильтрация помех. Затем они направляются к осциллографу С1-77 для дальнейшего анализа.

Задержки для обеих ячеек адаптируются таким образом, чтобы быть схожими, что позволяет синфазным цепям электрических сигналов создавать интерференционный паттерн. Этот процесс интерференции, после его усиления с помощью устройства (11), визуализируется на экране осциллографа (12). Интервалы между последовательными пиками и впадинами интерференционного рисунка соответствуют величине длины волны ультразвука, переносимой через среду.

Таблица:

№	Название элемента на схеме	Назначение

Продолжение материала, изложенного педагогом студентам.

Манипулируя верхним волноводом рабочей секции по вертикали с помощью микрометрического устройства, осуществляется контроль за изменением фазового разрыва между волнами, исходящими из контрольной и эталонной ячеек. Это влечёт за собой возникновение интерференционных минимумов на экране осциллографа, которые свидетельствуют о взаимном гашении колебаний. Процедура измерений сводится к определению количества n – моментов уплотнения этих колебательных сигналов, что обычно наблюдается в больших количествах вследствие незначительности длин волн, при продвижении верхнего звукопровода измерительного отсека на измеренное изменение Δh .

Тогда скорость ультразвука:

$$v_s = \frac{\Delta h}{n} f$$

– данная метрика отражает усредненный показатель скорости прохождения ультразвуковых волн в пределах верхнего слоя исследуемого вещества около торцевой части волновода, причем эта область характеризуется заданной толщиной Δh . Ключевое преимущество импульсно-фазового метода заключается в его способности осуществлять измерения скорости распространения ультразвуковых волн с высокой точностью в локализованных участках жидкого металла, что и обеспечивает его оригинальность и востребованность в исследованиях.

Схема, показанная на рисунке 6, поддается модификации для измерения амплитудного коэффициента поглощения ультразвуковых волн α . Для этой цели достаточно исключить из цепи генераторов блок сравнения, что позволит осциллографу зафиксировать сигнал, прошедший через образец под исследованием. Принцип измерения заключается в анализе изменения амплитуды ультразвукового сигнала с увеличением протяженности его передачи через материал. Значение коэффициента абсорбции ультразвука рассчитывается согласно специализированной формуле.

$$\alpha = -\frac{1}{x_2 - x_1} \ln \frac{A_2}{A_1}$$

где A_1 и A_2 обозначают амплитуду сигнала на разных дистанциях x_1 и x_2 .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе данного исследования:

- 1) Рассмотрена теория распространения ультразвука в жидких металлах, полуметаллах и полупроводниках. Скорость и коэффициент поглощения ультразвука являются структурно-чувствительными свойствами среды.
- 2) Рассмотрены методы измерения акустических параметров в жидкостях. Методы перечислены в хронологическом порядке, внимание уделено как прямым, так и косвенным методам исследования.
- 3) Изучены методика и оборудование для измерения скорости и коэффициента поглощения ультразвука импульсно-фазовым методом.
- 4) Разработаны технологические карты двух внеурочных учебных занятий на тему «Ультразвук. Распространение ультразвука в среде. Методы измерения акустических параметров».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный государственный образовательный стандарт основного общего образования (утвержден приказом Министерства просвещения Российской Федерации от 31 мая 2021 г.).
2. Перышкин А.В. Физика. Учебник 9 класс, 2023 С. 174.
3. Байдов В.В., Дымов В. В., Кунин Л. Л., Михайлов И. Г. Методика измерения скорости ультразвука в расплавах // Ультразвуковая техника. 1965. № 2. С. 17–21.
4. Шутилов В. А. Основы физики ультразвука. // Л.: ЛГУ, 1980, 280 с.
5. Бессонов М. В. Измерение скорости и поглощения ультразвука в расплавах при высоких температурах. Применение ультраакустики к исследованию вещества. М.: МОПИ, 2000. 146 с.
6. Агранат Б.А. Ультразвуковая технология. М.: Высшая школа, 2004. 504с.
7. Байдов В. В., Кунин Л. Л. Применение методов ультраакустики для исследования металлургических систем в жидком состоянии. // Теория металлургических процессов, 1995. Т. 40, С. 91–104.
8. Балдев Радж, В.Раджендран, П.Паланичами. Применения ультразвука. Москва: Техносфера, 2006. 124 с.
9. Берлинкур Д., Керран Д., Жаффе Г. Пьезоэлектрические и пьезомагнитные материалы и их применение в преобразователях. // Физическая акустика. / Под ред. У. Мезона М.: Мир, 1990, Т. 4Б, С. 204– 326.
10. Баранов В. М. Ультразвуковые измерения в атомной технике. М.: Атомиздат, 2005. 264 с.

11. Голямина И. П. Ультразвук. Москва: Советская энциклопедия, 1989. 506 с.
12. Илгунас В., Яронис Э., Сукацкас В., Ультразвуковые интерферометры. Вильнюс, 2003. 115 с.
13. Калитеевский Н.И. Волновая оптика. (2-е изд.). М.: Высш. школа, 2008. 190 с.
14. Ким С. Г. Молекулярная акустика жидких полиметаллов и полупроводников. Москва, 1991. 244 с.
15. Гитис М.Б., Кунин Л.Л., Михайлов И.Г. Методика измерения скорости ультразвука в расплавах // Ультразвуковая техника. 1965. С. 21-25.
16. Агранат Б.А., Башкиров В.И., Китайгородский Ю.И., Хавский Н.Н. Ультразвуковая технология. Москва: Металлургия, 2004. 91 с.
17. Ягодин Д.А. Исследование структурной неоднородности расплавов Ga-Bi и Pd-Si методами акустометрии и гамма-денситометрии: Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Екатеринбург, 2007. 162 с.
18. Шоно А. А., Никонов А. М., Богданов В. Н. Некоторые вопросы электронного обеспечения ультразвукового интерферометра для работы с расплавами стекла. Научные труды высших учебных заведений Литовской ССР, Ультразвук, 1999, № 11, 100 с.