

## ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СУСПЕНЗИЙ НА ОСНОВЕ ГЛИЦЕРИНА И МИКРОЧАСТИЦ СИНТЕТИЧЕСКОГО АЛМАЗА С ПОМОЩЬЮ РЕЗОНАТОРА С ПРОДОЛЬНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ

© 2023 г. А. П. Семёнов<sup>а</sup>, \*, Б. Д. Зайцев<sup>а</sup>, А. А. Теплых<sup>а</sup>, И. А. Бородина<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,  
ул. Рабочая 24, Саратов, 410019 Россия

\*e-mail: alex-sheih@ya.ru

Поступила в редакцию 22.03.2023 г.

После доработки 19.04.2023 г.

Принята к публикации 18.05.2023 г.

Исследованы акустические свойства суспензий на основе чистого глицерина и алмазного порошка с размером частиц 1–2 мкм с различной концентрацией с помощью резонатора с продольным электрическим полем. Дискковый резонатор из лангасита с круглыми электродами на обеих сторонах пластины с частотой 4.1 МГц, работающий на продольной акустической волне, полностью погружали в жидкостный контейнер с исследуемой суспензией. На основе измеренных частотных зависимостей реальной и мнимой частей электрического импеданса резонатора с использованием эквивалентной электромеханической схемы были определены продольный модуль упругости и продольный коэффициент вязкости исследуемых образцов. Сравнение экспериментально найденных зависимостей продольного модуля упругости, коэффициента вязкости и скорости продольной акустической волны от объемной концентрации частиц алмаза в суспензии с расчетными зависимостями показало их хорошее соответствие.

**Ключевые слова:** пьезоэлектрический резонатор с продольным электрическим полем, суспензии, резонансная частота, электрический импеданс и адмиттанс, модуль упругости, коэффициент вязкости, скорость продольной акустической волны

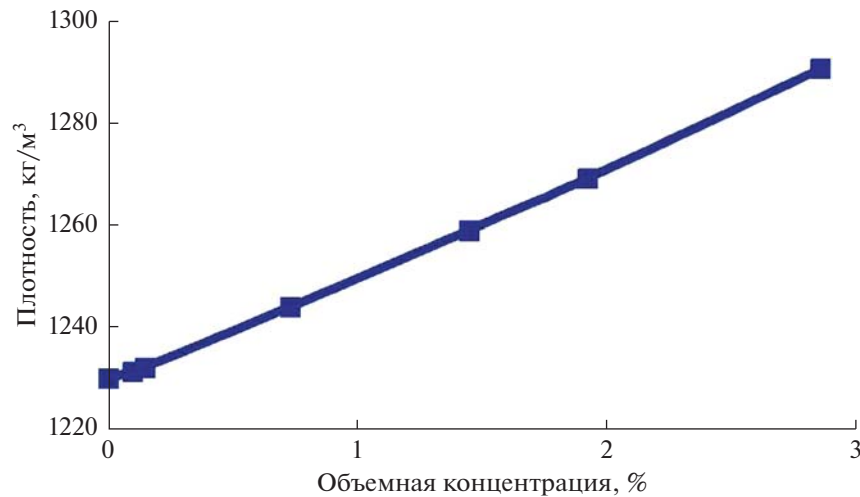
DOI: 10.31857/S0320791923600294, EDN: ZHNFZQ

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в самых разных областях науки и техники существует проблема быстрого и точного анализа различных свойств жидкостей, а также смесей на основе жидкостей и твердых частиц [1–7]. Такая проблема часто возникает при мониторинге состояния различных водоемов, сточных и грунтовых вод. Кроме того, с такими задачами часто сталкиваются специалисты в таких областях как медицина, биология, пищевая, фармацевтическая и нефтегазодобывающая промышленность [8–11]. Для исследования различных свойств жидкостей в течение многих десятилетий широко используются акустические методы и различные типы акустических волн. Например, для определения вязкости жидкости использовались акустические волны с поперечно-горизонтальной поляризацией нулевого порядка, распространяющиеся в пьезоэлектрических пластинах [12]. Весьма перспективными оказались поперечно-горизонтальные акустические

волны [13], волны высших порядков в пьезоэлектрических пластинах [14] и в многослойных структурах [15, 16]. Широко используются жидкостные датчики на пьезоэлектрических резонаторах с поперечным электрическим возбуждающим полем [17–20].

Резонаторы с продольным электрическим полем представляют собой, как правило, плоскопараллельную пластину пьезоэлектрического кристалла с круглыми электродами на обеих ее сторонах. Эти резонаторы хорошо известны как простые, надежные и легкодоступные акустоэлектронные устройства, которые могут использоваться для определения механических свойств различных пленок [21, 22]. Кристаллографическая ориентация и толщина среза кристалла определяются выбором типа чистой объемной акустической моды и рабочего частотного диапазона. При исследовании акустических свойств различных материалов с использованием таких резонаторов между поверхностью электроакустического преобразова-



**Рис. 1.** Экспериментальная зависимость плотности суспензии от объемной концентрации частиц алмаза.

теля и исследуемым объектом создается хороший акустический контакт. Это реализуется автоматически, если исследуемым объектом является жидкость.

Ранее [23] была показана возможность определения поперечного модуля упругости и поперечного коэффициента вязкости суспензий на основе глицерина и частиц синтетического алмаза с различной концентрацией с помощью резонатора с продольным электрическим полем и поперечной акустической модой. Настоящая работа является продолжением этих исследований и посвящена экспериментальному исследованию влияния указанных суспензий на характеристики резонатора с продольным электрическим полем, работающего на продольной акустической моде, и определению продольного модуля упругости и продольного коэффициента вязкости исследуемых образцов.

#### МАТЕРИАЛЫ И СПОСОБ ПРИГОТОВЛЕНИЯ СУСПЕНЗИЙ

Для исследований использовали чистый глицерин объемом 30 мл, к которому добавляли разное количество алмазного порошка АСМ 2/1 с размером частиц 1–2 мкм. Каждый образец перемешивали на магнитной мешалке в течение 5 ч. Было установлено, что время полного оседания частиц алмаза в глицерине превышало 24 ч при комнатной температуре, что хорошо наблюдалось визуально. В результате было изготовлено шесть различных образцов суспензий с объемными концентрациями частиц 0.098, 0.147, 0.73, 1.45, 1.92 и 2.86%. Для определения плотности полученных образцов фиксированный объем (1 мл)

суспензии взвешивали на аналитических весах РА-214С (“Pioneer”, OHAUS Corporation). Для точного определения объема использовали прецизионную лабораторную пипетку (“Колор”, Ленпипет).

Экспериментальная зависимость плотности суспензии от объемной концентрации частиц представлена на рис. 1. Значения плотности образцов с известной объемной концентрацией алмазного порошка, вычисленные по табличным значениям плотности глицерина и алмаза, оказались в хорошем соответствии с экспериментальными. Проводимость чистого глицерина и полученных на его основе суспензий, определяемая при помощи кондуктометра HI8733 (“Hanna”, USA), не превышала 0.1 мкСм/см во всех случаях.

#### УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ СУСПЕНЗИЙ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕЗОНАТОРОВ С ПРОДОЛЬНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ

Для проведения измерений был использован дисковый резонатор из лангасита X-среза, работающий на продольной акустической волне с круглыми электродами на обеих сторонах пьезоэлектрической пластины, который отличается низким температурным коэффициентом изменения резонансной частоты [22]. Толщина резонатора равнялась 706 мкм, диаметр электродов составлял 7.5 мм. Этот резонатор помещали в пластмассовый контейнер, объемом 30 мл (рис. 2).

Вначале измеряли частотные зависимости реальной и мнимой частей электрического импеданса свободного резонатора. Затем выбранный

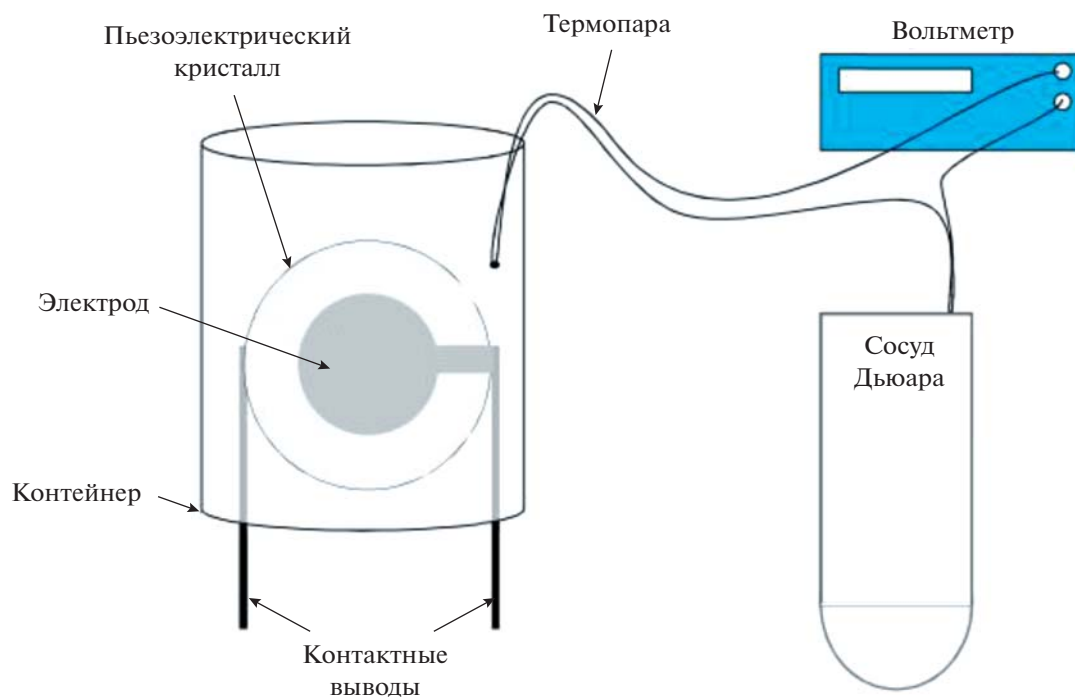


Рис. 2. Установка для проведения исследований с суспензиями.

образец суспензии перемешивали на магнитной мешалке в течение одного часа и добавляли в контейнер с резонатором так, чтобы резонатор был полностью погружен в суспензию с обеих сторон. Так как вязкость глицерина сильно зависит от его температуры [24], непосредственно перед каждым измерением в контейнер с суспензией опускали спай хромель–алюмелевой термопары, второй спай которой находился в сосуде Дьюара с тающим льдом при температуре  $0^{\circ}\text{C}$ . Концы термопары были подключены к вольтамперметру (GDM-78251A, GW Instek, Taiwan), как показано на рис. 2. Резонатор с контейнером помещали в термостат, в котором поддерживалась температура  $27.30 \pm 0.05^{\circ}\text{C}$ . Эта температура оказалась оптимальной в плане ее стабильного поддержания в термостате. Температура в помещении, где проводились измерения, поддерживалась равной  $27.0 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$  при атмосферном давлении 760 мм рт. ст. Спай термопары погружался в суспензию на 2 мин для измерения точного значения температуры суспензии. После извлечения термопары измеряли частотные зависимости реальной и мнимой частей электрического импеданса резонатора с помощью анализатора импедансов E4990A (Keysight Technologies, Santa Rosa, CA, USA). Время одного измерения не превышало 2 с.

В результате были построены зависимости резонансной частоты и добротности параллельного и последовательного резонансов, а также макси-

мальных значений электрического импеданса и адмиттанса резонатора от объемной концентрации частиц алмаза в суспензии. Оказалось, что максимальные значения электрического импеданса и адмиттанса вначале резко увеличиваются до достижения объемной концентрации частиц 0.098%, затем уменьшаются и по достижению концентрации 1.45% частиц алмаза снова увеличиваются (табл. 1). При этом частоты параллельного (4.057 МГц) и последовательного (4.06 МГц) резонансов не зависели от объемной концентрации частиц в суспензии в пределах погрешности измерений. Такая же ситуация наблюдалась для

Таблица 1. Максимальные значения электрического импеданса  $R_{\max}$  и адмиттанса  $G_{\max}$  резонатора из лангасита, погруженного в суспензию с частицами алмаза с различной объемной концентрацией  $\beta$  и различной плотностью  $\rho^s$

$\beta$ , %	$\rho^s$ , кг/м <sup>3</sup>	$R_{\max}$ , Ом	$G_{\max}$ , мкСм
0.0	1230.3	62.5	16.44
0.098	1231.6	64.76	17.3
0.147	1232.44	63.92	17.22
0.73	1244.27	62.64	16.8
1.45	1259.3	62.15	16.3
1.923	1269.35	63.3	16.55
2.857	1290.8	64.2	16.6

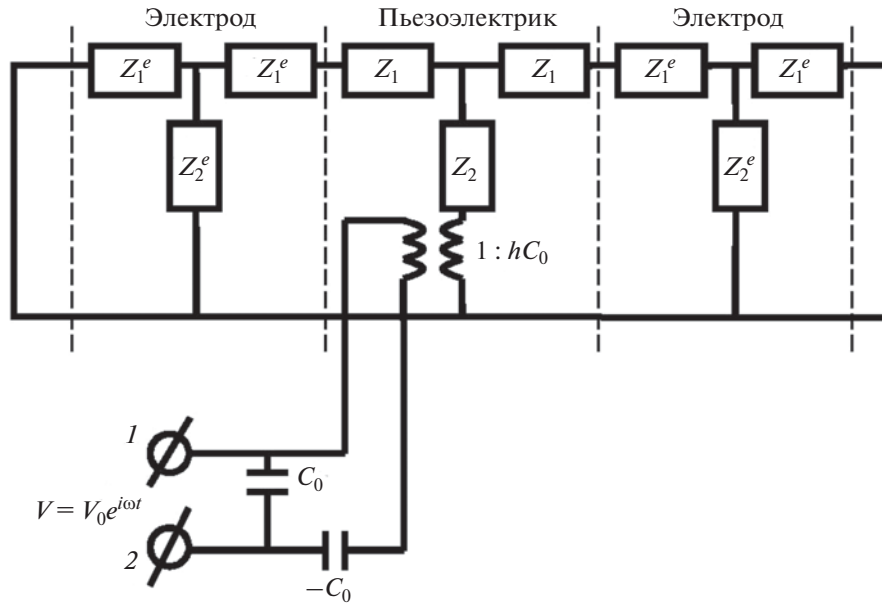


Рис. 3. Эквивалентная схема свободного резонатора с электродами.

добротностей параллельного (~16) и последовательного (~16) резонансов.

### ЭКВИВАЛЕНТНАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ СХЕМА РЕЗОНАТОРА

Для теоретического анализа частотных зависимостей электрического импеданса свободного пьезоэлектрического резонатора была использована эквивалентная электромеханическая схема [22, 25], представленная на рис. 3. Эквивалентная схема состоит из электромеханического трансформатора, электрической и механической частей. Электрическая часть включает в себя первичную обмотку трансформатора и электрические емкости  $C_0$  и  $-C_0$ , а механическая состоит из вторичной обмотки, акустических импедансов материала пьезоэлектрика  $Z_1$ ,  $Z_2$  и электродов  $Z_1^e$ ,  $Z_2^e$  [22]. Механическая часть эквивалентной схемы, соответствующая границе воздух–электрод, считалась закороченной из-за низкого акустического импеданса воздуха. Механические импедансы пьезоэлектрика  $Z_1$ ,  $Z_2$  и электродов  $Z_1^e$ ,  $Z_2^e$  на эквивалентной схеме представлены известными выражениями [23]

$$Z_1 = iz \operatorname{Stg}(kd/2), \quad (1)$$

$$Z_2 = -izS/\sin(kd), \quad (2)$$

$$Z_1^e = iz_e \operatorname{Stg}(k^e d^e/2), \quad (3)$$

$$Z_2^e = -iz_e S/\sin(k^e d^e). \quad (4)$$

Здесь  $S$  – площадь электродов,  $k$  и  $k^e$  – волновые числа для материалов пьезоэлектрика и электрода,  $d$  и  $d^e$  – толщина пьезоэлектрической пластины и электрода,  $i$  – мнимая единица,  $z$  и  $z^e$  – удельные механические импедансы пьезоэлектрика и электродов, которые выражаются следующим образом

$$z = \{(C + e^2/\epsilon + i\omega\eta)\rho\}^{1/2}, \quad (5)$$

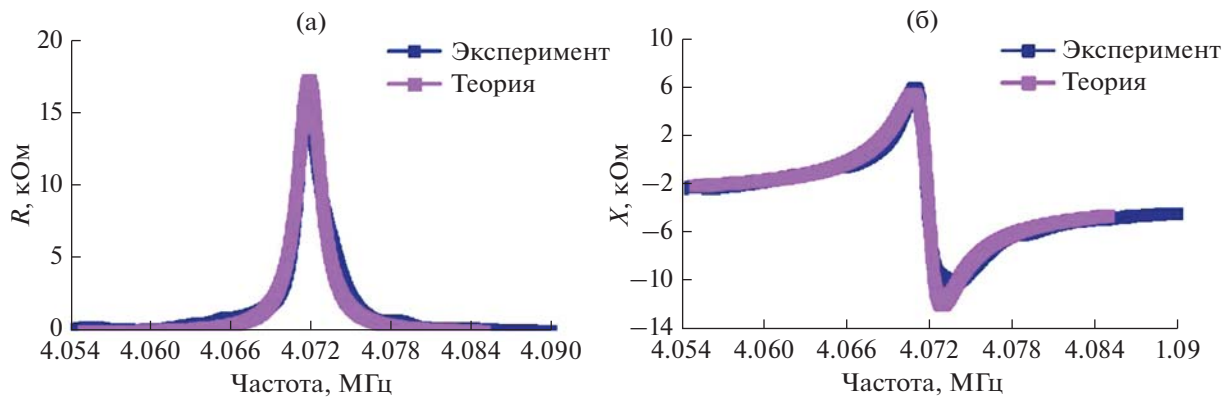
$$z^e = \{(C^e + i\omega\eta^e)\rho^e\}^{1/2}. \quad (6)$$

Здесь  $C$  – модуль упругости,  $e$  – пьезоконстанта,  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость,  $\eta$  – коэффициент вязкости,  $\rho$  – плотность,  $\omega$  – круговая частота. Индекс “ $e$ ” означает принадлежность величины к электроду. Запишем еще выражения для скорости акустической волны в пьезоэлектрике  $v$  и электродах  $v^e$ :

$$v = \{(C + e^2/\epsilon + i\omega\eta)/\rho\}^{1/2}, \quad (7)$$

$$v^e = \{(C^e + i\omega\eta^e)/\rho^e\}^{1/2}. \quad (8)$$

Полагая, что толщина пьезоэлектрической пластины существенно меньше диаметра электрода, электрическую емкость можно представить, как  $C_0 = \epsilon S/d$ . При этом коэффициент трансформации определялся как  $N = hC_0$ , где  $h = e/\epsilon$  [25]. В выражениях (1)–(8) для продольной волны в кристалле лангсита будем полагать  $C = C_{11}$ ,  $e = e_{11}$ ,  $\eta = \eta_{11}$  и  $\epsilon = \epsilon_{11}$  в системе координат, соответствующей  $X$ -срезу. В этом случае ось  $X_1$ , нормальная к



**Рис. 4.** Частотные зависимости (а) – реальной и (б) – мнимой частей электрического импеданса свободного резонатора из лангасита X-среза (фиолетовый цвет – эксперимент, синий цвет – теория).

поверхности пластины, определяет направление распространения волны и параллельна вектору поляризации волны. Соответственно для изотропного материала электрода  $C^e = C_{11}^e$  и  $\eta^e = \eta_{11}^e$ .

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАТЕРИАЛЬНЫХ КОНСТАНТ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА РЕЗОНАТОРА ИЗ ЛАНГАСИТА X-СРЕЗА

Вначале определяли модуль упругости  $C_{11}$ , коэффициент вязкости  $\eta_{11}$ , пьезоэлектрическую константу  $e_{11}$ , и диэлектрическую проницаемость  $\epsilon_{11}$  лангасита, соответствующие выбранной системе координат. Для этого использовали измеренные частотные зависимости реальной и мнимой частей электрического импеданса свободного резонатора. Путем анализа эквивалентной схемы (рис. 3) с использованием обозначений (1)–(8) с помощью уравнений Кирхгофа была разработана программа, позволяющая определять частотные зависимости реальной и мнимой частей электрического импеданса в точках 1 и 2 электрической части эквивалентной схемы. Затем, в соответствии с методом наименьших квадратов, строилась целевая функция  $F$  по 7 точкам частотного диапазона:

$$F = \sqrt{\sum_{n=1}^7 \left\{ \left[ R_{\text{theor}}^n - R_{\text{exper}}^n \right]^2 + \left[ X_{\text{theor}}^n - X_{\text{exper}}^n \right]^2 \right\}}. \quad (9)$$

Здесь  $R_{\text{theor}}^n$  и  $R_{\text{exper}}^n$  это теоретическое и экспериментальное значения реальной части электрического импеданса на  $n$  шаге. Соответственно,  $X_{\text{theor}}^n$  и  $X_{\text{exper}}^n$  это теоретическое и экспериментальное значения мнимой части электрического импеданса на  $n$  шаге. Путем перебора неизвестных констант  $C_{11}$ ,  $\eta_{11}$ ,  $e_{11}$ , и  $\epsilon_{11}$  лангасита определялся такой набор параметров, который соответствовал минимуму целевой функции. В этом случае экспериментальные частотные зависимости реальной  $R$  и мнимой  $X$  частей электрического импеданса резонатора максимально совпадали с теоретическими (рис. 4). В табл. 2 представлены исходные справочные [26] и полученные в результате фитинга значения материальных констант лангасита X-среза.

Очевидно, что данную методику можно также применить для определения материальных констант среды, которая находится в хорошем акустическом контакте с одной или двумя сторонами резонатора [22, 23, 25].

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАТЕРИАЛЬНЫХ КОНСТАНТ ИССЛЕДУЕМЫХ СУСПЕНЗИЙ

Определение механических характеристик суспензий было основано на использовании эквивалентной схемы нагруженного с обеих сторон резонатора (рис. 5) и полученных на первом этапе материальных констант X-среза лангасита. В слу-

**Таблица 2.** Значения материальных констант лангасита X-среза

	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$C_{11}$ , 10 <sup>10</sup> Па	$\eta_{11}$ , Па с	$e_{11}$ , С/м <sup>2</sup>	$\epsilon_{11}$ , 10 <sup>-11</sup> Ф/м
Справочные данные [26]	5743	18.93	0	-0.431	16.79
Результаты фитинга	5743	18.88	3.8	-0.35	17.56

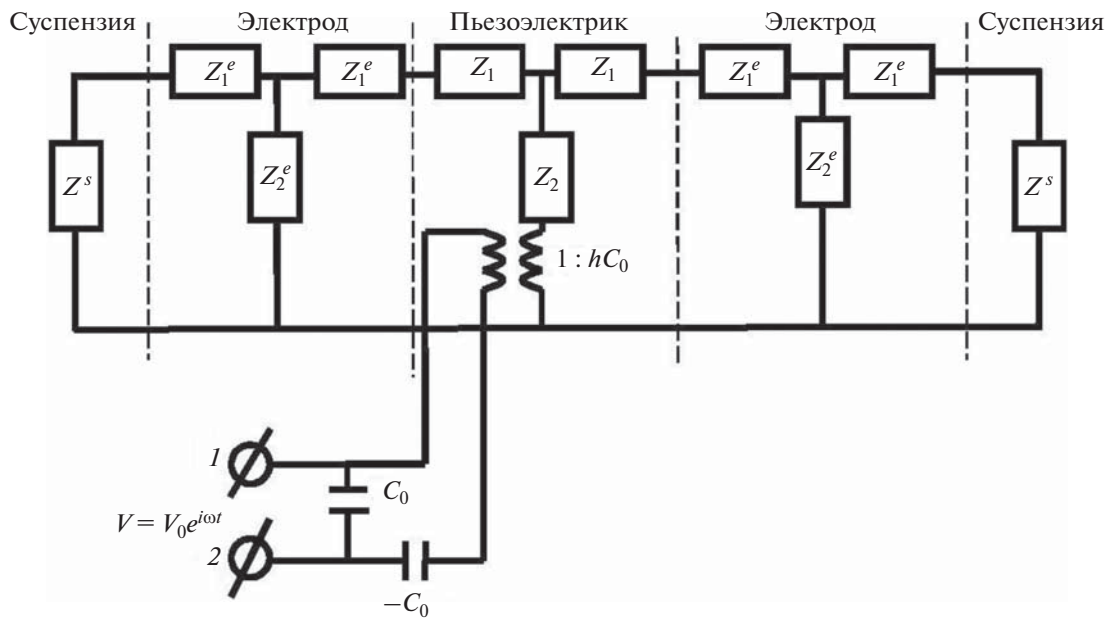


Рис. 5. Эквивалентная схема резонатора, нагруженного с обеих сторон исследуемой суспензией.

чае эквивалентной схемы, представленной на рис. 5, к обозначениям (1)–(8) следует добавить обозначения для акустического импеданса  $Z^s$  и скорости акустической волны  $v^s$  в суспензии [23]:

$$Z^s = z^s S, \quad (10)$$

$$v^s = \{(C_{11}^s + i\omega\eta_{11}^s)/\rho^s\}^{1/2}, \quad (11)$$

$$z^s = \{(C_{11}^s + i\omega\eta_{11}^s)\rho^s\}^{1/2}. \quad (12)$$

Здесь принадлежность величины к суспензии обозначена индексом  $^s$ .

Путем анализа эквивалентной схемы нагруженного суспензией резонатора (рис. 5) с использованием обозначений (1)–(8) и (10)–(12) с помощью уравнений Кирхгофа была разработана программа, позволяющая определять частотные зависимости реальной и мнимой частей электрического импеданса в точках 1 и 2 электрической части схемы. По аналогии со свободным резонатором в соответствии с методом наименьших квадратов строилась целевая функция  $F$  (9) по 7 точкам частотного диапазона. Путем перебора неизвестных констант  $C_{11}^s$  и  $\eta_{11}^s$  суспензии определяли такую пару параметров, которая соответствовала минимуму целевой функции. В этом случае экспериментальные частотные зависимости реальной  $R$  и мнимой  $X$  частей электрического импеданса нагруженного резонатора максимально совпадали с теоретическими. Рис. 6 демонстрирует хорошее соответствие теоретических и

экспериментальных частотных зависимостей реальной  $R$  и мнимой  $X$  частей электрического импеданса резонатора из лангсита, погруженного в чистый глицерин и в смесь глицерина с частицами алмаза с объемной концентрацией 1.923%. Для всех остальных образцов суспензий также наблюдалось хорошее соответствие теоретических и экспериментальных частотных зависимостей реальной и мнимой частей электрического импеданса.

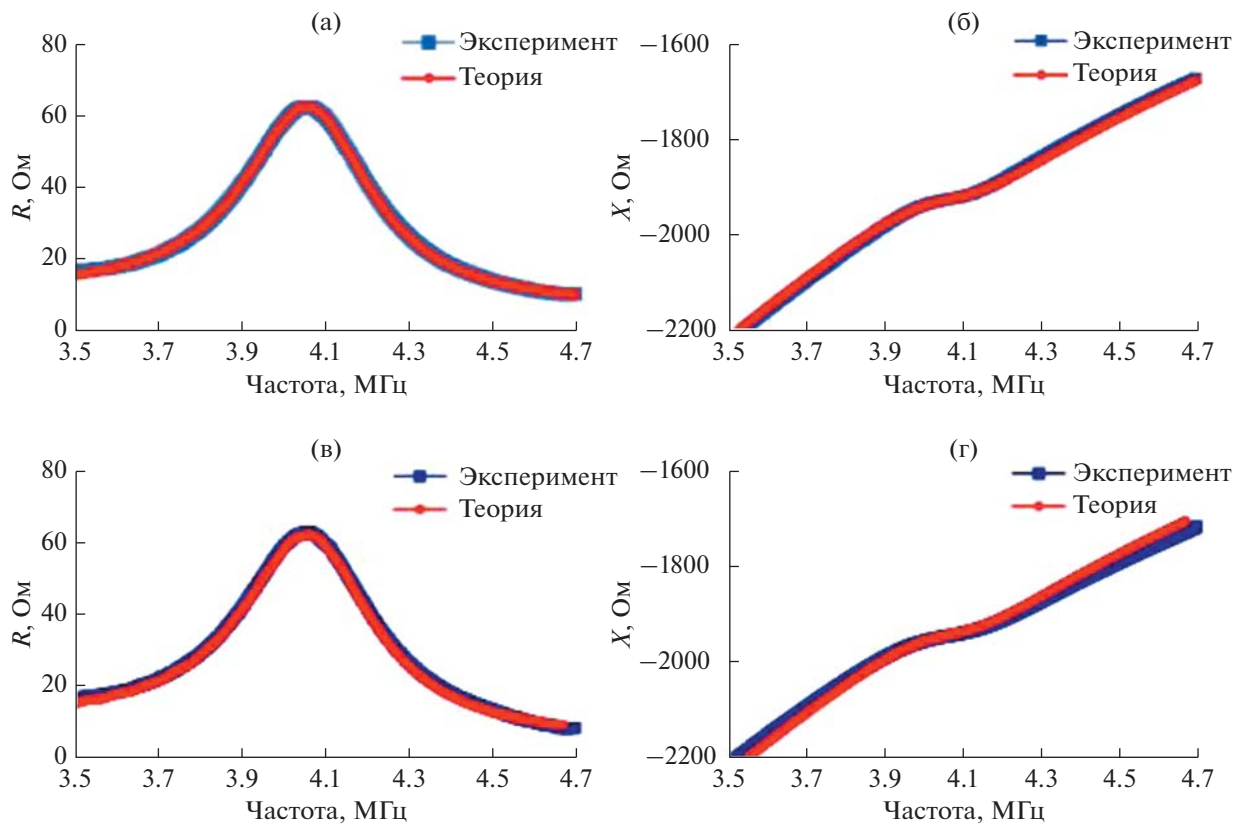
### ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате проведенных исследований были получены значения продольного модуля упругости  $C_{11}^s$ , коэффициента вязкости  $\eta_{11}^s$ , а также скорости продольной акустической волны  $v_{11}^s$  для образцов суспензий с различной объемной концентрацией частиц синтетического алмаза с размером частиц 1–2 мкм. Эти данные представлены в табл. 3.

По известным материальным константам образцов суспензий  $C_{11}^s$ ,  $\eta_{11}^s$  и  $\rho^s$ , скорость продольной волны  $v_{11}^s$  для каждого образца вычислялась по хорошо известной формуле [22]

$$v_{11}^s = \text{Re} \left( \sqrt{\frac{C_{11}^s + i2\pi f_w \eta_{11}^s}{\rho^s}} \right). \quad (13)$$

Символом  $f_w$  в уравнении (13) обозначена центральная рабочая частота.



**Рис. 6.** Частотные зависимости (а, в) — реальной и (б, г) — мнимой частей электрического импеданса резонатора из лангасита, нагруженного с обеих сторон (а, б) — глицерином и (в, г) — смесью глицерина с частицами алмаза с концентрацией 1.923% (синий цвет — эксперимент, красный цвет — теория).

Скорость распространения продольной акустической волны в суспензиях можно также определить, используя известные формулы Урика (14) и Вуда (15) [27]:

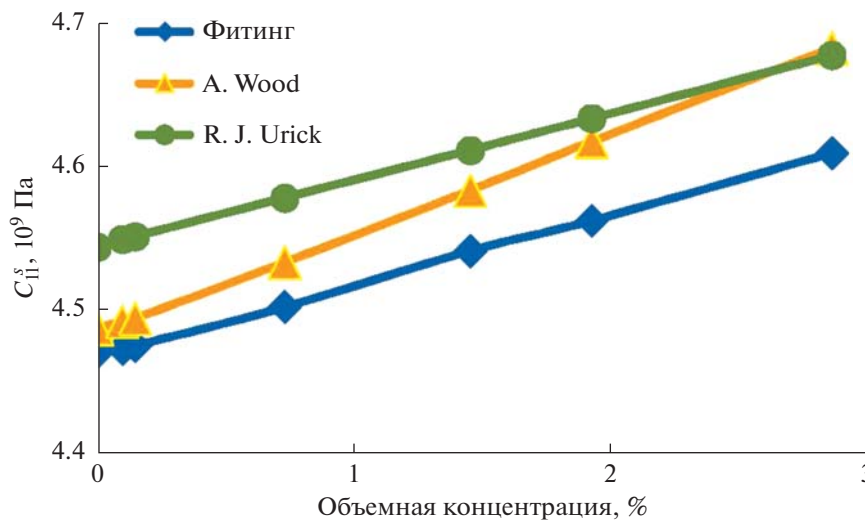
$$v_{11}^s = \frac{1}{\sqrt{(\rho^p \phi + \rho^{lq} (1 - \phi)) \left( \phi \left( \frac{1}{C_{11}^p} \right) + (1 - \phi) \left( \frac{1}{C_{11}^{lq}} \right) \right)}}, \quad (14)$$

$$v_{11}^s = \frac{1}{\sqrt{\rho^s \left( \frac{1 - \phi}{\rho^{lq} (v_{11}^{lq})^2} + \frac{\phi}{\rho^p (v_{11}^p)^2} \right)}}, \quad (15)$$

где  $\rho^{lq}$  и  $\rho^p$  — плотности,  $C_{11}^{lq}$  и  $C_{11}^p$  — модули упругости, а  $v_{11}^{lq}$  и  $v_{11}^p$  — скорости продольной акустической волны.

**Таблица 3.** Значения продольного модуля упругости  $C_{11}^s$ , коэффициента вязкости  $\eta_{11}^s$ , скорости продольной акустической волны  $v_{11}^s$  и плотности  $\rho^s$  образцов суспензий с различной объемной концентрацией  $\beta$  частиц синтетического алмаза

$\beta$ , %	$\rho^s$ , кг/м <sup>3</sup>	$C_{11}^s$ , 10 <sup>9</sup> Па	$\eta_{11}^s$ , Па с	$v_{11}^s$ , м/с (4.06 МГц)
0.0	1230.3	4.472	6.8	1907
0.098	1231.6	4.474	6.7	1906.3
0.147	1232.44	4.476	6	1906
0.73	1244.27	4.503	6.1	1902.7
1.45	1259.3	4.542	6.1	1899.4
1.923	1269.35	4.563	6.4	1896.3
2.857	1290.8	4.61	6.5	1890



**Рис. 7.** Зависимость продольного модуля упругости  $C_{11}^s$  образцов суспензий от объемной концентрации частиц алмаза с размером частиц 1–2 мкм (зеленый цвет – использовано уравнение (16) (R.J. Urick), оранжевый цвет – использовано уравнение (17) (A. Wood), синий цвет – результат фитинга).

ской волны. Индексы “ $lq$ ” и “ $p$ ” означают принадлежность величины к жидкости и материалу частиц, а “ $s$ ” принадлежность величины к суспензии, соответственно. Символом  $\phi$  обозначена объемная доля частиц в суспензии.

Согласно уравнению Урика для скорости продольной акустической волны в суспензии (14), модуль упругости смеси может быть определен по формуле:

$$C_{11}^s = \frac{1}{\phi \left( \frac{1}{C_{11}^p} \right) + (1 - \phi) \left( \frac{1}{C_{11}^{lq}} \right)}. \quad (16)$$

Из уравнения Вуда (15) для модуля упругости можно получить следующее выражение:

$$C_{11}^s = \frac{1}{\frac{1 - \phi}{\rho^{lq} (v_{11}^{lq})^2} + \frac{\phi}{\rho^p (v_{11}^p)^2}}. \quad (17)$$

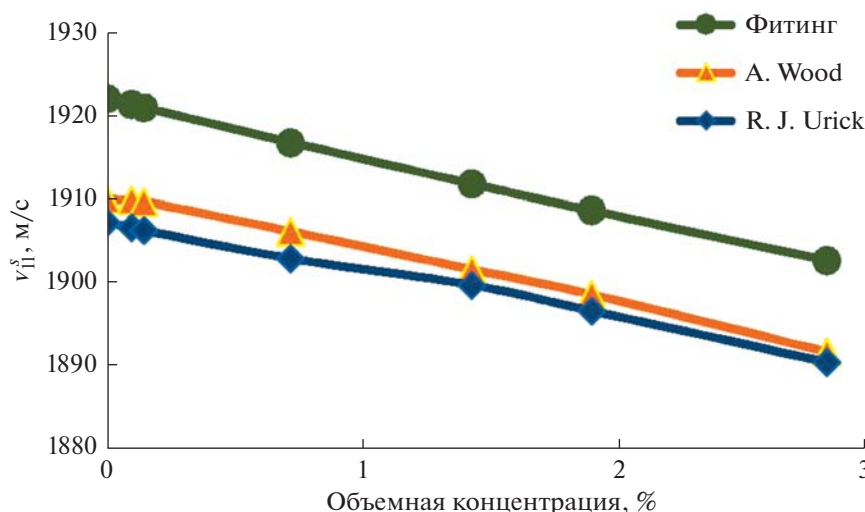
На рис. 7 представлены зависимости продольного модуля упругости  $C_{11}^s$  образцов суспензий от объемной концентрации частиц синтетических алмазов с размером частиц 1–2 мкм, полученные в результате фитинга (синий цвет) и рассчитанные в соответствии с формулой (16) (зеленый цвет) и формулой (17) (оранжевый цвет). Следует отметить, что при вычислении  $C_{11}^s$  по формуле (16) использовались справочные значения модуля упругости глицерина при температуре около 15°C [28] и алмаза [29]. А при вычислении  $C_{11}^s$  по формуле (17) были использованы экспериментальные значения плотности и скорости продольной

акустической волны для глицерина и справочные значения плотности и скорости волны для алмаза. В расчетах использовалось справочное значение плотности алмаза 3400 кг/м<sup>3</sup> [29]. Значения плотности глицерина как экспериментально полученное, так и известное из литературы [29], оказались равными 1230.3 и 1260 кг/м<sup>3</sup>, соответственно. Скорость продольной акустической волны в чистом глицерине определяли экспериментально путем измерения времени задержки, затрачиваемого на прохождение волны от излучающего преобразователя к приемному на частоте ~1 МГц при известном расстоянии между ними [30]. Последняя процедура осуществлялась многократно при комнатной температуре 22–27°C. Различие справочных и реальных значений материальных констант, а также различие температур, при которой указаны эти материальные константы, в пределах 13°C являются причиной отличия зависимостей, представленных на рис. 7. Это отличие не превышает ±3%.

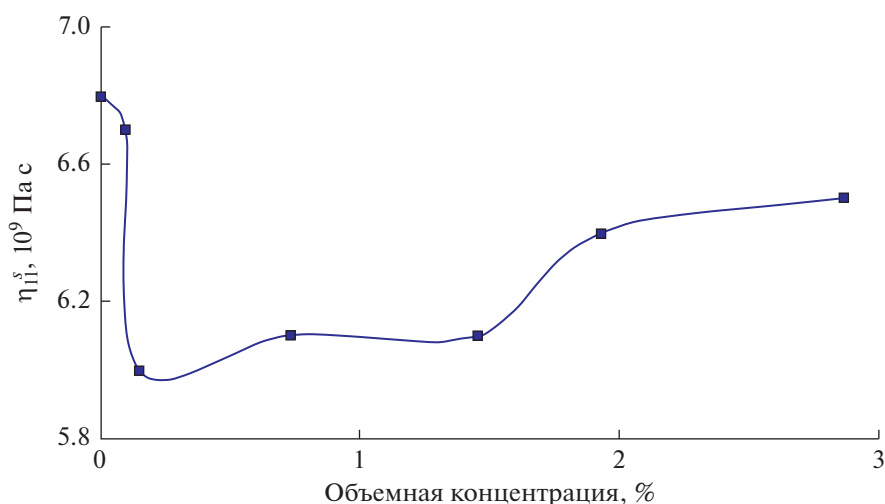
При вычислении  $v_{11}^s$  по формуле (13) использовались значения продольного модуля упругости  $C_{11}^s$ , коэффициента вязкости  $\eta_{11}^s$  и плотности, представленные в табл. 3. При вычислении  $v_{11}^s$  с помощью выражения (14) использовались экспериментальные значения плотности глицерина и справочные значения модуля упругости глицерина (при  $T \approx 15^\circ\text{C}$ ), а также справочные значения плотности и продольного модуля упругости алмаза.

Для определения  $v_{11}^s$  по формуле (15) были использованы экспериментальные значения плотности и скорости продольной акустической волны





**Рис. 8.** Зависимость скорости продольной акустической волны  $v_{11}^s$  в суспензии от объемной концентрации частиц алмаза с размером частиц 1–2 мкм (зеленый цвет – использовано уравнение (14) (R.J. Urick), оранжевый – использовано уравнение (15) (A. Wood), синий – уравнение (13) с использованием результатов фитинга).



**Рис. 9.** Зависимость поперечного коэффициента вязкости  $\eta_{11}^s$  образцов суспензий от объемной концентрации частиц алмаза с размером частиц 1–2 мкм, построенная по результатам фитинга.

для чистого глицерина, экспериментальные значения плотности образцов суспензий и справочные значения плотности и скорости волны продольной акустической волны для алмаза. Эти зависимости представлены на рис. 8. Оценки показали, что отличие представленных зависимостей не превышает  $\pm 2\%$ .

На рис. 8 представлена зависимость продольного коэффициента вязкости, определенного с помощью резонатора с продольным электрическим полем, от концентрации частиц алмаза. Видно, что с ростом объемной концентрации частиц вязкость вначале уменьшается с ростом объемной концентрации частиц алмаза до достиже-

ния концентрации 0.147%, после чего монотонно увеличивается. Причина такого поведения требует проведения дополнительных исследований.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовано влияние суспензий на основе чистого глицерина и алмазного порошка АСМ 2/1 с размером частиц 1–2 мкм с различной объемной концентрацией частиц на характеристики резонатора с продольным электрическим полем, изготовленного из пластины лангасита X-среза и работающего с продольной акустической волной. Получены зависимости максимальных значений

электрического импеданса и адмиттанса лангаситового резонатора, погруженного в суспензию, от объемной концентрации частиц алмаза. Показано, что максимальные значения электрического импеданса и адмиттанса сначала увеличиваются при изменении объемной концентрации частиц от 0 до 0.098%, затем уменьшаются, а по достижении концентрации 1.45% снова увеличиваются. Частоты и добротности параллельного и последовательного резонансов практически не зависят от объемной концентрации частиц в суспензии.

С помощью эквивалентной схемы свободного резонатора и резонатора, погруженного в суспензию, а также с использованием измеренных частотных зависимостей реальной и мнимой частей электрического импеданса были получены значения продольного модуля упругости, продольного коэффициента вязкости и скорости распространения продольной акустической волны для исследуемых образцов суспензий. Материальные константы определялись путем подгонки теоретических частотных зависимостей действительной и мнимой частей электрического сопротивления резонатора, которые рассчитывались с использованием эквивалентной схемы, к экспериментальным. Было установлено, что с ростом объемной концентрации частиц синтетического алмаза с размером частиц 1–2 мкм в суспензии на основе чистого глицерина от 0 до 2.86% значение продольного модуля упругости образцов суспензий увеличивается, а значение скорости продольной акустической волны уменьшается. Продольный коэффициент вязкости исследуемых образцов суспензий с ростом объемной концентрации частиц синтетических алмазов вначале уменьшается до достижения концентрации 0.147%, а с дальнейшим ростом концентрации частиц увеличивается.

Проведено сравнение значений скорости распространения продольной акустической волны в образцах исследуемых суспензий, полученных на основе фитинга и по формулам Урика и Вуда с использованием справочных значений материальных констант чистого глицерина и материала частиц. Оказалось, что максимальное относительное отклонение значений скорости во всех случаях не превышает 2%. При этом максимальное относительное отклонение значений продольного модуля упругости образцов суспензии равно  $\pm 3\%$ .

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 21-49-00062.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mayer A.E., Pogorelko V.V., Yalovets A.P. Elastic waves in suspensions // *Acoust. Phys.* 2011. V. 57. № 2. P. 136–143.
2. Егошина В.Д., Гонгальский М.Б., Цурикова У.А., Свиридов А.П., Осминкина Л.А., Андреев В.Г. Кавитационная активность водных суспензий пористых кремниевых наночастиц с различной степенью гидрофобности поверхности // *Акуст. журн.* 2023. Т. 69. № 1. С. 92–100.
3. Minakov A.V., Pryazhnikov M.I., Damdinov B.B., Nemtsev I.V. Acoustic Spectroscopy Study of the Bulk Viscosity of Nanosuspensions // *Acoust. Phys.* 2022. V. 68. № 2. P. 155–161.
4. Казаков Л.И. Ячеечные модели вязкоупругой среды с твердыми сферическими включениями // *Акуст. журн.* 2022. Т. 68. № 2. С. 173–181.
5. Шамсутдинова Е.С., Анисимкин В.И., Фионов А.С., Смирнов А.В., Колесов В.В., Кузнецова И.Е. Совершенствование методов исследования электрофизических и вязкостных свойств жидкостей // *Акуст. журн.* 2023. Т. 69. № 1. С. 56–62.
6. Lebedev-Stepanov P.V., Rudenko O.V. Sound attenuation in a liquid containing suspended particles of micron and nanometer dimensions // *Acoust. Phys.* 2009. V. 55. № 6. P. 729–734.
7. Zaitsev B.D., Borodina I.A., Teplykh A.A. Compact liquid analyzer based on a resonator with a lateral excitation electric field // *Ultrasonics.* 2022. V. 126. P. 106814.
8. Zaitsev B.D., Teplykh A.A., Borodina I.A., Kuznetsova I.E., Verona E. Gasoline sensor based on piezoelectric lateral electric field excited resonator // *Ultrasonics.* 2017. V. 80. P. 96–100. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2017.05.003>
9. Kondoh J., Nakayama K., Kuznetsova I. Study of frequency dependence of shear horizontal surface acoustic wave sensor for engine oil measurements // *Sensors and Actuators A: Physical.* 2021. V. 325. P. 112503. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.112503>
10. Song S., Chen D., Wang H., Guo Q., Yu W. Shear mode bulk acoustic viscosity sensor for blood coagulation monitoring in oral anticoagulant therapy // *J. Nanoscience Nanotech.* 2018. V. 18. P. 8099–8104. <https://doi.org/10.1166/jnn.2018.16425>
11. Бородина И.А., Зайцев Б.Д., Алсовэиди А.К.М., Каравева О.А., Гулий О.И. Биологический датчик на основе акустической щелевой моды с использованием микробных клеток для определения ампициллина // *Акуст. журн.* 2022. Т. 68. № 6. С. 583–588.
12. Zaitsev B.D., Joshi S.G., Kuznetsova I.E., Borodina I.A. Acoustic waves in piezoelectric plates bordered with viscous and conductive liquids // *Ultrasonics.* 2001. V. 39. № 1. P. 45–50. [https://doi.org/10.1016/S0041-624X\(00\)00040-8](https://doi.org/10.1016/S0041-624X(00)00040-8)
13. Guo F.L., Sun R. Propagation of Bleustein–Gulyaev wave in 6 mm piezoelectric materials loaded with viscous liquid // *Int. J. Solids and Structures.* 2008. V. 45. № 13. P. 3699–3710. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2007.09.018>
14. Anisimkin V., Shamsutdinova E., Li P., Wang B., Zhu F., Qian Z., Kuznetsova I. Selective detection of liquid viscosity using acoustic plate waves with in-plate polarization // *Sensors.* 2022. V. 22. P. 2727. <https://doi.org/10.3390/s22072727>

15. Zhao Z., Qian Z., Yong Y.-K. Frequency shift prediction of a shear mode multi-layered FBAR sensor in viscous media using transfer matrix method // *Appl. Math. Model.* 2021. V. 99. P. 555–565.  
<https://doi.org/10.1016/j.apm.2021.07.009>
16. Caliendo C., Hamidullah M. Guided acoustic wave sensors for liquid environments // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2019. 52. P. 153001.  
<https://doi.org/10.1088/1361-6463/aafd0b>
17. Chen D., Xu Y., Li D., Zhang L., Liu W., Wang J. A lateral field excited ZnO film bulk acoustic wave sensor working in viscous environments // *J. Micromech. Microeng.* 2013. V. 23. № 9. P. 095032
18. Wang M., Shi H., Ma T., Yuan L., Wang J., Du J., Qian Z., Kuznetsova I., Zhang C. High-frequency vibration analysis of LiTaO<sub>3</sub> piezoelectric plates excited by lateral electric fields produced by surface electrodes under viscous liquid loadings for sensing // *Smart Materials and Structures.* 2020. V. 29. № 4. P. 045004.
19. Hu Y., French L.A., Radecsky K., Da Cunha M.P., Millard P. and Vetelino J.F. A lateral field excited liquid acoustic wave sensor // *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control.* 2004. V. 51. № 11. P. 1373–1380.
20. Зайцев Б.Д., Теплых А.А., Шихабудинов А.М. Датчик вязкой и проводящей жидкости на основе пьезоэлектрического резонатора с поперечным электрическим полем // *Нелинейный мир.* 2016. Т. 14. № 1. С. 61–63.
21. Durning C.J., Nwankwo E. Mechanical response of thickness-shear mode quartz-crystal resonators to linear viscoelastic fluids // *Sensors and Actuators A: Physical.* 1998. V. 64. № 2. P. 119–124.
22. Kuznetsova I.E., Zaitsev B.D., Shikhabudinov A.M. Elastic and viscosity properties of Nanocomposite Films Based on Low-Density Polyethylene // *Trans. Ultrason. Ferroel. Freq. Control.* 2010. V. 57. № 9. P. 2099.
23. Semyonov A., Zaitsev B., Teplykh A., Borodina I. The Effect of Glycerol-Based Suspensions on the Characteristics of Resonators Excited by a Longitudinal Electric Field // *Sensors.* 2023. V. 23. P. 608.
24. Singh A., Walvekar R., Khalid M., Wong W.Y., Gupta T.C.S.M. Thermophysical properties of glycerol and polyethylene glycol (PEG600) based DES // *J. Mol. Liquids.* 2018. V. 252. P. 439–444.
25. Kuznetsova I., Zaitsev B., Krasnopolskaya L., Teplykh A., Semyonov A., Avtonomova A., Ziangirova M., Smirnov A., Kolesov V. Influence of humidity on the acoustic properties of mushroom mycelium films used as sensitive layers for acoustic humidity sensors // *Sensors.* 2020. V. 20. P. 2711.
26. Chilla E., Flannery C.M., Fröhlich H.-J., Straube U. Elastic properties of langasite-type crystals determined by bulk and surface acoustic waves // *J. Appl. Phys.* 2001. V. 90. № 12. P. 6084.  
<https://doi.org/10.1063/1.1409574>
27. Harker A.H., Temple J.A.G. Velocity and attenuation of ultrasound in suspensions of particles in fluids // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 1988. V. 21. P. 1576–1588.
28. Григорьев И.С., Мейлихов Е.З. Физические величины. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
29. Енохович А.С. Справочник по физике и технике. М.: Просвещение, 1983. 255 с.
30. Зайцев Б.Д., Семенов А.П., Теплых А.А., Бородина И.А. Исследование продольной акустической волны в суспензии “глицерин–микрочастицы синтетического алмаза” // *СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо’2022).* Вып. 4. С. 187–188.