

УДК 534.641

Методика и устройство для экспериментальной оценки акустического импеданса вязкоупругих сред

Муравьева О.В., Муравьев В.В., Злобин Д.В., Богдан О.П., Сяктерев В.Н., Волков В.В.

Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова,
ул. Студенческая, 7, г. Ижевск 426069, Россия

Поступила 17.10.2017

Принята к печати 30.11.2017

Измерение характеристик технологических жидкостей позволяет оценить их качество, биологических тканей – дифференцировать здоровые ткани и ткани с патологиями. Одним из комплексных акустических параметров является импеданс, позволяющий наиболее полно оценивать характеристики вязкоупругих сред. Большинство методов измерения импеданса требуют использования двух и более эталонных сред и наличия калиброванных акустических преобразователей. Целью данной работы являлась разработка новой методики и установки для экспериментальной оценки продольного и сдвигового импедансов вязкоупругой среды, основанных на измерении параметров амплитудно-частотных характеристик и расчете элементов электрической схемы замещения пьезопластины, колеблющейся в исследуемой среде.

В работе описываются методика и устройство для экспериментальной оценки импедансов вязкоупругих сред. Предложенная методика позволяет измерить продольный и сдвиговый импедансы и определить скорости продольных и поперечных ультразвуковых волн и значений упругих модулей вязкоупругих сред, в том числе в различных агрегатных состояниях. Методика достаточно проста в реализации и может быть воспроизведена с помощью несложного лабораторного оборудования.

Полученные значения акустических импедансов исследованных сред удовлетворительно согласуются с их справочными данными. В отличие от известных методов определения акустического импеданса, разработанная методика позволяет с достаточной точностью оценивать трудно поддающееся измерению на частотах мегагерцового диапазона значение сдвигового импеданса вязкоупругих сред, определяющее модуль сдвига материала и характеризующее его сопротивление сдвиговым деформациям. Приведены результаты реализации разработанной методики для оценки акустических параметров на примере ряда сред с нулевой сдвиговой упругостью (спирт, ацетон) и вязкоупругих сред (глицерин, архитектурный пластилин, силиконовый герметик, клей МР-55 до и после полимеризации).

Ключевые слова: акустический импеданс, вязкоупругие среды, методика измерений, АЧХ, схема замещения пьезопластины.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-4-314-326

Адрес для переписки:

Богдан О.П.

Ижевский государственный технический университет
имени М.Т. Калашникова,
ул. Студенческая, 7, г. Ижевск 426069, Россия
e-mail: pmkk@istu.ru

Address for correspondence:

Bogdan O.P.

Kalashnikov Izhevsk State Technical University,
Studencheskaya str., 7, Izhevsk 426069, Udmurt Republic, Russia
e-mail: pmkk@istu.ru

Для цитирования:

Муравьева О.В., Муравьев В.В., Злобин Д.В., Богдан О.П.,
Сяктерев В.Н., Волков В.В.

Методика и устройство для экспериментальной оценки
акустического импеданса вязкоупругих сред.

Приборы и методы измерений.

2017. – Т. 8, № 4. С. 314–326.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-4-314-326

For citation:

Murav'eva O.V., Murav'ev V.V., Zlobin D.V., Bogdan O.P.,
Syakterev V.N., Volkov V.V.

[Technique and device for the experimental estimation of the acoustic
impedance of viscoelastic medium].

Devices and Methods of Measurements.

2017, vol. 8, no. 4, pp. 314–326 (in Russian).

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-4-314-326

Technique and device for the experimental estimation of the acoustic impedance of viscoelastic medium

Murav'eva O.V., Murav'ev V.V., Zlobin D.V., Bogdan O.P., Syakterev V.N., Volkov V.V.

Kalashnikov Izhevsk State Technical University,
Studencheskaya str., 7, Izhevsk 426069, Russia

Received 17.10.2017

Accepted for publication 30.11.2017

Abstract

Measuring the characteristics of process fluids allows us to evaluate their quality, biological tissues – to differentiate healthy tissues and tissues with pathologies. Measuring the characteristics of process fluids allows us to evaluate their quality, biological tissues – to differentiate healthy tissues and tissues with pathologies. One of the complex acoustic parameters is the impedance, which allows one to fully evaluate the characteristics of viscoelastic media. Most of impedance methods of measurements require using two or more reference media and the availability of calibrated acoustic transducers. The aim of this work was to introduce a method and construction for the experimental evaluation of the longitudinal and shear impedance of viscoelastic media based on measuring the parameters of the amplitude-frequency characteristics and calculating the elements of the electric circuit for replacing the piezoelectric element which vibrates in the test medium.

The paper introduces a method and construction of the experimental evaluation of the impedances of viscoelastic media. The suggested method is allowed measuring longitudinal and shear impedances and determining velocities of longitudinal and transverse ultrasonic waves and the values of the elastic moduli of viscoelastic media, including in various aggregate states. The technique is fairly simple to implement and can be reproduced using simple laboratory equipment.

The obtained values of the acoustic impedances of the investigated media are in satisfactory agreement with their reference data. In contrast to the known methods for determining the acoustic impedance, the developed technique allows us to estimate with sufficient accuracy the parameter of the shear impedance of viscoelastic media that is difficult to measure at the frequencies of the megahertz range, which determines the shear modulus of the material and characterizes its resistance to shear deformations. The results of the implementation of the developed technique for the estimation of acoustic parameters for a number of media with zero shear elasticity (alcohol, acetone) and viscoelastic media (glycerin, architectural clay, silicone sealant and glue MP-55 before and after polymerization) are presented.

Keywords: acoustic impedance, viscoelastic media, methods of measurements, amplitude frequency response, equivalent circuit piezoelectric plate.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-4-314-326

Адрес для переписки:

Богдан О.П.
Ижевский государственный технический университет
имени М.Т. Калашникова,
ул. Студенческая, 7, г. Ижевск 426069, Россия
e-mail: pmkk@istu.ru

Address for correspondence:

Bogdan O.P.
Kalashnikov Izhevsk State Technical University,
Studencheskaya str., 7, Izhevsk 426069, Udmurt Republic, Russia
e-mail: pmkk@istu.ru

Для цитирования:

Муравьева О.В., Муравьев В.В., Злобин Д.В., Богдан О.П.,
Сяктерев В.Н., Волков В.В.
Методика и устройство для экспериментальной оценки
акустического импеданса вязкоупругих сред.
Приборы и методы измерений.
2017. – Т. 8, № 4. С. 314–326.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-4-314-326

For citation:

Murav'eva O.V., Murav'ev V.V., Zlobin D.V., Bogdan O.P.,
Syakterev V.N., Volkov V.V.
[Technique and device for the experimental estimation of the acoustic
impedance of viscoelastic medium].
Devices and Methods of Measurements.
2017, vol. 8, no. 4, pp. 314–326 (in Russian).

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-4-314-326

Введение

Акустические параметры упругих волн широко используются для оценки свойств материалов, в частности напряженно-деформированного и структурного состояния металла и его дефектоскопии [1–3]. Измерение характеристик вязкоупругих сред является актуальной задачей как для многих областей промышленности, так и для целей медицинской диагностики. Измерение характеристик технологических жидкостей, свойства которых изменяются с течением времени вследствие полимеризации (жидкие клеи) и в процессе использования (топливо, масло, горюче-смазочный материал), позволяет оценить их качество [3]. На оценке характеристик биологических тканей основаны методы медицинской диагностики (эластография, импедансометрия) [4], реализация которых требует знания истинных значений свойств здоровых тканей и тканей с патологическими изменениями.

Физической основой применения ультразвуковых (УЗ) методов для измерения характеристик вязкоупругой среды является функциональная связь параметров УЗ волн (скорость распространения, коэффициент затухания, акустический импеданс) с физико-химическими свойствами среды. Акустический импеданс Z , определяемый произведением плотности среды ρ на скорость волны C , является комплексной величиной и позволяет наряду с вязкостью среды оценить ее упругие свойства.

В настоящее время известен ряд физических методов, с помощью которых возможно оценивать акустический импеданс сред, в том числе и биологических. Большинство методов основано на сравнении измеряемых акустических импедансов с акустическими импедансами эталонных сред. Известные методы используют явления отражения импульсов ультразвуковых волн от границы эталонных и исследуемой сред, явления затухания нормальных волн в тонких пластинах различной толщины, погруженных в эталонную и исследуемую жидкости, и др. [3]. Большинство указанных методов требуют использования двух и более эталонных сред и наличия калиброванных акустических преобразователей. Имеет место недостаточная точность измерений для сильно поглощающих сред, а также для сред с низким значением сдвигового импеданса. В литературе имеются результаты оценки сдвиговых вязкоупругих свойств жид-

костей в области низких частот, основанные на измерении собственной частоты и добротности пьезокварцевого резонатора [5, 6], на измерении резонанса крутильных колебаний трубки, заполненной жидкостью [7, 8], на измерении сдвиговых гармонических деформаций методом ротационной реометрии [9], анализе амплитудных и фазовых характеристик продольных ультразвуковых колебаний [10].

Целью данной работы являлись разработка новой методики и установки для экспериментальной оценки продольного и сдвигового импедансов вязкоупругой среды, основанных на измерении параметров амплитудно-частотных характеристик и расчете элементов электрической схемы замещения пьезопластины, колеблющейся в исследуемой среде, и их апробация на образцах вязкоупругих сред с различным агрегатным состоянием.

Теоретическое обоснование методики

В качестве чувствительного элемента в методике использован пьезокерамический элемент в форме пьезопластины с нанесенными на нее электродами и поляризованной в определенном направлении (продольная поляризация и сдвиговая поляризация).

Колеблющаяся пьезопластина представляет собой электромеханическую систему, исследование процессов в которой возможно с использованием метода электроакустических аналогий путем преобразования всех элементов механической системы в электрические или наоборот.

Для пьезопластины массой m , упругостью k и внутренними потерями, описываемыми силой трения r , находящейся под действием периодической силы $F = F_0 \sin(\omega t)$, уравнение движения относительно деформации x пьезопластины имеет вид [11]:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + r \frac{dx}{dt} + kx = F_0 \sin(\omega t). \quad (1)$$

Дифференциальное уравнение вынужденных электрических колебаний в электрическом колебательном контуре, состоящем из индуктивности L , емкости C и активного сопротивления R , под действием напряжения $U = U_0 \sin(\omega t)$ описывается выражением:

$$L \frac{d^2 q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} = U_0 \sin(\omega t). \quad (2)$$

Сравнение выражений (1) и (2) показывает, что колеблющуюся пьезопластину можно заменить эквивалентной электрической схемой замещения, состоящей из чисто электрической емкости C_1 , соединенной параллельно с цепочкой последовательно соединенных индуктивности L , емкости C и активного сопротивления R (рисунок 1а) [10].

Электрическая емкость C_1 пьезопластины толщиной d_p и площадью S_p определяется ее диэлектрическими свойствами и размерами: $C_1 = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S_p}{d_p}$ (где ε – относительная диэлектрическая проницаемость пьезопластины; ε_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума ($8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м)).

Эквивалентная индуктивность L зависит в основном от колеблющейся массы, пьезоэлектрических и упругих свойств пьезопластины. Эквивалентная емкость C определяется упругими и пьезоэлектрическими свойствами пьезопластины. Активное эквивалентное сопротивление R складывается из сопротивления внутренних механических потерь в пьезопластине R_V и сопротивления излучения R_I в окружающую среду, соединенных последовательно.

Эквивалентная схема замещения (рисунок 1а) обладает двумя резонансами – последовательным и параллельным. Последовательный резонанс (резонанс напряжений) возникает в цепи последовательного контура, образованного емкостью C и индуктивностью L , при равенстве емкостного X_C и индуктивного X_L сопротивлений, на частоте $f = f_r$, определяемой формулой: $f_r = 1/2\pi\sqrt{\frac{1}{LC}}$.

При последовательном резонансе полное сопротивление контура является чисто активным и имеет небольшую величину, равную R , при этом наблюдается минимум напряжения U_r .

Параллельный резонанс (резонанс токов) возникает в цепи параллельно включенных индуктивности L и емкости, образованной последовательным соединением емкостей C и C_1 . Частота параллельного резонанса (антирезонанса) определяется формулой:

$$f_a = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} (1 + C/C_1)}.$$

При параллельном резонансе сопротивление контура имеет чисто активный характер и значительную величину, а амплитуда напряжения U_a максимальна. В режиме излучения пьезопластина работает на частоте последовательного резонанса f_r , в режиме приема – на частоте антирезонанса f_a .

Вид амплитудно-частотной зависимости электрического напряжения U представлен на рисунке 1б. Параллельный и последовательный резонансы в амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) пьезопластины ярко выражены в тех случаях, когда потери в колебательной системе невелики (например, в свободной пьезопластине, находящейся в воздухе), при этом ее активное сопротивление R определяется только внутренними потерями R_V , а сопротивление излучения в окружающую среду R_I бесконечно мало. Если пьезопластина находится в акустическом контакте с окружающей средой ее активное сопротивление R возрастает на величину сопротивления излучения R_I за счет излучения акустической волны в окружающую среду. Сопротивление излучения R_I тем больше, чем ближе по значению акустические импедансы пьезопластины и окружающей ее среды. При этом добротность колебательной системы резко уменьшается.

Таким образом, измеряя АЧХ и определяя параметры схемы замещения свободной пьезопластины и пьезопластины в условиях нагружения на вязкоупругую среду, можно оценить ее акустический импеданс.

АЧХ может быть измерена с использованием электрической схемы, приведенной на рисунке 1а, посредством регистрации электрического напряжения U при изменении частоты электрического напряжения U_g , подаваемого через сопротивление развязки R_p с генератора на исследуемую пьезопластину.

Регистрируя частоты резонанса f_r и антирезонанса f_a и решая систему уравнений относительно f_a и f_r , можно определить эквивалентные параметры схемы замещения C и L :

$$C = C_1 \left[\left(\frac{f_a}{f_r} \right)^2 - 1 \right], \quad (3)$$

$$L = \frac{1}{f_r^2 C 4\pi^2}. \quad (4)$$

Эквивалентное сопротивление R схемы замещения может быть найдено по измеренному значению напряжения U_r в режиме последовательного резонанса, исходя из электрической схемы (рисунок 1а), по формуле:

$$R = \frac{R_p}{\frac{U_g}{U_r} - 1}, \quad (5)$$

где U_g – напряжение, подаваемое на пьезопластину; R_p – сопротивление развязки.

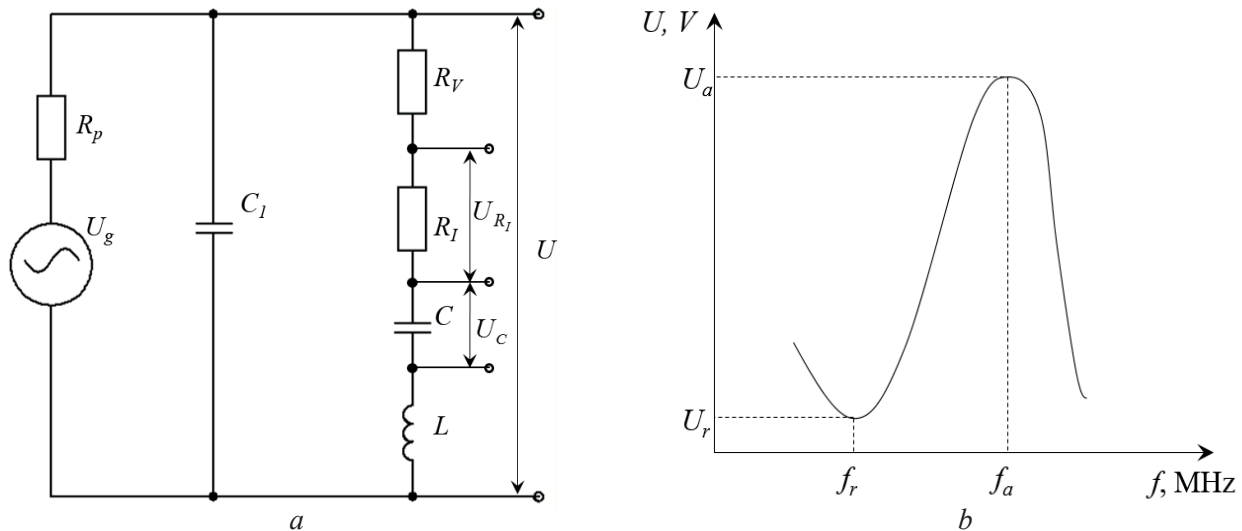


Рисунок 1 – Пьезопластина: *a* – эквивалентная электрическая схема; *b* – амплитудно-частотная характеристика
Figure 1 – Piezoelectric plate: *a* – equivalent circuit; *b* – amplitude frequency response

Акустический импеданс Z среды связан с мощностью акустического излучения P и амплитудой смещений в акустической волне A в режиме резонанса следующим соотношением [11]:

$$Z = \frac{2P}{4\pi^2 f_r^2 A^2 S_p}. \quad (6)$$

Мощность акустического излучения P численно равна электрической мощности при излучении и может быть определена согласно электрической схеме (рисунок 1а):

$$P = \frac{U_{R_I}^2}{R_I}, \quad (7)$$

где U_{R_I} – падение напряжения на сопротивлении R_p , определяемое формулой:

$$U_{R_I} = \frac{U_r R_I}{R_V + R_I} = \frac{U_r R_I}{R}. \quad (8)$$

Сопротивление R_{I_p} , определяющее внутренние потери пьезопластины, может быть определено как эквивалентный параметр схемы замещения свободной (колеблющейся в воздухе) пьезопластины; полное активное сопротивление R – как эквивалентный параметр схемы замещения пьезопластины, нагруженной на вязкоупругие среды; сопротивление R_p , определяющее потери на излучение, находится как разность величин R и R_{I_p} .

Амплитуда акустической волны в исследуемой среде, согласно уравнениям обратного пьезоэффекта, прямопропорциональна падению напряжения U_C на емкости C с коэффициентом пропорциональности K [11]:

$$A = U_C K, \quad (9)$$

где U_C – падение напряжения на емкости C , определяемое формулой:

$$U_C = \frac{U_r}{(R_V + R_I) 2\pi f C}. \quad (10)$$

Коэффициент пропорциональности K может быть найден при определении эквивалентных параметров схемы замещения пьезопластины, нагруженной на эталонную среду с известным акустическим импедансом Z_s :

$$K = \frac{A_s}{U_{C_s}}, \quad (11)$$

где U_{C_s} – падение напряжения на емкости C при нагружении пьезопластины на эталонную среду; A_s – амплитуда акустической волны в эталонной среде, определяемая формулой:

$$A_s = \sqrt{\frac{P_s}{2\pi^2 Z_s f_{rs}^2 S_s}}, \quad (12)$$

где f_{rs} – частота последовательного резонанса при нагружении пьезопластины на эталонную среду; P_s – мощность акустического излучения в эталонную среду, определяемая выражением (7).

Подстановка в формулу (6) формул (7)–(12) дает следующую формулу для определения акустического импеданса исследуемой вязкоупругой среды:

$$Z = \frac{U_{R_I}^2 U_{C_s}^2 Z_s f_{rs}^2 R_{I_s}}{U_{R_I s}^2 U_C^2 f_r^2 R_I}, \quad (13)$$

где U_C и U_{C_s} – падение напряжения на емкости C при нагрузке пьезопластины на исследуемую и эталонную среды (формула (10)); U_{R_i} и $U_{R_{i_s}}$ – падение напряжения на сопротивлении R_i при нагрузке пьезопластины на исследуемую и эталонную среды (формула (8)); f_r и f_{r_s} – измеренные частоты последовательного резонанса при нагрузке пьезопластины на исследуемую и эталонную среды соответственно; Z_s – акустический импеданс эталонной среды; $R_l = R - R_V$ и $R_{l_s} = R_s - R_V$ – сопротивление излучения для исследуемой и эталонной сред соответственно; R и R_s – эквивалентные параметры схемы замещения (формула (5)) для исследуемой и эталонной сред соответственно; R_V – эквивалентные параметры схемы замещения (формула (5)) для свободной пьезопластины.

Экспериментальная установка для исследований

Блок-схема установки для экспериментальной оценки акустического импеданса среды представлена на рисунке 2. К генератору через сопротивление развязки R_p подключается пьезопластина, работающая на продольном пьезоэффекте (пьезомодуль d_{33}) либо сдвиговом пьезоэффекте (пьезомодуль d_{15}). Тип поляризации

пьезопластины определяет возможность измерения продольного $Z_l = \rho C_l$ или сдвигового $Z_t = \rho C_t$ акустического импеданса среды. Изменяя частоту сигнала генератора U_g , подаваемого на пьезопластину, регистрируют параметры амплитудно-частотной характеристики: частоты резонанса f_r и антирезонанса f_a и соответствующие им значения минимального U_r и максимального U_a напряжения.

Согласно методике, измерение акустического импеданса вязкоупругой среды происходит в три этапа: определение параметров АЧХ ненагруженной (свободной) пьезопластины, колеблющейся в воздухе; определение параметров АЧХ той же пьезопластины, погруженной в эталонную среду; определение параметров АЧХ той же пьезопластины, погруженной в исследуемую среду.

Измеренные параметры АЧХ для свободной пьезопластины позволяют определить сопротивление R_V внутренних потерь; для пьезопластины в эталонной среде – входящие в формулу (13) значения падения напряжений U_{C_s} и $U_{R_{i_s}}$, частоты последовательного резонанса f_{r_s} , эквивалентного параметра схемы замещения R_{l_s} ; для пьезопластины в исследуемой вязкоупругой среде – входящие в формулу (13) значения U_C , U_{R_i} , f_r , R_l .

Характеристики пьезопластин с продольной и сдвиговой поляризацией представлены в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

Характеристики пьезопластин Characteristics of piezoelectric plates

| Материал Material | Тип Type | Размеры, мм Dimensions, mm | Электрическая емкость C_1 , нФ Electrical capacitance C_1 , nF | Плотность ρ , кг/м ³ Density ρ , kg / m ³ | Пьезомодуль d_{33} , 10 ⁻¹² Кл/Н Piezomodule d_{33} , 10 ⁻¹² Kl/N | Пьезомодуль d_{15} , 10 ⁻¹² Кл/Н Piezomodule d_{15} , 10 ⁻¹² Kl/N | Относительная диэлектрическая проницаемость ϵ Relative capacitivity ϵ |
|----------------------|---|-------------------------------------|--|--|---|---|---|
| ЦТС-19 | продольная поляризация longitudinal polarization | 20 × 20 × 1 | 5,8 | 7740 | 200 | – | 1725 |
| PIC050 | сдвиговая поляризация shear polarization | 18 × 18 × 0,75 | 6,9 | 4700 | 40 | 80 | 60 |

В качестве эталонной среды с известным продольным импедансом использована вода ($Z_l = 1,5 \cdot 10^6$ Па·с/м), эталонной среды с известным сдвиговым импедансом – эпоксидная смола ($Z_t = 1,59 \cdot 10^6$ Па·с/м) при температуре 20 °С.

С целью повышения точности и достоверности методики оценки акустического импеданса

исследовано влияние сопротивления развязки R_p и размера пьезопластины на точность определения основных параметров АЧХ. Исследования показали, что увеличение сопротивления R_p приводит к уменьшению регистрируемых напряжений на частотах резонанса и антирезонанса, при этом происходит сглаживание резонансов, что

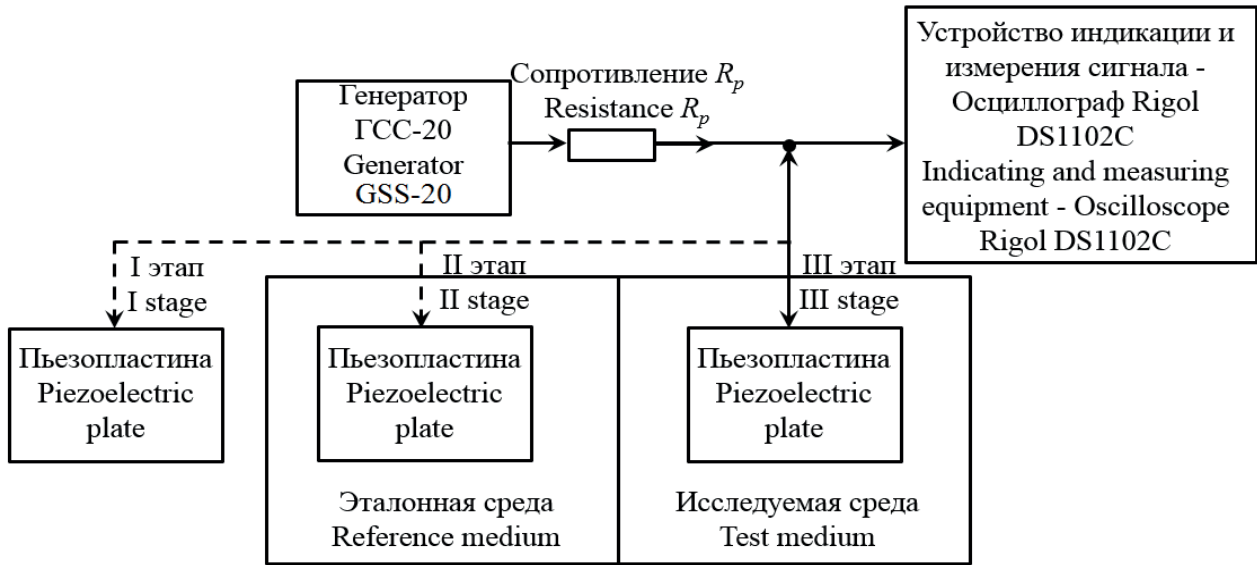


Рисунок 2 – Блок-схема установки для экспериментальной оценки акустического импеданса среды

Figure 2 – Block diagram of the installation for the experimental evaluation of the acoustic impedance of the medium

приводит к снижению точности определения измеряемых параметров, особенно для сред с высоким акустическим импедансом (рисунок 3). Максимальное значение амплитуды на частоте антирезонанса f_a имеет место при малых сопро-

тивлениях развязки (50–300 Ом), при этом минимум амплитуды на частоте резонанса f_r является наиболее выраженным. Нижний предел сопротивления развязки 50 Ом ограничен выходным сопротивлением генератора.

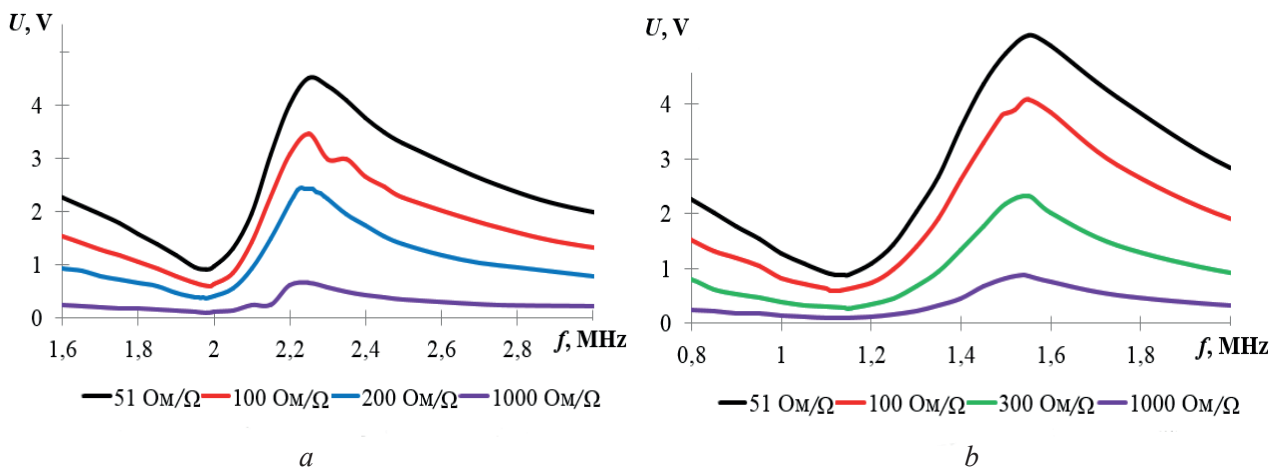


Рисунок 3 – Влияние сопротивления развязки на амплитудно-частотную характеристику пьезопластин: *a* – пьезопластина с продольной поляризацией, нагруженная на воду; *b* – пьезопластина со сдвиговой поляризацией, нагруженная на эпоксидную смолу

Figure 3 – The influence of the isolation resistance on the amplitude-frequency characteristic of piezoelectric plates: *a* – piezoelectric plate with longitudinal polarization loaded on water; *b* – piezoelectric plate with shift polarization loaded on epoxy resin

Результаты исследования влияния размера пьезопластины, нагруженной на эталонные среды, на характер АЧХ представлены на рисунке 4. Частоты резонанса и антирезонанса определяются толщиной пьезопластины, при этом соответствующие им амплитуды напряжений наиболее

ярко выражены для пьезопластин с равными сторонами. Для пьезопластин с неравными сторонами возможно возникновение дополнительных резонансов в АЧХ пьезопластины, что снижает достоверность методики оценки импеданса. Так как резонансные свойства пьезопластин могут

отклоняться от номинальных даже в пределах одной партии, все три этапа измерений следует

проводить с использованием одной и той же пьезопластины.

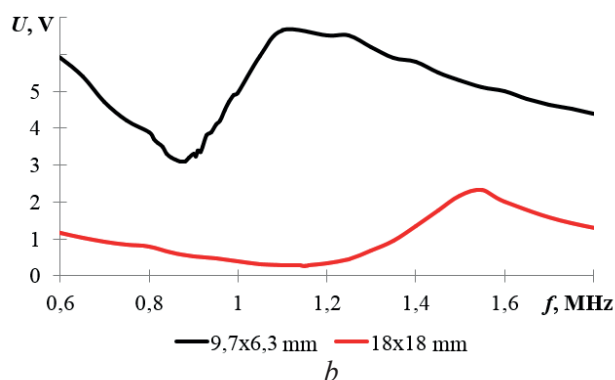
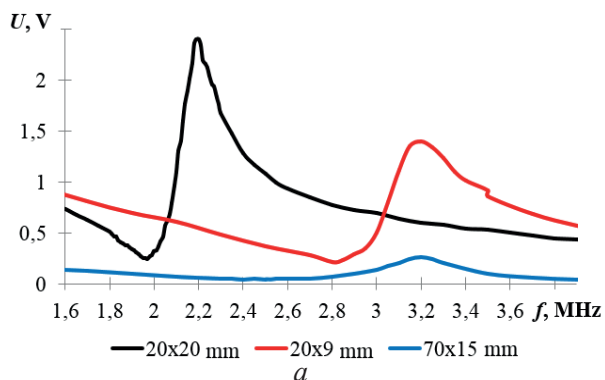


Рисунок 4 – Влияние размера пьезопластины на ее амплитудно-частотную характеристику ($R_p = 300 \text{ Ом}$): *a* – пьезопластина с продольной поляризацией, нагруженная на воду; *b* – пьезопластина со сдвиговой поляризацией, нагруженная на эпоксидную смолу

Figure 4 – The influence of the size of the piezoceramic plate on the amplitude-frequency response ($R_p = 300 \text{ }\Omega$): *a* – piezoelectric plate with longitudinal polarization loaded on water; *b* – piezoelectric plate with shift polarization loaded on epoxy resin

Результаты и обсуждение

Результаты измерения АЧХ для пьезопластин с продольной и сдвиговой поляризацией в свободном состоянии, нагруженных на эталонные среды (вода и эпоксидная смола после отверждения) и исследуемую среду – глицерин, представлены на рисунке 5. Для пьезопластины с продольной поляризацией (рисунок 5*a*) наибольшая амплитуда $U_a = 6,54 \text{ В}$ на частоте антирезонанса $f_a = 2,21 \text{ МГц}$ и наименьшая $U_r = 0,104 \text{ В}$ на частоте резонанса $f_r = 2,01 \text{ МГц}$ наблюдается в случае нагружения пьезопластины на воздух с наименьшим значением акустического импеданса $Z_l = 417 \text{ Па}\cdot\text{с/м}$. Для глицерина, имеющего максимальное среди исследуемых жидкостей значение акустического импеданса $Z_l = 2,42 \cdot 10^6 \text{ Па}\cdot\text{с/м}$, наоборот ампли-

туда при резонансе имеет максимальное значение $U_r = 0,47 \text{ В}$, а при антирезонансе – минимальное $U_a = 2,07 \text{ В}$. При этом наблюдается увеличение частоты антирезонанса ($f_a = 2,24 \text{ МГц}$) и уменьшение частоты резонанса ($f_r = 1,97 \text{ МГц}$). Для пьезопластины с продольной поляризацией, помещенной в эталонную среду (вода) со значением продольного импеданса Z_p , находящегося между значениями для воздуха и глицерина, параметры АЧХ имеют промежуточные значения в сравнении с АЧХ пьезопластины, находящейся в воздухе и в глицерине.

Для пьезопластины со сдвиговой поляризацией, нагруженной на воздух, глицерин и эпоксидную смолу, наблюдается аналогичная картина: чем больше сдвиговый акустический импеданс среды, тем выше напряжение на резонансной частоте, при этом ее значение уменьшается.

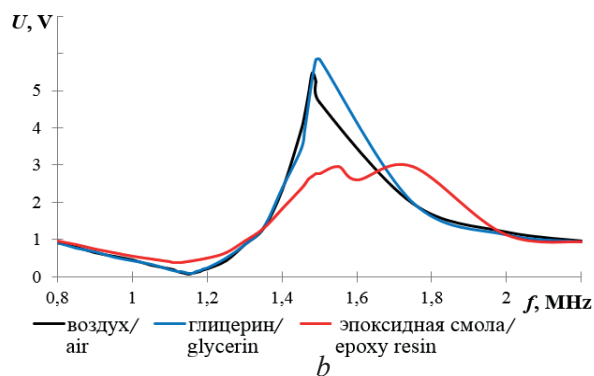
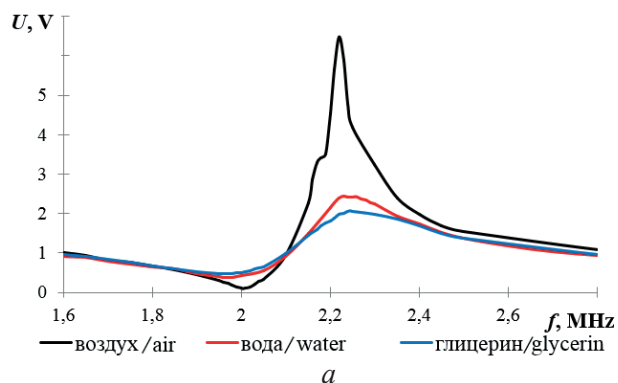


Рисунок 5 – Амплитудно-частотные характеристики пьезопластин с продольной (*a*) и сдвиговой (*b*) поляризацией, нагруженных на разные среды ($R_p = 200 \text{ Ом}$)

Figure 5 – Amplitude frequency response of the piezoelectric plates with longitudinal (*a*) and shear (*b*) polarization loaded on different media ($R_p = 200 \text{ }\Omega$)

Значения измеренных параметров АЧХ (f_a, f_p, U_p) и рассчитанных согласно описанной методике электрических параметров эквивалентной схемы заме-

щения для пьезопластин с продольной и сдвиговой поляризацией, нагруженных на воздух, эталонную и исследуемую среды представлены в таблице 2.

Таблица 2 / Table 2

Параметры амплитудно-частотной характеристики и эквивалентные параметры схемы замещения пьезопластины, нагруженной на различные среды, в режиме резонанса
Parameters of the amplitude-frequency response and equivalent parameters of the circuit for replacing a piezoelectric plate loaded on various media in resonance mode

| Пьезопластина с продольной поляризацией ЦТС-19 20 × 20 × 1 мм, C ₁ = 5,8 нФ Piezoelectric plate with longitudinal polarization ЦТС-19 20 × 20 × 1 mm, C ₁ = 5,8 nF | | | | | | | | | |
|---|----------------------|----------------------|--------------------|------|--------------------|-------|-------|--------------------|--------------------------------|
| Среда Medium | f _p , MHz | f _a , MHz | U _p , V | R, Ω | R _i , Ω | C, nF | L, μH | U _c , V | U _{R_i} , V |
| Воздух (внутренние потери Z _i = 417 Па·с/м) Air (internal loss Z _i = 417 Pa·s/m) | 2,01 | 2,22 | 0,104 | 2,06 | – | 1,25 | 5,05 | – | – |
| Вода (эталонная среда Z _i = 1,5·10 ⁶ Па·с/м) Water (reference fluid Z _i = 1,5·10 ⁶ Pa·s/m) | 1,98 | 2,23 | 0,380 | 7,81 | 5,75 | 1,45 | 4,46 | 2,69 | 0,28 |
| Глицерин (исследуемая среда Z _i = 2,42·10 ⁶ Па·с/м) Glycerin (test medium Z _i = 2,42·10 ⁶ Pa·s/m) | 1,97 | 2,24 | 0,470 | 9,86 | 7,80 | 1,65 | 3,98 | 2,33 | 0,37 |
| Пьезопластина со сдвиговой поляризацией PIC050 18 × 18 × 0,75 мм, C ₁ = 6,9 нФ Piezoelectric plate with shift polarization PIC050 18 × 18 × 0,75 mm, C ₁ = 6,9 nF | | | | | | | | | |
| Воздух (внутренние потери) Air (internal loss) | 1,15 | 1,48 | 0,07 | 1,37 | – | 4,53 | 4,23 | – | – |
| Эпоксидная смола (эта- лонная среда Z _i = 1,59·10 ⁶ Па·с/м) Epoxy resin (reference fluid Z _i = 1,59·10 ⁶ Pa·s/m) | 1,13 | 1,55 | 0,39 | 8,08 | 6,71 | 6,32 | 3,19 | 1,07 | 0,32 |
| Глицерин (исследуемая среда) Glycerin (test medium) | 1,15 | 1,5 | 0,09 | 1,78 | 0,41 | 4,68 | 4,09 | 1,46 | 0,02 |

Анализ значений параметров эквивалентной схемы замещения пьезопластины показывает, что увеличение акустического импеданса окружающей пьезопластину среды ведет к существенно увеличению сопротивления излучения, что обусловлено лучшим согласованием материала пьезопластины и среды по акустическому импедансу, при этом эквивалентная емкость C , определяемая упругими свойствами пьезопластины, увеличивается, особенно существенно в случае пьезопластины со сдвиговой поляризацией, а эквивалентная индуктивность L , определяемая

колеблющейся массой, уменьшается, что обусловлено влиянием присоединенной массы окружающей среды.

Случайные погрешности измерений параметров АЧХ по результатам 5 измерений составили: для напряжения в области резонанса в случае пьезопластины, находящейся в воздухе, 7 %, для пьезопластины, нагруженной на воду, – 2 %; для частот резонанса и антирезонанса – менее 1 %. Случайная погрешность оценки продольного импеданса составила 10 %, сдвигового импеданса – 25 %.

Таблица 3 / Table 3

Продольный и сдвиговый акустические импедансы, скорости и модули упругости исследуемых сред
Longitudinal and shear acoustic impedances, elastic moduli and velocity of test mediums

| Среда Medium | Акустический импеданс, 10^6 , Па·с/м эксп. / спр. Acoustic impedances, 10^6 , Pa·s/m exp. / ref. | | Плотность ρ , kg/m ³ Density ρ , kg/m ³ | Скорость УЗ волны эксп. / спр. Velocity of ultrasonic wave exp. / ref. | | Модуль объемной упругости K , ГПа эксп. / спр. Modulus of compression K , ГПа exp. / ref. | Модуль сдвига G , МПа эксп. / спр. Shear modulus G , МПа exp. / ref. | Модуль Юнга E , МПа эксп. / спр. Elasticity modulus E , МПа exp. / ref. | Коэффициент Пуассона ν эксп. / спр. Poisson ratio ν exp. / ref. |
|--|---|---------------------|--|---|-----------------------------------|---|---|--|--|
| | продольный Z_l | сдвиговый Z_t | | C_p м/с longitudinal C_p , m/s | C_s м/с shear C_s , m/s | | | | |
| Глицерин / Glycerin | 2,8 / 2,4 | 0,04 / – | 1260 | 2230 / 1900 | 31 / – | 6,26 / 4,65 | 1,27 / – | 3,81 / – | 0,49984 / 0,5 |
| Ацетон / Acetone | 0,8 / 0,9 | – | 790 | 1040 / 1190 | – | 0,85 / 1,08 | – | – | 0,5 |
| Спирт / Alcohols | 1,1 / 0,9 | – | 790 | 1410 / 1150 | – | 1,56 / 1,09 | – | – | 0,5 |
| Архитектурный пластилин / Architectural plasticine | 2,4 / 2,32 [12] | 0,48 / 0,59 [12] | 1340 [12] | 1780 / 1730 | 360 / 440 | 4,03 / 3,67 | 170 / 260 | 510 / 760 | 0,46912 / 0,44987 |
| Клей Момент Монтаж Особо- прочный МР-55, до полимеризации Adhesive Moment Mounting Extra-strong МР-55, before polymerization | 3,5 / – | 0,14 / – | 1260 | 2780 / – | 110 / – | 9,70 / – | 15,6 / – | 46,6 / – | 0,49879 / – |
| Клей Момент Монтаж Особо- прочный МР-55, полимеризация 3 сут. Adhesive Moment Mounting Extra- strong МР-55, polymerization 3 day | 4,5 / – | 0,45 / – | 1260 | 3590 / – | 360 / – | 16,07 / – | 160 / – | 480 / – | 0,49256 / – |
| Герметик силиконовый универ- сальный «Экон», до полимеризации Silicone Universal Sealant «Ekon», before polymerization | 0,97 / – | 0,047 / – | 980 | 990 / – | 48 / – | 0,96 / – | 2,25 / – | 6,76 / – | 0,49824 / – |
| Герметик силиконовый универ- сальный «Экон», полимеризация 7 сут. Silicone Universal Sealant «Ekon», polymerization 7 day | 1,3 / – | 0,060 / – | 980 | 1280 / – | 61 / – | 1,59 / – | 3,67 / – | 11,01 / – | 0,49827 / – |

Результаты оценки продольного и сдвигового акустических импедансов для ряда исследуемых сред: глицерин, ацетон, спирт, архитектурный пластилин, герметик силиконовый универсальный «Экон», клей «Момент Монтаж Особопрочный МР-55» до и после полимеризации и их справочные значения представлены в таблице 3.

Продольный Z_l и сдвиговый Z_t акустические импедансы сред связаны с упругими модулями среды (модуль объемной упругости K , модуль Юнга E , модуль сдвига G , коэффициент Пуассона ν) [11]:

$$\nu = \frac{Z_l^2 - 2Z_t^2}{2(Z_l^2 - Z_t^2)}, \quad G = Z_t^2 / \rho, \quad E = Z_l^2 / \rho \frac{3 - 4Z_t^2 / Z_l^2}{1 - Z_t^2 / Z_l^2}, \quad K = \frac{Z_l^2}{3\rho} (3 - 4Z_t^2 / Z_l^2).$$

В таблице 3 приведены также результаты оценки упругих модулей исследуемых сред по измеренным значениям их акустических импедансов.

Из данных таблицы 4, в частности, следует, что в процессе полимеризации клея «Момент Монтаж Особопрочный МР-55» продольный акустический импеданс увеличился почти на 30 %, а сдвиговый акустический импеданс вырос почти в три раза. Аналогичные значения для силиконового герметика составили 34 % для продольного акустического импеданса и 28 % для сдвигового акустического импеданса. Наряду с измеренными, в таблице 3 приведены справочные данные импедансов, скоростей УЗ волн и упругих модулей для некоторых сред. Наблюдается удовлетворительное согласование полученных значений акустических импедансов исследованных сред с их справочными данными. Прочерки в графе экспериментальных значений означают невозможность оценки сдвигового импеданса сред с низкой сдвиговой упругостью. Прочерки в графе справочных значений означают их отсутствие в литературных источниках. Отметим, что представленные в таблице экспериментальные значения скоростей продольных УЗ волн C_l для исследуемых сред подтверждены их измерением эхо-импульсным методом с использованием УЗ дефектоскопа УД 9812 Уралец. Наблюдаемые отклонения измеренных значений от справочных могут быть обусловлены наличием различных примесей в исследуемых средах, а также погрешностями измерения. Полученные впервые значения сдвигового акустического импеданса, сдвиговой скорости звука и сдвиговых модулей исследуемых сред удовлетворительно

$$Z_l = \rho C_l = \sqrt{\frac{3\rho K(1-\nu)}{(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{\rho E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}}, \quad (14)$$

$$Z_t = \rho C_t = \sqrt{\rho G} = \sqrt{\frac{3\rho KE}{9K - E}}. \quad (15)$$

Решение системы уравнений (17) – (18), позволяет вычислить значения упругих модулей исследуемых сред:

согласуются с известными данными для других вязкоупругих сред: нефть [7–9] в диапазоне температур от -10 °С до 60 °С ($Z_l \approx 0,005 \cdot 10^6$ Па с/м, $C_t \approx 5,6$ м/с, $G \approx 1 \cdot 10^6 - 3 \cdot 10^3$ Па), буровые растворы [5] ($G \approx 3 \cdot 10^6$ Па), диэтиленгликоль и вазелиновое масло в диапазоне частот $40-74$ кГц [6] ($G \approx 0,51-1,22 \cdot 10^5$ Па и $G \approx 1,13-1,36 \cdot 10^5$ Па), архитектурный пластилин [12] ($Z_l \approx 0,59 \cdot 10^6$ Па с/м).

Заключение

Представленные в статье установка и методика измерений позволяют проводить оценку продольного и сдвигового акустических импедансов вязкоупругих сред, вычислять скорости УЗ волн и значения их упругих модулей. Описанная методика достаточно проста в реализации и может быть воспроизведена с помощью несложного лабораторного оборудования. Полученные значения акустических импедансов исследованных сред удовлетворительно согласуются с их справочными данными. Существенно, что в отличие от известных методов определения акустического импеданса разработанная методика позволяет с достаточной точностью оценивать трудно поддающийся измерению на высоких частотах параметр сдвигового импеданса вязкоупругих сред, определяющий модуль сдвига материала и характеризующий его сопротивление сдвиговым деформациям.

Определение акустических характеристик технологических сред, свойства и качество которых изменяются с течением времени (моторные масла, технические смазочные материалы и др.), представляется актуальным в задачах управления технологическими процессами и т.д. Перспек-

тивным представляется использование разработанной методики для оценки свойств биологических тканей *in vitro*, что позволит повысить информативность методов ультразвуковой медицинской диагностики. Существенным является возможность оценки акустических свойств сред в процессе полимеризации. Исследование закономерностей изменения свойств полимерных материалов (силиконовая резина, полиуретан, полиэтилен, поливинилхлорид, полиамид и др.) важно в аспекте создания новых материалов для медицинского протезирования, при конструировании и производстве медицинских изделий и фантомов биологических сред.

Следует отметить, что разработанная методика может быть использована для измерения импедансов как ньютоновских, так и неньютоновских сред, при этом АЧХ пьезопластин, нагруженных на подобные среды, может существенно меняться в зависимости от степени отклонения от законов, описываемых уравнениями Навье-Стокса.

Работа выполнена в рамках проекта № 3.5705.2017/6.7 по государственному заданию Министерства образования и науки РФ ФБГОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова» на 2017–2019 гг. по разделу «Организация проведения научных исследований».

Список используемой литературы

1. Муравьев, В.В. Оценка напряженно-деформированного состояния рельсов при изготовлении / В.В. Муравьев, К.А. Тапков // Приборы и методы измерений. – 2017. – Т. 8. – № 3. – С. 263–270. doi:10.21122/2220-9506-2017-8-3-263-270
2. Муравьев, В.В. Контроль структурного состояния сталей с помощью акустических шумов / В.В. Муравьев, О.В. Муравьева, А.И. Дедов, А.В. Байтерьяков // Приборы и методы измерений. – 2014. – № 2 (9). – С. 60–66.
3. Чуприн, В.А. Контроль жидких сред с применением ультразвуковых нормальных волн / В. А. Чуприн. – М. : Спектр, 2015. – 218 с.
4. Хилл, К. Ультразвук в медицине. Физические основы применения / К. Хилл, Дж. Бэмбер, Г. тер Хаар; пер. с англ. – М. : Физматлит, 2008. – 544 с.
5. Бадмаев, Б.Б. Вязкоупругая релаксация в жидкостях / Б.Б. Бадмаев, Б.Б. Дамдинов, Т.С. Дембелова // Известия российской академии наук. Серия физическая. – 2015. – Т. 79. – № 10. – С. 1301–1305. doi: 10.3103/S1062873815100044
6. Бадмаев, Б.Б. Сдвиговая упругость и прочность структуры жидкости на примере диэтиленгликоля / Б.Б. Бадмаев, Т.С. Дембелова, Д.Н. Макарова, Ч.Ж. Гул-

генов // Журнал технической физики. – 2017. – Т. 87. – № 1. – С. 18–21. doi: 10.1134/S1063784217010042

7. Есипов, И.Б. Медленная кинетика нелинейности вязкоупругих свойств нефти при сдвиговых колебаниях / И.Б. Есипов, О.М. Зозуля, М.А. Миронов // Акустический журнал. – 2014. – Т. 60, № 2. – С. 166–172. doi: 10.1134/S1063771014020031

8. Миронов, М.А. Медленная кинетика вязкоупругих свойств нефти при низкочастотных сдвиговых колебаниях / М.А. Миронов, И.А. Шеломихина, О.М. Зозуля, И.Б. Есипов // Акустический журнал. – 2012. – Т. 58, № 1. – С. 132–140. doi: 10.1134/S1063771014020031

9. Есипов, И.Б. Резонансный метод измерения сдвиговых вязкоупругих свойств жидких сред на основе возбуждения крутильных колебаний в трубках / И.Б. Есипов, О.М. Зозуля, А.В. Фокин // Акустический журнал. – 2010. – Т. 56, № 1. – С. 124–13. doi: 10.1134/S1063771010010161

10. Korobko, E. The Peculiarities of Ultrasound Wave Propagation in Magnetorheological Fluid with Complex Dispersive Phase / E. Korobko [et al.] // Vibroengineering. – 2015. – Vol. 6. – P. 326–329.

11. Шарапов, В.М. Пьезоэлектрические датчики / В.М. Шарапов, М.П. Мусиенко, Е.В. Шарапова. – М. : Техносфера, 2006. – 632 с.

12. Колесников, Ю.И. Об определении упругих констант высокопластичных материалов / Ю.И. Колесников, С.С. Борода // Физическая мезомеханика. – 2009. – № 12. – С. 121–126.

References

1. Muraviev V.V., Tapkov K.A. [Evaluation of strain-stress state of the rails in the production]. *Devices and Methods of Measurements*, 2017, vol. 8, no. 3, pp. 263–270 (in Russian). doi:10.21122/2220-9506-2017-8-3-263-270
2. Muraviev V.V., Muravieva O.V., Dedov A.I., Baiteryakov A.V. [Monitoring of the metal structural state by acoustical structural noise]. *Devices and Methods of Measurements*, 2014, vol. 9, no. 2, pp. 60–66 (in Russian).
3. Chuprin V.A. *Kontrol' zhidkikh sred s primeneniem ul'trozvukovykh normal'nykh voln* [Monitoring of liquid media using ultrasonic normal waves]. Moscow, LLC Publishing house SPEKTR, 2015, 218 p. (in Russian).
4. Hill C.R., Bamber J.C., ter Haar G.R. *Ul'trazvuk v meditsine. Fizicheskie osnovy primeneniya* [Ultrasound in medicine. Physical bases of application: Trans. with English]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2008, 544 p. (in Russian).
5. Badmaev B.B., Damdinov B.B., Dembelova T.S. [Viscoelastic relaxation in fluids]. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2015, vol. 79, no. 10, pp. 1301–1305 (in Russian). doi: 10.3103/S1062873815100044
6. Badmaev B.B., Dembelova T.S., Makarova D.N., Gulgenov C.Z. [Shear elasticity and strength of the liquid

structure by an example of diethylene glycol]. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 2017, vol. 62, no. 1, pp. 14–17 (in Russian).

doi: 10.1134/S1063784217010042

7. Esipov I.B., Zozulya O.M., Mironov M.A. [Slow nonlinearity kinetics of the viscoelastic properties of oil during shear vibrations]. *Acoustical Physics*, 2014, vol. 60, no. 2, pp. 169–174 (in Russian).

doi: 10.1134/S1063771014020031

8. Mironov M.A., Shelomikhina I.A., Esipov I.B., Zozulya O.M. [Slow kinetics of viscoelastic properties of oil at low-frequency shear vibrations]. *Acoustical Physics*, 2012, vol. 58, no. 1, pp. 117–124 (in Russian).

doi: 10.1134/S1063771014020031

9. Esipov I.B., Fokin A.V., Zozulya O.M. [Resonance method of measuring shear viscoelastic

properties of liquid media based on excitation of torsional oscillations in tubes]. *Acoustical Physics*, 2010, vol. 56, no. 1, pp. 115–125 (in Russian).

doi: 10.1134/S1063771010010161

10. Korobko E., Baev A., Bubulis A., Kuzmin V., Novikova Z., Novik E. The Peculiarities of Ultrasound Wave Propagation in Magnetorheological Fluid with Complex Dispersive Phase. *Vibroengineering*, 2015, vol. 6, pp. 326–329.

11. Sharapov V.M., Musiyenko M.P., Sharapova E.V. *P'ezoelektricheskie datchiki* [Piezoelectric transducers]. Moscow, Technosphere Publ., 2006, 632 p. (in Russian).

12. Kolesnikov Yu.I., Boroda S.S. [On the determination of elastic constants of highly plastic materials]. *Fizicheskaya mezomekhanika* [Physical Mesomechanics], 2009, no. 12, pp. 121–126 (in Russian).