

УДК 538.956,534.286,534.14

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ И ВЯЗКОСТНЫХ СВОЙСТВ ЖИДКОСТЕЙ

© 2023 г. Е. С. Шамсутдинова^{а, *}, В. И. Анисимкин^{а, **}, А. С. Фионов^{а, ***}, А. В. Смирнов^{а, ****},
В. В. Колесов^{а, *****}, И. Е. Кузнецова^{а, *****}

^аИнститут радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
ул. Моховая 11, корп. 7, Москва, 125009 Россия

*e-mail: shes1996@bk.ru

**e-mail: anis@cplire.ru

***e-mail: fionov@cplire.ru

****e-mail: andre-smirnov-v@yandex.ru

*****e-mail: kvv@cplire.ru

*****e-mail: kuziren@yandex.ru

Поступила в редакцию 25.04.2022 г.

После доработки 29.07.2022 г.

Принята к публикации 22.09.2022 г.

Для контроля физических свойств полярных и неполярных жидких сред проведено измерение параметров модельных систем на основе вазелинового и силиконового масел, а также глицерина с помощью электрофизических и акустоэлектрических методов. Электрофизические исследования выполняли с помощью LCR-метра Agilent E4980A и измерительной ячейки, состоящей из пробирки Эппендорфа и двух коаксиальных никелевых электродов, образующих цилиндрический конденсатор. Диэлектрическая проницаемость жидкости определялась по формуле для конденсатора. Для акустической части задачи в качестве пьезоэлектрической пластины использовался ST,X-кварц, на котором была размещена ячейка для жидкости из фторопласта. Измерения проводились в три этапа: измерение фазы и амплитуды акустической волны i) без контакта с жидкостью, ii) в контакте с чистой исследуемой жидкостью и iii) в контакте с исследуемой жидкостью с наполнителем. В качестве наполнителей использовались микрочастицы фармацевтического активированного угля и поверхностно-активное вещество сорбитан моноолеат. Вязкость суспензий определялась по разнице затухания акустической волны в присутствии чистой жидкости и жидкости с наполнителем.

Ключевые слова: вязкость жидкостей, электропроводность жидкостей, акустическая линия задержки, датчик свойств жидкости

DOI: 10.31857/S0320791922600238, **EDN:** DAGBJL

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время активно ведутся работы по созданию различных новых материалов, таких как коллоидные растворы, суспензии, эмульсии, взвеси и другие смеси на основе полярных и неполярных жидкостей [1]. В связи с этим актуальным является разработка метода, позволяющего одновременно измерять кинетические и электрофизические свойства создаваемых материалов. Одним из таких подходов может являться использование акустоэлектронных технологий.

Как известно, характеристики акустических волн сильно зависят от типа нагрузки на поверхности звукопровода. Они могут активно реагировать на изменение как электрических [2–4], так и механических [5–7] граничных условий. Эти волны могут использоваться для определения физи-

ческих характеристик не только различных пленок и покрытий на их поверхности, но и для определения свойств жидкостей.

В настоящее время известны акустические датчики для определения вязкости жидкости, основанные на поперечно-горизонтальных (SH) поверхностных и объемных волнах [8–12]. Подобные датчики также используются для исследования дисперсных систем с биологическими объектами [13], наносуспензий [14], различных масел [15], компонентов нефти [16].

Однако, работ, посвященных исследованию взаимодействия акустических волн с неполярными жидкостями и суспензиями на их основе, не так много. Известны исследования акустических волн в неполярных диэлектриках He I и He II [17]. Кроме того, разрабатывались идентификаторы

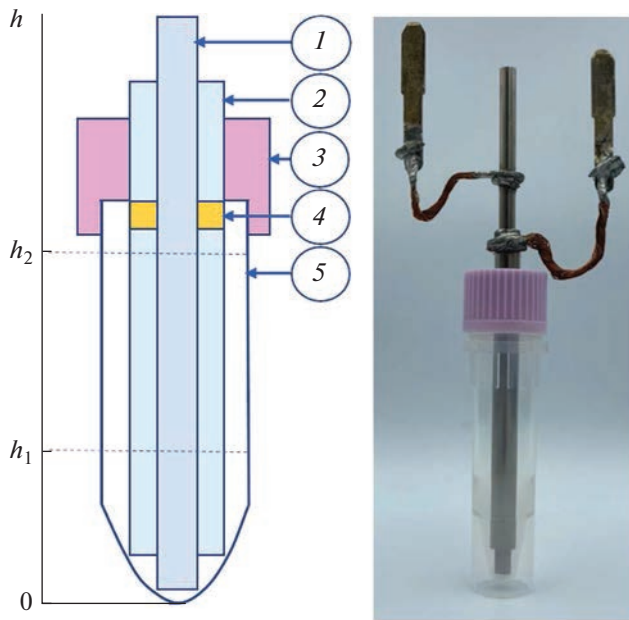


Рис. 1. Схематическое изображение измерительной ячейки и фотография (1 – внутренний электрод; 2 – внешний электрод; 3 – закручивающаяся крышка с отверстием; 4 – изолятор; 5 – эппендорф).

бензина и масла на СН ПАВ, волнах в пластинах и резонаторах с поперечно-горизонтальной поляризацией [9, 15, 18–20]. Следует отметить, что для теоретического анализа распространения акустических волн в звукопроводах, находящихся в контакте с жидкостями, необходимо знать свойства таких жидкостей (диэлектрическая проницаемость, вязкость, модули упругости, плотность).

Как известно, неполярные жидкости, такие как нефть, бензин, органические наножидкости, обладают низкой диэлектрической проницаемостью, а их молекулы не обладают собственным дипольным моментом [21]. В настоящее время существуют работы, посвященные исследованию электрофизических параметров таких жидкостей. Однако, в них в основном исследованы определенные суспензии, которые используются в конкретных технических задачах [22–24]. Что касается вязкости и модулей упругости таких жидкостей, то данная информация практически отсутствует.

В последние годы, с развитием технологий, появляются новые композитные материалы, заменяющие конструкционные материалы, используемые ранее в машиностроении, автомобилестроении, авиастроении и т.д. Использование деталей, созданных из таких материалов, предполагает их контакт с технологическими жидкостями. Многие из таких жидкостей являются неполярными и, очевидно, их свойства будут меняться в результате загрязнения из-за износа соответствующих деталей. Таким образом,

необходимо проведение комплексного исследования акустических и электрофизических свойств таких жидкостей, включая поиск механизмов возможного значительного изменения их параметров. Полученные результаты позволят разработать новые методы контроля их характеристик.

Данная работа является первым этапом в решении задачи о разработке метода изменения электрофизических параметров неполярных жидкостей и исследования их электрофизических и акустических свойств. Цель состоит в разработке и создании универсальной ячейки и методики исследования электрофизических свойств неполярных жидкостей, позволяющих оперативно готовить и проводить измерения параметров композитных жидких сред с широким набором характеристик, а также измерение вязкости создаваемых образцов при помощи акустического метода.

ИЗМЕРЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ СУСПЕНЗИЙ НА ОСНОВЕ НЕПОЛЯРНЫХ И ПОЛЯРНЫХ ЖИДКОСТЕЙ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Основой для ячейки была выбрана стандартная пробирка Эппендорфа (Screw Cup Tube) объемом 1.5 мл производства Axygen Scientific. Пробирка имеет закручивающуюся крышку с уплотнителем и юбку-опору на коническом основании (рис. 1). Электрической частью ячейки является коаксиальная система из двух цилиндрических никелевых электродов с рабочими диаметрами 3.5 и 2.5 мм соответственно (наружный и внутренний) и рабочей длиной 22 мм, соосность электродов обеспечивается тефлоновым изолятором длиной 5 мм, расположенным в их верхней части. В объем пробирки Эппендорфа электроды вводятся через отверстие с плотной посадкой, просверленное в крышке, и фиксируются в конусообразном дне. Емкость такого измерительного конденсатора с воздушным заполнением составляла $C_0 = 10.8$ пФ при частотах 200 Гц...2 МГц. Измерение емкости и сопротивления ячейки с исследуемой жидкостью проводили при помощи LCR-метра Agilent E4980A.

Диэлектрическая проницаемость жидкости вычислялась по формуле:

$$\varepsilon = \frac{C(\Delta h)}{2\pi\varepsilon_0 \ln \frac{D}{d} \Delta h},$$

где $C(\Delta h) = C(h_2) - C(h_1)$ – разность емкостей конденсатора при разной его наполненности; $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ Ф/м – постоянная диэлектрическая проницаемость; D и d – диаметры внешнего и

внутреннего электродов соответственно. Уровни жидкости h_1 и h_2 выбирались таким образом, чтобы уменьшить влияние краевых эффектов на результат.

На первом этапе эксперимента выбирались неполярные жидкости с низкой диэлектрической проницаемостью: силиконовое масло (СМ) марки ПМС-100 ($\epsilon = 2.1$) и вазелиновое масло (ВМ) ($\epsilon = 2.25$). В качестве наполнителей использовали фармацевтический активированный уголь (АУ) и сорбитан моноолеат (SPAN 80 Sigma Aldrich). Для сравнения в качестве полярной жидкости брался глицерин ($\epsilon = 44.5$).

Для создания углеродсодержащих суспензий в качестве дисперсной фазы нами был выбран фармацевтический активированный уголь как доступный и дешевый аналог. Было необходимо размолоть таблетки под прессом, затем частицы диспергировали в водной фазе с помощью ультразвукового диспергатора МЭЛФИЗ мэф93.1 для получения мелкой фракции частиц. Для избавления от водной среды частицы высушивали в печи МИМП-3П при 110°C , после чего микрочастицы еще раз диспергировались ультразвуком в неполярной среде. В итоге получали микрочастицы размером 2–10 мкм. Концентрация микрочастиц активированного угля в неполярных жидкостях (вазелиновое масло и силиконовое масло) составляла 60 мг/мл. Приведенная концентрация подходила для создания устойчивой суспензии и не приводила к резкому повышению вязкости жидкости. Затем исследовались характеристики полученной суспензии на LCR-метре.

Кроме того, были созданы суспензии на основе вазелинового масла и глицерина с поверхностно активным веществом сорбитаном моноолеатом в концентрации 5 мас. %. Концентрация выбиралась исходя из работы [22], в которой авторы использовали сорбитан моноолеат (SPAN 80) для повышения электропроводности неполярных жидкостей. Результаты исследований суспензий электрофизическим методом представлены на рис. 2 и в табл. 1.

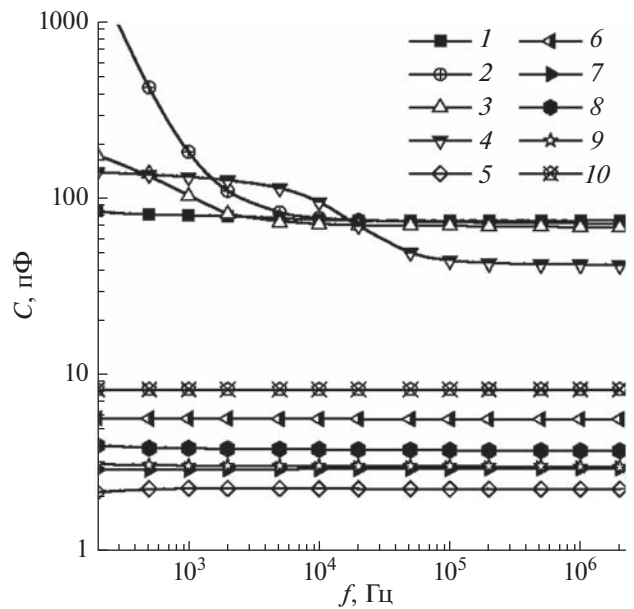


Рис. 2. Зависимость емкости измерительного конденсатора от частоты (1 – глицерин; 2 – глицерин + SPAN80; 3 – глицерин (ИИЭ); 4 – глицерин + SPAN80 (ИИЭ); 5 – СМ; 6 – СМ + АУ; 7 – ВМ; 8 – ВМ + АУ; 9 – ВМ + SPAN80, 10 – пустой конденсатор).

На рис. 2 наблюдается некоторое различие поведения зависимостей для суспензий на основе неполярных жидкостей. Однако, поскольку на краях частотного диапазона основная погрешность прибора несколько выше, чем в его средней части, то возможны отклонения измеренной емкости от истинного значения в ту или другую сторону. Это следует из описания параметров прибора LCR-Meter Agilent E4980A, представленного производителем, и выполненных измерений емкости незаполненной ячейки. Таким образом, при наблюдаемых незначительных отличиях графика зависимости для жидкости 5 (рис. 2) от остальных неполярных суспензий делать предположение о наличии релаксационных процессов было бы некорректным. Однако данный во-

Таблица 1. Сопротивление измерительной ячейки и диэлектрическая проницаемость неполярных жидкостей и глицерина и смесей на их основе

Образец	ϵ (1 кГц)	ϵ (1 МГц)	R, Ом	Образец	ϵ (1 кГц)	ϵ (1 МГц)	R, Ом
ВМ	2.25	2.26	1.8×10^{11}	ВМ + АУ	2.6	2.6	1.8×10^9
				ВМ + SPAN 80	2.3	2.3	3×10^8
СМ	2.1	2.1	9.4×10^{11}	СМ + АУ	3.4	3.4	1.5×10^9
Глицерин	45	42	3.8×10^5	Глицерин + SPAN 80	85	37	2.1×10^4
Глицерин (ИИЭ)	45	30	2.1×10^6	Глицерин + SPAN 80 (ИИЭ)	51	17	3×10^6

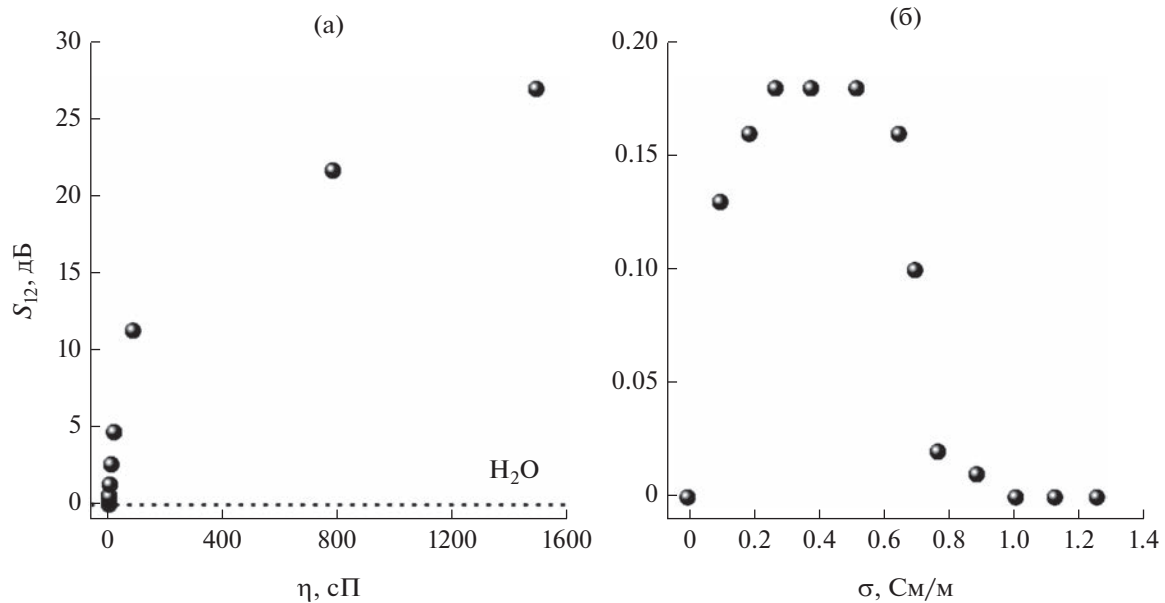


Рис. 3. Калибровочные кривые моды 49.74 МГц в пластине ST,X-кварца толщиной $H/\lambda = 1.0$ ($H = \lambda = 300$ мкм), отсечка = 15 мкс для (а) вязкости и (б) проводимости.

прос может стать предметом дополнительного изучения.

При исследовании полярных жидкостей наблюдается низкое (порядка 10^4 – 10^5 Ом) сопротивление измерительной ячейки и сильная зависимость ее емкости от частоты (рис. 2). В предположении, что причинами этого являются макросмещение диполей, ионов и связанных с ним сквозной электрический ток, были приняты меры для изоляции измерительных электродов (ИИЭ) с помощью электроизоляционного акрилового лака Plastik-71. Сопротивление ячейки, заполненной полярной жидкостью, при этом увеличилось на 2–3 порядка.

Из табл. 1 видно, что во всех случаях добавление наполнителей приводит к увеличению диэлектрической проницаемости по сравнению с чистым веществом. Результаты измерений представленным методом показали, что диэлектрическая проницаемость полярных жидкостей зависит от частоты и значения для чистых жидкостей в пределах погрешности измерения (5%) совпадают со справочными данными [21].

ИЗМЕРЕНИЕ ВЯЗКОСТИ СУСПЕНЗИЙ НА ОСНОВЕ НЕПОЛЯРНЫХ ЖИДКОСТЕЙ АКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Акустические измерения вязкости однокомпонентных жидкостей и жидких растворов проводились с использованием линии задержки на основе специально подобранной пластинчатой волны Лэмба [25]. В процессе поиска для мод раз-

ных порядков и пластин разных толщин измерялись величины вносимых потерь $S_{12}(f)$ при калиброванных нагрузках одной из поверхностей пластины — на воздухе S_{12}^{air} (вязкость $\eta = 0$, проводимость $\sigma \approx 0$), с дистиллированной водой $S_{12}^{H_2O}$ ($\eta = 1.003$ сПуаз), водными растворами глицерина $S_{12}^{H_2O+\text{Глицерин}}$ (1.003 сПуаз $< \eta < 1500$ сПуаз, $\sigma \approx 0$), чистым глицерином $S_{12}^{\text{Глицерин}}$ ($\eta = 1491$ сПуаз, $\sigma \approx 0$) и водными растворами NaCl ($\eta \approx 1$ сПуаз, σ от 0 до 10 См/м). С использованием указанных жидкостей экспериментально определялись калибровочные кривые той или иной моды в зависимости от вязкости $S_{12}(\eta)$ и проводимости $S_{12}(\sigma)$, которые сравнивались между собой (рис. 3).

В результате оптимизации материала пластины (кварц), толщины пластины (300 и 500 мкм) и номера моды Лэмба (от 0 до 10) наиболее чувствительной к значению вязкости и наименее чувствительной к проводимости жидкости оказалась мода частотой 49.74 МГц в пластине ST,X-кварца с нормированной толщиной $H/\lambda = 1.0$ (H — толщина, λ — длина волны) (рис. 4).

Чувствительность этой моды к вязкости меняется с η и составляет 0.3 дБ/сПуаз при $\eta = 1$ –20 сПуаз, 0.12 дБ/сПуаз при $\eta = 20$ –100 сПуаз и 0.015 дБ/сПуаз при $\eta = 100$ –1500 сПуаз. При этом электрические отклики той же моды меньше вязкостных на два порядка величины и сравниваются с ними лишь при $\eta < 2$ сПуаз. Объем тестируемой жидкости, достаточный для измерения, составляет 100 мкл. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 5.

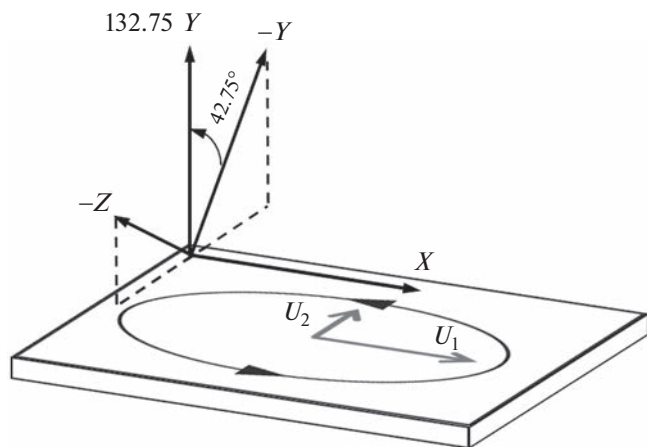


Рис. 4. Схематическое изображение кристаллографической ориентации пластины и поляризации акустической волны на ее поверхности.

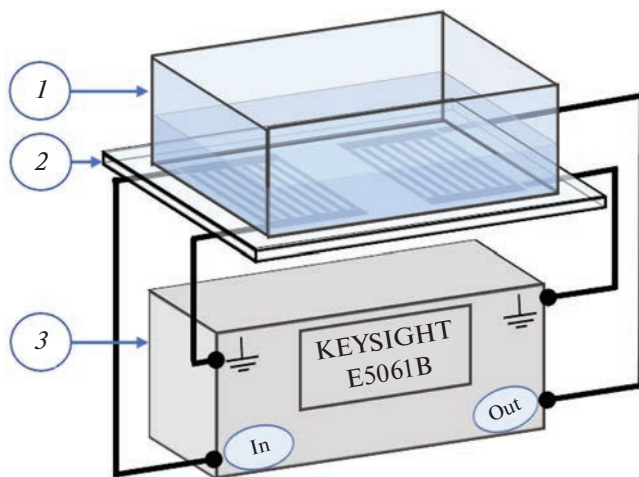


Рис. 5. Схема подключения акустоэлектронного устройства к анализатору четырехполосников KEYSIGHT E5061B.

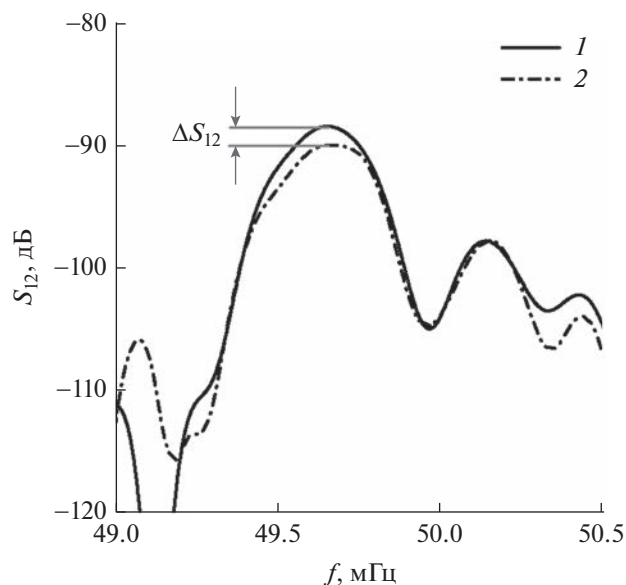


Рис. 6. Изменение вносимых потерь для моды 49.74 МГц на воздухе и при нанесении чистого глицерина (1) и глицерина с 5 мас. % SPAN80 (2).

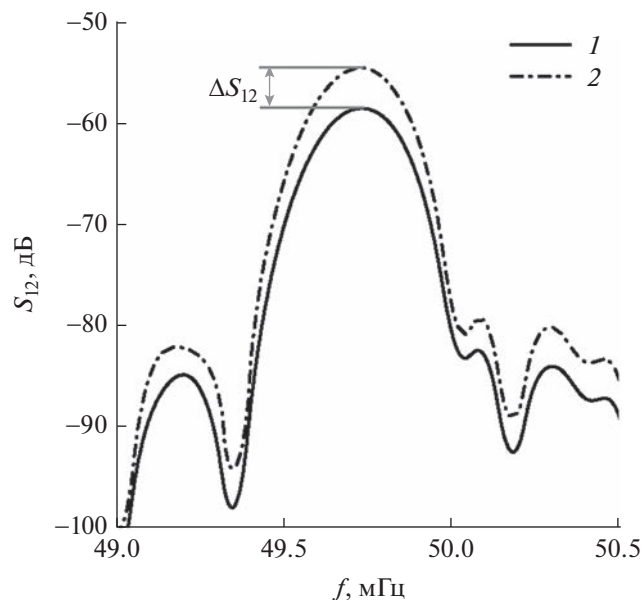


Рис. 7. Изменение вносимых потерь для моды 49.74 МГц на воздухе и при нанесении СМ (1) и СМ с АУ (60 мг/мл) (2).

Для демонстрации эффективности акустических измерений оптимизированная мода была применена для определения вязкости чистого глицерина, глицерина с 5 мас. % SPAN 80, ВМ, ВМ с 5 мас. % SPAN 80 или с АУ, а также для СМ и СМ с АУ (рис. 6, 7, табл. 2). Как и ожидалось, из-за увеличения потерь на распространение между входным и выходным преобразователями при нанесении вязких жидкостей вносимые потери S_{12} по сравнению со значением на воздухе возрастают, а величина возрастания зависит от сорта

жидкости и содержащихся в ней примесей. Причем наличие примесей может как увеличить (рис. 6), так и уменьшить (рис. 7) акустическое затухание и вязкость по сравнению с чистым веществом.

Значения вязкости жидкостей, измеренные акустическим методом с использованием калибровочной кривой (рис. 3а) и данных на рис. 6 и 7, представлены в табл. 2. Результаты измерений для базовых жидкостей (глицерин, ВМ и СМ) находятся в согласии с табличными данными [26].

Таблица 2. Результаты акустических измерений при комнатной температуре (20°C)

Образец	Глицерин	Глицерин + SPAN80	СМ	СМ + АУ	ВМ	ВМ + SPAN80	ВМ + АУ
η , сПуаз	1500	1550	80	47	70	75	73

Результаты для базовых жидкостей с примесями приводятся впервые.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения работы была разработана и создана универсальная коаксиальная измерительная ячейка и отработана методика измерения диэлектрической проницаемости и сопротивления полярных и неполярных жидкостей и суспензий на их основе электрофизическим методом. Проведенные измерения показали повышение диэлектрической проницаемости и снижение электрического сопротивления вазелинового масла и силиконового масла при добавлении микрочастиц активированного угля. Добавление сорбитана моноолеата практически не изменяет диэлектрическую проницаемость вазелинового масла, однако понижает сопротивление на 3 порядка. Диэлектрическая проницаемость полярного глицерина при добавлении сорбитана моноолеата повышается на частоте 1 кГц и понижается на частоте 1 МГц. Изоляция измерительных электродов для случая с полярными жидкостями и суспензиями на их основе позволяет избежать сквозного электрического тока в конденсаторе.

Для реализации акустического метода была подобрана акустическая мода с эллиптической поляризацией, распространяющаяся в пластине STX-кварца и чувствительная к вязкости суспензии, и разработана соответствующая методика измерения. Результаты показали повышение вязкости вазелинового масла и глицерина при добавлении наполнителей, что по всей видимости связано с появлением дополнительного рассеяния энергии волны на включениях. Однако, при добавлении микрочастиц активированного угля в силиконовое масло вязкость снижается. Возможно, это связано с отличием свойств частиц активированного угля от частиц из других наполнителей. Данный вопрос требует проведения дальнейших исследований. Следует отметить, что результаты измерений для чистых жидкостей, выполненные разработанными методами, совпадают со справочными данными.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-49-00062, <https://rscf.ru/project/21-49-00062>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Das S.K., Choi S.U.S., Yu W.H., Pradeep T. Nanofluids: science and technology. John Wiley & Sons, 2007.
2. Zhu F., Wang B., Qian Z., Kuznetsova I., Ma T. Influence of surface conductivity on dispersion curves, mode shapes, stress, and potential for Lamb waves propagating in piezoelectric plate // IEEE Trans. on Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. 2019. V. 67. № 4. P. 855–862. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2019.2954745>
3. Borodina I.A., Zaitsev B.D., Teplykh A.A. Effect of the conductivity of a thin film located near the acoustic delay line on the characteristics of propagating SH0 wave // Ultrasonics. 2018. V. 91. P. 62–67. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2018.07.017>
4. Croenne C., Vasseur J.O., Matar O.B., Hladky-Hennion A.C., Dubus B. Non-reciprocal behavior of one-dimensional piezoelectric structures with space-time modulated electrical boundary conditions // J. Appl. Phys. V. 126. № 14. <https://doi.org/10.1063/1.5110869>
5. Filipiak J., Marc P. Surface acoustic wave vibration sensor as a seismometer // Sens. Actuators A. V. 323. 112653. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.112653>
6. Джоши С.Г., Зайцев Б.Д., Кузнецова И.Е., Кузнецова А.С. Гравиметрическая чувствительность акустических волн в пьезоэлектрических пластинах // Радиотехника и электроника. 2005. Т. 50. № 6. С. 707–711.
7. Казаков Л.И. О распространении звука в дисперсных средах // Акуст. журн. 2018. Т. 64. № 3. С. 330–341. <https://doi.org/10.7868/S0320791918030097>
8. 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>
9. Kobayashi S., Kondoh J. Feasibility study on shear horizontal surface acoustic wave sensors for engine oil evaluation // Sensors. V. 20. № 8. 2184. <https://doi.org/10.3390/s20082184>
10. Казаков Л.И. Резино-жидкостный резонатор // Акуст. журн. 2020. Т. 66. № 4. С. 357–365. <https://doi.org/10.31857/S0320791920020033>
11. Wang W.Y., Zhang C., Zhang Z.T., Liu Y., Feng G.P. Three operation modes of lateral-field-excited piezoelectric devices // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 93. № 24. 242906. <https://doi.org/10.1063/1.3050538>
12. Qin L.F., Chen Q.M., Cheng H.B., Chen Q., Li J.F., Wang Q.M. Viscosity sensor using ZnO and AlN thin film bulk acoustic resonators with tilted polar c-axis

- orientations // *J. Appl. Phys.* 2011. V. 110. № 9. 094511. <https://doi.org/10.1063/1.3657781>
13. Анисимкин А.В., Покусаев Б.Г., Складнев Д.А., Сорокин В.В., Тюпа Д.В. Применение акустоэлектронной методики для исследования упорядоченных микроструктурированных дисперсных систем с биологическими объектами, включенными в гидрогель // *Акуст. журн.* 2016. Т. 62. №. 6. С. 738–743. <https://doi.org/10.7868/S0320791916060010>
 14. Минаков А.В., Пряжников М.И., Дамдинов Б.Б., Немцев И.В. Исследование объемной вязкости наносuspensions методом акустической спектроскопии // *Акуст. журн.* 2022. Т. 68. №. 2. С. 182–189. <https://doi.org/10.31857/S0320791922020058>
 15. Kondoh J., Nakayama K., Kuznetsova I. Study of frequency dependence of shear horizontal surface acoustic wave sensor for engine oil measurements // *Sens. Actuators A*. V. 325. 112503. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.112503>
 16. Ахметов Б.Р., Вахин А.В. О некоторых характеристиках затухания ультразвука в суспензиях высокомолекулярных компонентов нефти // *Акуст. журн.* 2018. Т. 64. № 5. С. 566–571. <https://doi.org/10.1134/S0320791918050015>
 17. Tomchenko M.D. Acoustic modes in He I and He II in the presence of an alternating electric field // *J. Low Temp. Phys.* V. 46. № 5. P. 490–501. <https://doi.org/10.1063/10.0001053>
 18. 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*. V. 80. P. 96–100. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2017.05.003>
 19. Kuznetsova I.E., Zaitsev B.D., Seleznev E.P., Verona E. Gasoline identifier based on SH0 plate acoustic waves // *Ultrasonics*. V. 70. P. 34–37. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2016.04.016>
 20. Pu Y.Y., O'Shea N., Hogan S.A., Tobin J.T. Assessment of a solid-state bulk acoustic wave sensor to measure viscosity of Newtonian and Non-Newtonian fluids under static and flow conditions // *J. Food Eng.* T. 277. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.109917>
 21. Ахадов Я.Ю. Диэлектрические свойства чистых жидкостей. М.: Изд-во МАИ, 1999. 854 с.
 22. Dukhin A.S., Goetz P.J. How non-ionic “electrically neutral” surfactants enhance electrical conductivity and ion stability in non-polar liquids // *J. Electroanal. Chem.* 2006. V. 588. № 1. P. 44–50. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2005.12.001>
 23. Guo Q., Singh V., Behrens S.H. Electric charging in nonpolar liquids because of nonionizable surfactants // *Langmuir*. 2010. V. 26. №. 5. P. 3203–3207. <https://doi.org/10.1021/la903182e>
 24. Chattopadhyay A., Dhar P. Dielectric relaxation behaviors and dissipation characteristics of colloidal nanocarbon (graphene and CNTs) complex fluids // *J. Appl. Phys.* 2019. V. 125. № 3. P. 034103. <https://doi.org/10.1063/1.5079327>
 25. Anisimkin V.I., Voronova N.V. New modification of the acoustic Lamb waves and its application for liquid and ice sensing // *Ultrasonics*. 2021. V. 116. 106496. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2021.106496>
 26. Weast R.C., Astle M.J., Beyer W.H. Chemical Rubber Company Handbook of Chemistry and Physics, 66th ed. Chemical Rubber. Boca Raton. FL. 1985. P. D232.