

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ И ЗАТУХАНИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ В ЖИДКОСТЯХ С РАЗЛИЧНЫМ АКУСТИЧЕСКИМ ИМПЕДАНСОМ С ПОМОЩЬЮ АКУСТИЧЕСКОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА

© 2023 г. Б. Д. Зайцев^а, *, И. А. Бородина^а, А. А. Теплых^а, А. П. Семёнов^а

^аФедеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук, Саратовский филиал, ул. Зеленая 38, Саратов, 410019 Россия

*e-mail: zai-boris@yandex.ru

Поступила в редакцию 11.04.2023 г.

После доработки 16.05.2023 г.

Принята к публикации 18.05.2023 г.

Теоретически и экспериментально исследованы особенности применения акустического интерферометра для определения скорости и затухания акустической волны в жидкостях с различным акустическим импедансом. Впервые показано, что указанный импеданс определяет отношение резонансных величин максимума и минимума коэффициента прохождения S_{12} для одной и той же пары излучатель—приемник на зависимости коэффициента прохождения от расстояния между преобразователями. Разработана методика определения затухания жидкости, свободная от влияния “кажущегося” затухания, связанного с уходом части акустической мощности в преобразователи.

Ключевые слова: акустический интерферометр, скорость и затухание акустической волны в жидкости, акустический импеданс, коэффициент прохождения S_{12} , пьезоэлектрические преобразователи продольных акустических волн

DOI: 10.31857/S0320791923600403, **EDN:** APUGLL

ВВЕДЕНИЕ

Акустические методы широко используются для изучения механических и электрических свойств различных жидкостей [1, 2], включая реологические [3, 4] и биологические [5, 6]. Особое место занимает исследование скорости и затухания звука, которые являются фундаментальными свойствами твердых, жидких и газообразных сред. Несмотря на то, что проблемой измерения скорости и затухания звука в жидкости ученые занимаются более 70 лет [7, 8], задача экспериментального определения этих параметров в жидких и газообразных средах остается актуальной и в наши дни [9]. Научный и технический интерес представляют данные по скорости звука в таких веществах как сжиженные газы, органические масла, высокомолекулярные парафины и хладагенты и т.д.

Скорость звука является важной характеристикой также в медицине и биологии для определения параметров биологических тканей, жидких клеточных суспензий, различных раковых клеток, суспензий микроводорослей и т.д. [10–13]. Суспензии, содержащие различную концентрацию микро- и наночастиц, имеют разную скорость звука, и эта информация используется в

ультразвуковой спектроскопии для измерения концентрации и размера взвешенных частиц [14–16].

Существующие методы измерения акустических параметров в жидких средах можно разбить на две основные группы:

1. Прямые методы, в которых для измерения скорости и затухания акустических волн используются короткие по сравнению с временем прохождения волны через образец акустические импульсы. В этом случае задача сводится к точному измерению расстояния между преобразователями и измерению времени задержки.

2. Косвенные методы, в которых используется непрерывный акустический сигнал и измеряется длина звуковой волны на заданной частоте или изменение фазы при изменении частоты или расстояния между преобразователями.

При реализации импульсного метода электроакустический преобразователь посылает короткие звуковые импульсы в исследуемую жидкость, которые принимаются выходным преобразователем [17]. По измеренному времени распространения этих импульсов вдоль известной длины акустической базы определяется скорость волны. При использовании этого метода существует ошибка измерения времени задержки, связанная

с конечной длительностью фронта принимаемого задержанного сигнала и необходимостью выбора реперной точки на этом импульсе. При изменении длины акустической базы можно также определить затухание волны в жидкости по изменению амплитуды прошедшего импульса независимо от коэффициента преобразования электрического импульса в акустический [17]. Существует также вариант с двойным или многократным прохождением сигнала вдоль акустической базы — от излучателя к отражателю и обратно, причем при возвращении отраженных импульсов к излучателю последний работает как приемник [17–19]. В этом случае можно получить целую серию задержанных эхо-импульсов, амплитуда которых уменьшается с ростом номера импульса. По времени задержки между импульсами можно определить скорость акустической волны. По уменьшению амплитуды эхо-импульсов можно найти затухание волны при условии линейности приемника акустических импульсов.

В импульсных измерителях скорости звука в жидкости весьма перспективным является использование акустической базы, выполненной из пьезоэлектрического цилиндра [20]. Акустическая база представляет собой внутренность тонкостенного цилиндрического пьезоэлемента с общим электродом, нанесенным на всю внутреннюю его поверхность и двумя электродами на внешней поверхности.

Существует также разновидность импульсного метода, в котором акустическая волна от преобразователя к преобразователю проходит по двум акустическим каналам [21]. Один канал — это твердотельный звукопровод, имеющий акустический контакт с преобразователями, второй канал образуется исследуемой жидкостью. Акустический импульс, проходя по этим каналам, создает в приемной аппаратуре два задержанных импульса. По известной разнице времени задержки и по известной скорости волны в твердотельном звукопроводе можно определить скорость волны в жидкости. К недостатку метода можно отнести необходимость обеспечения условия распространения плоской волны в каждом канале.

К настоящему времени для измерения скорости и затухания акустической волны в жидкости разработаны и созданы серийно выпускаемые приборы. К ним относятся широко используемый цифровой измеритель скорости звука в жидкостях в судовой серийной аппаратуре [22–24]. В цифровом импульсном методе в общем случае используются многократные отражения акустического импульса от отражателя и акустического преобразователя.

Разработаны также малогабаритные измерители скорости акустической волны в жидкости, состоящие из излучающего и принимающего пре-

образователей продольной волны, находящиеся в жидкостном контейнере [25]. После заполнения контейнера исследуемой жидкостью скорость волны высвечивается на цифровом мониторе.

Поскольку главный недостаток импульсного метода — это погрешность при определении времени задержки, то современные работы по этой проблеме связаны, в основном, с модернизацией аппаратуры для точного определения времени задержки импульса [26, 27].

Среди методов измерения скорости акустической волны в жидкостях с акустической волной в непрерывном режиме можно выделить фазовые и интерферометрические методы.

Фазовый метод [28, 29] заключается в следующем. Излучающий преобразователь в непрерывном режиме излучает в жидкость акустическую волну, которая преобразуется в электрический сигнал, фаза которого регистрируется прибором. По наклону зависимости фазы от частоты при фиксированном расстоянии между преобразователями можно определить время задержки и соответственно скорость волны. Скорость волны можно также найти по наклону зависимости фазы от расстояния между преобразователями. Главная проблема в этих методах — обеспечение линейности фазы от частоты или от расстояния между преобразователями, что является непростой задачей.

Ультразвуковые интерферометры разделяются на интерферометры с переменной базой или с переменной частотой [17]. В обоих случаях обеспечивается резонансное расстояние между излучающим и приемным преобразователями или между излучающим преобразователем и отражателем. Искомая длина волны и, следовательно, искомая скорость акустической волны определяется по расстоянию между отдельными резонансными пиками или по их разности частот. Коэффициент затухания можно определить, измеряя изменение амплитуды резонансных пиков от расстояния или по ширине резонансной кривой. Метод импульсного интерферометра переменной акустической базы, описанный в [30–32], сводится к измерению длины ультразвуковой волны в исследуемой среде и основан на использовании резонансных свойств столба исследуемой жидкости, заключенного между излучателем и приемником ультразвуковых волн. В результате образования стоячих волн ультразвуковое давление в исследуемой среде периодически повторяется вдоль акустической базы через половину длины волны. Для измерения затухания волны предлагается определять изменение максимального значения амплитуды на заданном расстоянии. Однако в этом случае существует “кажущееся” затухание, связанное с уходом части мощности в преобразователи, которое необходимо каким-то образом учитывать.

В работе [33] описан метод акустического интерферометра постоянной длины, реализованный в акустическом анализаторе биологических сред. Работа прибора основана на том, что столбик исследуемой жидкости, находящейся в цилиндрической полости между двумя пьезопреобразователями, является механическим резонатором, собственные частоты которого линейно связаны со скоростью ультразвука в исследуемой среде. Измерение скорости ультразвука в жидкости, заполняющей ячейку, сводится к определению частоты заданного резонансного пика по максимуму амплитудно-частотной характеристики или по точке перегиба на фазово-частотной характеристике. В этом случае также существует “кажущееся” затухание, связанное с тем, что исследуется не собственная добротность столба жидкости, а нагруженная добротность, связанная с уходом части мощности в преобразователи.

В настоящей работе с помощью акустического интерферометра определена скорость акустической волны в жидкостях с различным акустическим импедансом. Впервые показано, что отношение резонансных величин максимума и минимума коэффициента прохождения S_{12} для одной и той же пары излучатель—приемник зависит от акустического импеданса изучаемой жидкости. Теоретический анализ, проведенный впервые, позволил определить механический импеданс в плоскости “преобразователь—жидкость” в зависимости от акустического импеданса жидкости. На основе теоретического анализа разработана методика определения затухания акустической волны в жидкости, свободная от влияния “кажущегося” затухания, связанного с уходом части акустической мощности в преобразователи.

ОПИСАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Для проведения экспериментов была создана измерительная установка, состоящая из двух преобразователей продольной акустической волны с частотой ~ 1.057 МГц (рис. 1). Эти преобразователи, представляющие собой металлические цилиндры диаметром 32 мм, с плоскими, излучающими/принимающими плоскостями располагались друг над другом. Положение нижнего преобразователя было фиксированным, а второй преобразователь с помощью прецизионного устройства мог перемещаться в пределах 0–7 мм с точностью 10 мкм. Прецизионное устройство обеспечивало параллельность излучающих/принимающих плоскостей преобразователей. Верхняя часть нижнего преобразователя располагалась в жидкостном контейнере. Преобразователи подключались к измерителю S -параметров E5071C (Agilent) в режиме измерения параметра S_{12} на частоте ~ 1.057 МГц. Контейнер заполнялся

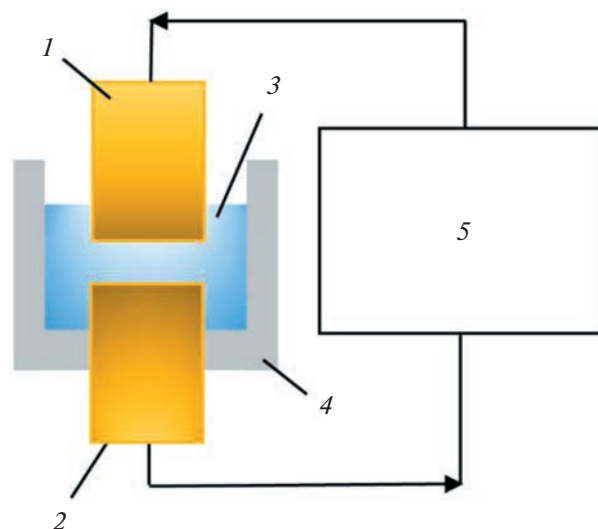


Рис. 1. Схема эксперимента: 1, 2 — пьезоэлектрические преобразователи; 3 — исследуемая жидкость; 4 — жидкостный контейнер; 5 — измеритель S -параметров.

исследуемой жидкостью, и зазор d между преобразователями увеличивался с шагом 50 мкм. На каждом шаге измерялось значение параметра S_{12} на указанной частоте. В результате была построена зависимость величины S_{12} от зазора между преобразователями, которая использовалась для определения скорости и затухания продольной акустической волны.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

С помощью описанной измерительной установки исследовались следующие жидкости: дистиллированная вода, этиловый спирт, смесь этилового спирта с дистиллированной водой (50 : 50 по объему), три смеси дистиллированной воды с глицерином в соотношении 50 : 50, 20 : 80 и 5 : 95 и чистый глицерин. Соотношения для смеси “вода—глицерин” указаны по массе. Все измерения проводились при температуре $T = 25^\circ\text{C}$. В табл. 1 представлены плотности исследуемых жидкостей. Плотность измерялась путем взвешивания 1 мл жидкости на аналитических весах PA-214C (Pioneer, OHAUS Corporation). Объем жидкости 1 мл обеспечивался с помощью прецизионной лабораторной пипетки (Колор, Ленпипет).

Поскольку измеренные зависимости коэффициента прохождения S_{12} от величины зазора между преобразователями для перечисленных выше образцов жидкости оказались качественно похожими, на рис. 2а–4а приведены данные для этилового спирта, воды и глицерина. Видно, что в каждом случае зависимость представляет собой периодическую функцию с чередующимися максимальными и минимальными значениями. Та-

Таблица 1. Плотность исследуемых водных смесей при температуре 25°C

Исследуемая жидкость	Этиловый спирт	Этиловый спирт с водой 50 : 50	Вода	Вода с глицерином, 50 : 50	Вода с глицерином, 20 : 80	Вода с глицерином, 5 : 95	Глицерин
Плотность, кг/м ³	830	900	965	1080.8	1173.4	1223.9	1236.6

Таблица 2. Длина волны на частоте 1.057 МГц и скорость продольной акустической волны, а также удельный механический импеданс и модуль упругости исследуемых водных смесей при температуре 25°C

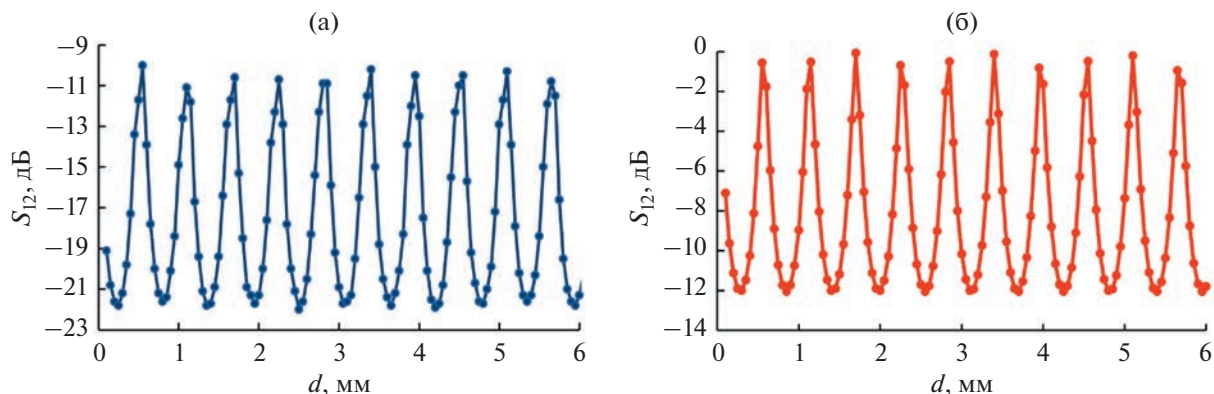
Исследуемая жидкость	Этиловый спирт	Этиловый спирт с водой 50 : 50	Вода	Вода с глицерином 50 : 50	Вода с глицерином 20 : 80	Вода с глицерином 5 : 95	Глицерин
Длина волны, мм	1.13 ± 2.2%	1.44 ± 3.7%	1.41 ± 1.73%	1.6 ± 3.17%	1.76 ± 3.11%	1.8	1.8
Скорость, м/с	1197.6 ± 2.2%	1525.1 ± 3.7%	1494.9 ± 1.73%	1726.1 ± 3.17%	1860.3 ± 3.11%	1902.6	1902.6
Удельный механический импеданс, 10 ⁵ кг/(м ² с)	9.94	13.73	14.43	18.66	21.83	23.29	23.53
Модуль упругости, 10 ⁹ Па	1.12	2.09	2.157	3.22	4.06	4.43	4.47

кая зависимость объясняется тем, что слой жидкости представляет собой резонатор, который резонирует в том случае, когда вдоль слоя укладывается целое число полуволн. Поэтому расстояния между ближайшими максимальными или минимальными значениями указанной зависимости равны половине длины волны. Были определены значения длины волны для каждой смеси, которые приведены в табл. 2. Здесь же приведены значения скорости продольной акустической волны, удельного механического импеданса и продольные модули упругости для каждого образца жидкости. Удельный механический импеданс определялся как произведение скорости волны V на плотность материала ρ .

Было установлено, что зависимости параметра S_{12} от расстояния между преобразователями для всех жидкостей кроме глицерина представляют

собой периодическую функцию с чередующимися максимальными и минимальными значениями одинаковой величины. Это означает, что затухание акустической волны на частоте 1.057 МГц для этих жидкостей пренебрежимо мало. Однако для чистого глицерина (рис. 4а) с ростом зазора d между преобразователями максимальные значения плавно уменьшаются. В дальнейшем будет показано, как в этом случае будет извлечена информация о затухании волны.

Было также установлено, что изменение параметра S_{12} от максимума до минимума (ΔS_{12}) зависит от удельного механического импеданса исследуемой жидкости. На рис. 5а представлена зависимость ΔS_{12} от удельного импеданса жидкости ρV . Видно, что с ростом импеданса жидкости величина ΔS_{12} монотонно уменьшается от 11.2 до 6.9 дБ.

**Рис. 2.** (а) — Экспериментальная и (б) — теоретическая зависимости параметра S_{12} от расстояния d между пьезопреобразователями для этилового спирта.

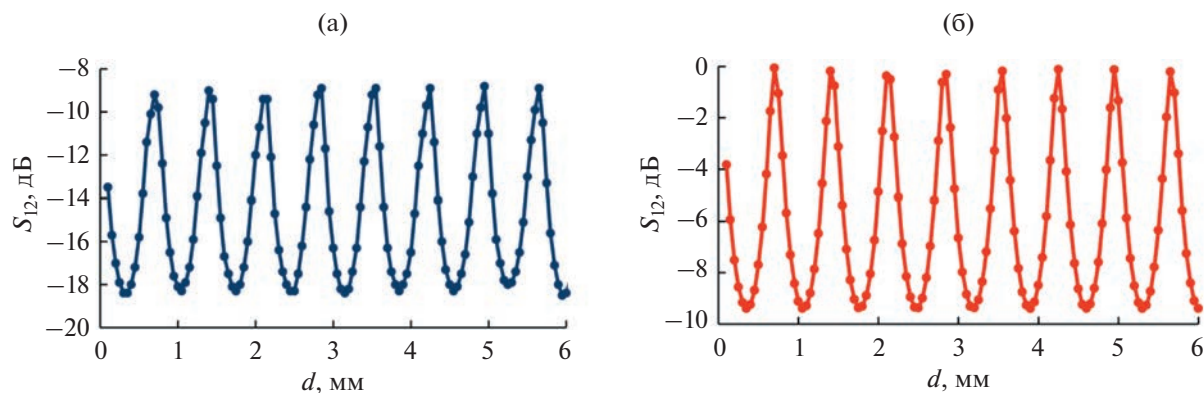


Рис. 3. (а) – Экспериментальная и (б) – теоретическая зависимости параметра S_{12} от расстояния d между пьезопреобразователями для дистиллированной воды.

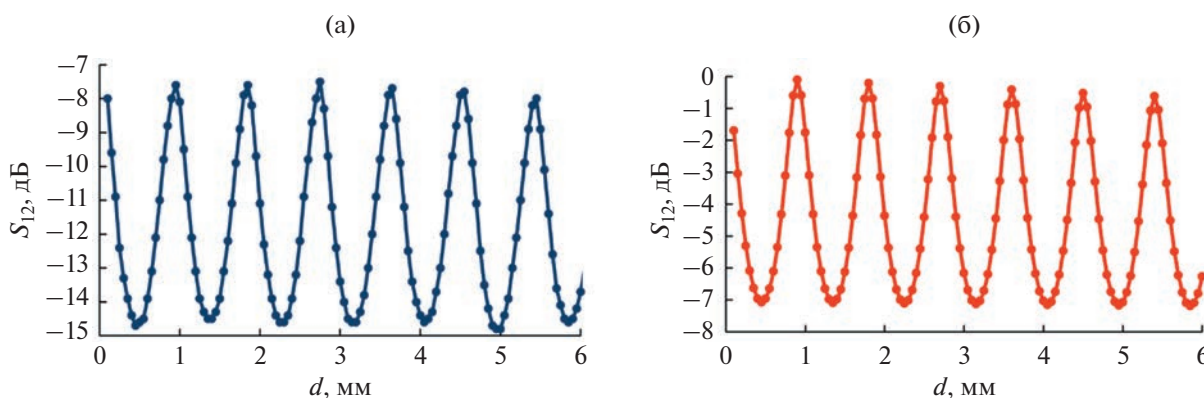


Рис. 4. (а) – Экспериментальная и (б) – теоретическая зависимости параметра S_{12} от расстояния d между пьезопреобразователями для чистого глицерина.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОХОЖДЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ ЧЕРЕЗ СЛОЙ ЖИДКОСТИ МЕЖДУ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ

Теоретический анализ особенностей интерференционного метода при измерении скорости и

затухания акустической волны в жидкостях с различным механическим импедансом был проведен с помощью механической эквивалентной схемы. На рис. 6 представлена механическая эквивалентная схема слоя жидкости, заключенного между преобразователями [34]. Значения сопро-

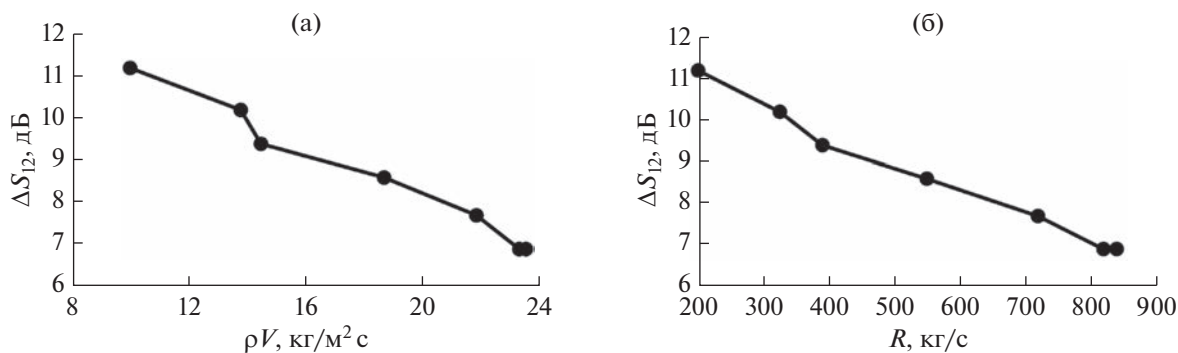


Рис. 5. Зависимости величины изменения параметра S_{12} от максимума до минимума (ΔS_{12}) (а) – от удельного механического импеданса жидкости ρV и (б) – от сопротивления R в плоскости преобразователей.

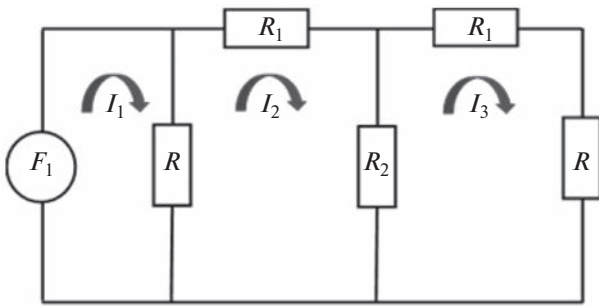


Рис. 6. Механическая эквивалентная схема слоя жидкости между преобразователями.

тивлений R_1 и R_2 определялись следующим образом [34]:

$$R_1 = jZt \operatorname{tg}\left(\frac{kd}{2}\right), \quad (1)$$

$$R_2 = -jZ/\sin(kd). \quad (2)$$

Здесь $Z = \rho VS$ – полный механический импеданс жидкости, ρ – плотность жидкости, V – скорость акустической волны, S – площадь преобразователей, $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, λ – длина волны. Нагрузки R с обеих сторон соответствуют преобразователям. Механическая “ЭДС” излучающего преобразователя представлена источником F_1 , который генерирует механическую силу, приложенную к левому краю слоя жидкости по закону

$$F_1 = F_0 \exp(j2\pi ft), \quad (3)$$

где f – частота, F_0 – амплитуда, t – время. Расчет проводился с помощью метода контурных токов I_1 , I_2 и I_3 для каждого контура. Стандартный прием позволил найти ток I_3 в третьем контуре

$$I_3 = F_1 \frac{R_2}{(R_1 + R_2)(R_1 + R_2 + R) - R_2^2} \quad (4)$$

и силу F_{out} , действующую на выходной преобразователь

$$F_{\text{out}} = I_3 R. \quad (5)$$

Отсюда коэффициент передачи S_{12} определялся как

$$S_{12} = 20 \lg \frac{I_3 R}{F_1}. \quad (6)$$

Были найдены теоретические зависимости коэффициента прохождения S_{12} от зазора d между преобразователями для исследуемых образцов жидкости. Для всех образцов жидкости расстояния между максимальными значениями параметра S_{12} оказались в точности равными экспериментальным значениям. Это подтверждается рис. 26–46 для этилового спирта, воды и глицерина. Видно также, что максимальные теоретиче-

ские значения S_{12} во всех случаях близки к 0, в то время как в эксперименте максимум S_{12} меняется от -11 до -7 дБ. Это связано с тем, что в теории не учитывается коэффициент двойного преобразования электрического сигнала в акустический и наоборот, который лежит в указанных выше пределах. Изменения ΔS_{12} для всех жидкостей в случае теоретического анализа также в точности соответствовали экспериментальным величинам. Однако для обеспечения этого соответствия было проделано следующее. Известно, что коэффициент преобразования электрического сигнала в акустический и наоборот для пластинчатых пьезопреобразователей зависит не только от коэффициента электромеханической связи пластины, но и от механического импеданса контактирующей среды [34]. Поэтому величина сопротивления R в плоскости преобразователей определяется не только параметрами преобразователя, но и механическим импедансом исследуемой жидкости. На рис. 5б представлена зависимость ΔS_{12} от сопротивления R . Именно использование этой зависимости привело к тому, что теоретические значения ΔS_{12} для всех жидкостей оказались равными экспериментальным величинам.

На рис. 4б представлена теоретическая зависимость коэффициента прохождения S_{12} от зазора d между преобразователями для чистого глицерина. Как уже отмечалось, на экспериментальной зависимости коэффициента прохождения S_{12} от зазора d между преобразователями для чистого глицерина видно, что с ростом величины этого зазора максимальное значение S_{12} плавно уменьшается. Очевидно, что это связано с заметным затуханием акустической волны в глицерине. Путем перебора величины удельного затухания волны было найдено такое ее значение, которое привело к совпадению теоретической и экспериментальной зависимостей S_{12} от зазора d . Затухание оказалось равным $\operatorname{Im} k = 6 \text{ Нп/м} = 0.52 \text{ дБ/см}$. Поскольку [3]

$$\operatorname{Im} k = \frac{2\pi^2 f^2 \eta_{11}}{Vc}, \quad (7)$$

отсюда продольная вязкость $\eta_{11} = 2.32 \text{ Па с}$. Следует отметить, что при таком подходе автоматически устраняется “кажущееся” затухание, связанное с не равным 1 коэффициентом отражения волны от преобразователей. В этом случае, как уже отмечалось, к собственной добротности слоя жидкости добавляется нагруженная добротность, приводящая к “кажущемуся” затуханию. Поэтому, если в соответствии с методом [32] определить затухание как разность максимальных значений S_{12} ($8-7.6 \text{ дБ}$), отнесенных к известному расстоянию ($5.45-0.95 \text{ мм}$), мы получим $\operatorname{Im} k = 0.89 \text{ дБ/см}$. Это значение выше, чем полученное $\operatorname{Im} k = 0.52 \text{ дБ/см}$ в связи с наличием “кажущегося” затухания, свя-

занного с уходом акустической мощности в преобразователи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью акустического интерферометра определена скорость акустической волны в жидкостях с различным акустическим импедансом. Впервые показано, что указанный импеданс определяет отношение резонансных величин максимума и минимума коэффициента прохождения S_{12} для одной и той же пары “излучатель—приемник” на зависимости коэффициента прохождения от расстояния между преобразователями. Впервые проведенный теоретический анализ позволил определить механический импеданс в плоскости “преобразователь—жидкость” в зависимости от акустического импеданса жидкости. На основе теоретического анализа разработана методика определения затухания жидкости, свободная от влияния “кажущегося” затухания, связанного с уходом части акустической мощности в преобразователи. Затухание продольной акустической волны, оцененное в глицерине по известной методике [32], включающей указанное “кажущееся” затухание, оказалось равным 0.89 дБ/см. С учетом этого источника ошибки истинное затухание равно 0.52 дБ/см.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (грант № 23-22-00134).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисимкин В.И., Воронова Н.В. Особенности генерации нормальных акустических волн высших порядков в тонких пьезоэлектрических пластинах // Акуст. журн. 2020. Т. 66. № 1. С. 3–7.
2. Borodina I.A., Zaitsev B.D., Teplykh A.A. Influence of the conductivity of a liquid contacting with a lateral electric field excited resonator based on PZT ceramics on its characteristics // Ultrasonics. 2020. V. 102. P. 106059. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2019.106059>
3. Минаков А.В., Пряжников М.И., Дамдинов Б.Б., Немцев И.В. Исследование объемной вязкости наносuspензий методом акустической спектроскопии // Акуст. журн. 2022. Т. 69. № 2. С. 182–189.
4. 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.
5. Anisimkin V.I., Kuznetsova I.E., Kolesov V.V., Pyataikin I.I., Sorokin V.V., Skladnev D.A. Plate acoustic wave sensor for detection of small amounts of bacterial cells in micro-litre liquid samples // Ultrasonics. 2015. V. 62. № 9. P. 156–159. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2015.05.012>
6. Borodina I.A., Zaitsev B.D., Alsovzidi A.K.M., Караваева 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.
7. Ультразвук. Маленькая энциклопедия. Под ред. Голяминой И.П. М.: Советская энциклопедия, 2011. 400 с.
8. Бабий В.И. О метрологии скорости звука в жидкости // Акуст. журн. 2017. Т. 63. № 3. С. 261–264.
9. Неручев Ю.А., Болотников М.Ф., Зотов В.В. Исследования скорости ультразвука в органических жидкостях на линии насыщения // ТВТ. 2005. Т. 43. № 2. С. 274–316.
10. Feldman M.K., Katyal S., Blackwood M.S. US artifacts // Radio Graphics. 2009. V. 29. № 4. P. 1179–1189. <https://doi.org/10.1148/rg.294085199>
11. Dudley N.J., Gibson N.M., Fleckney M.J., Clark P.D. The effect of speed of sound in ultrasound test objects on lateral resolution // Ultrasound Med. Biol. 2002. V. 28. № 11–12. P. 1561–1564. [https://doi.org/10.1016/S0301-5629\(02\)00648-8](https://doi.org/10.1016/S0301-5629(02)00648-8)
12. Cushing K.W., Garofalo F., Magnusson C., Ekblad L., Bruus H., Laurell T. Ultrasound characterization of microbead and cell suspensions by speed of sound measurements of neutrally buoyant samples // Anal. Chem. 2017. V. 89. № 17. P. 8917–8923. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.7b01388>
13. Hincapié Gómez E., Tryner J., Aligata A.J., Quinn J.C., Marchese A.J. Measurement of acoustic properties of microalgae and implications for the performance of ultrasonic harvesting systems // Algal. Res. 2018. V. 31. P. 77–86. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2018.01.01>
14. Mahmoud B., Rice H.P., Mortimer L., Fairweather M., Peakall J., Harbottle D. Acoustic method for determination of the thermal properties of nanofluids // Ind. Eng. Chem. Res. 2019. V. 58. № 42. P. 19719–19731. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b02983>
15. Zafarani-Moattar M.T., Majdan-Cegincara R. Effect of temperature on volumetric and transport properties of nanofluids containing ZnO nanoparticles poly(ethylene glycol) and water // J. Chem. Thermodyn. 2012. V. 54. P. 55–67. <https://doi.org/10.1016/j.jct.2012.03.010>
16. Povey M.J.W. Ultrasound particle sizing: A review // Particuology. 2013. V. 11. № 2. P. 135–147. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2012.05.010>
17. Physical Principles of Medical Ultrasonics: 2nd Edition. Eds. Hill C.R., Bamber J.C., ter Haar G.R. 2004. John Wiley & Sons, Ltd. 528 p. <https://doi.org/10.1002/0470093978>
18. Красильников В.А., Крылов В.В. Введение в физическую акустику. М.: Наука, 1984. 403 с.
19. Бабий В.И. Проблемы и перспективы измерения скорости звука в океане // Морской гидрофизический институт НАН Украины. Севастополь: НПП “ЭКОСИ-Гидрофизика”, 2009. 142 с.
20. Микушин И.И., Серавин Г.Н., Чернов В.П. Цилиндрическая акустическая база импульсного измерителя скорости звука в жидкости // Труды X Всероссийской конференции “Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики (ГА-2010)”. СПб.: Наука, 2010. С. 114–118.

21. *Salo H., Oy J.* Method and apparatus for measuring sound velocity in liquid, United States Patent. № 5, 936, 160, Aug. 10, 1999.
22. *Полканов К.И., Романов В.Ю., Смелов Д.А.* Патент 2208223 РФ. МКИ G01H 5/00. Измеритель скорости звука в жидких средах. Оpubл. 10.07.2003. Б.И. № 19.
https://patents.s3.yandex.net/RU2208223C2_20030710.pdf (дата обращения 25.05.2023 г.)
23. *Васильев С.А., Полканов К.И., Романов В.Ю., Серавин Г.Н., Смелов Д.А.* Высокоточный импульсный измеритель скорости звука в воде // Труды VII Международной конференции “Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики (ГА-2004)”. СПб.: Наука, 2004. С. 38–41.
24. *Жилина Н.А., Полканов К.И., Романов В.Ю., Васильев С.А., Смелов Д.А.* Измеритель скорости звука в морской воде // Навигация и гидрография. 2005. № 20–21. С. 97–101.
25. *Meister E.C.* Measurement of the temperature and concentration dependent sound velocity in ethanol-water liquid mixtures // *Physicalisch-Chemisches Praktikum Spring Semester. Zurich. January 15, 2015.* P. 1–7.
https://analytik.ethz.ch/praktika/phys_anal/Musterbericht.pdf (дата обращения 25.05.2023 г.)
26. *Приленко П.А.* Патент 2773980 РФ. МПК G01H 5/00. Метод измерения скорости звука в жидкости. Оpubл. 14.06.2022. Б.И. № 17.
https://patents.s3.yandex.net/RU2773980C1_20220614.pdf (дата обращения 25.05.2023 г.)
27. *Серавин Г.Н., Микушин И.И., Лобанов В.Н.* Прямые импульсные методы измерения скорости звука в жидкости // Известия ЮФУ. Технические науки. Тематический выпуск. 2011. № 9(122). С. 238–243.
28. *Коробов А.И., Сапожников О.А., Хохлова В.А., Цысарь С.А.* Измерение скорости звука в жидкостях. Методическая разработка специального физического практикума кафедры акустики. М.: Физический факультет МГУ, 2010. С. 1–37.
29. *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.
30. *Бергман Л.* Ультразвук и его применение в науке и технике. М.: Изд. иностр. лит., 1957. 727 с.
31. *Кольцова И.С., Хомутова А.С., Дейнега М.А.* Скорость ультразвуковых волн при структурных перестройках дисперсных сред // Акуст. журн. 2016. Т. 62. № 2. С. 187–193.
32. *Рудин А.В., Горбунов А.И.* Исследование акустических свойств жидких сред методом интерферометра переменной акустической базы // Материалы XI Международной научно-технической конференции молодых специалистов, аспирантов и студентов “Математическое и компьютерное моделирование естественно-научных и социальных проблем”, Россия, г. Пенза, 30 мая–1 июня 2017 // Издат. ПГУ. 2017. С. 184–189.
33. *Гурбатов С.Н., Демин И.Ю., Клемина А.В., Клемин В.А.* Акустический анализ состава крови человека // Акуст. журн. 2009. Т. 55. № 4–5. С. 496–505.
34. *Royer D., Dieulesaint E.* Elastic waves in solids II. Generation, Acousto-optic Interaction, Applications. Berlin: Springer, 1999. 446 p.