

АКУСТОЭЛЕКТРОННЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН В ЖИДКОСТЯХ

© 2023 г. И. С. Кольцова^а, А. С. Хомутова^а, *

^аСанкт-Петербургский Государственный Университет, Физический факультет,
ул. Ульяновская 1, Санкт-Петербург, Петродворец, 198504 Россия

*e-mail: a.s.khomutova@gmail.com

Поступила в редакцию 22.07.2022 г.

После доработки 11.11.2022 г.

Принята к публикации 22.12.2022 г.

В работе рассматривается новый акустоэлектронный метод измерения скорости ультразвуковых волн в жидкости. Показано, что по изменению угла между направлением распространения ультразвуковой волны и нормалью к поверхности пьезокварцевого приемника, помещенного в исследуемую жидкость, можно определить скорость распространения этой волны в жидкости. Этим методом при частоте волны 3 МГц были измерены скорости звука в дистиллированной воде, глицерине, хладоне. Полученные экспериментальные величины скоростей удовлетворительно согласуются с табличными данными.

Ключевые слова: ультразвук, скорость, частота, фаза, пьезоприемник, осцилляция, волновой вектор, угол, импульс, давление, акустоэлектронное взаимодействие

DOI: 10.31857/S032079192260041X, **EDN:** QRGAVV

В экспериментальной практике скорость ультразвуковых волн в средах измеряется импульсно-фазовым методом, основанным на определении набега фаз при изменении расстояния между датчиками или частоты зондирующего импульса [1, 2]. Методы измерения скорости ультразвука продолжают совершенствоваться, однако все еще остаются относительно сложными и времяемкими [3–7].

В данной работе рассматривается новый акустоэлектронный метод измерения скорости ультразвуковых волн (УЗВ) в жидкости. Метод основан на особенностях работы пьезоэлектрического преобразователя плоской акустической волны при изменении угла между фазовым фронтом волн и плоскостью преобразователя [1, 8].

Известно, что на поверхности пьезокварца при воздействии акустических волн возникают электрические заряды. При металлизации поверхностей кварца свободные электроны “считывают” эффективное электрическое поле.

Напряжение U , снимаемое со всей поверхности S приемного кварца:

$$U = D \int_S P_M dS,$$

где P_M — давление акустической волны в произвольной точке поверхности приёмника, D — размерная величина, связывающая напряжение с

эффективным давлением и зависящая от коэффициента электромеханической связи [1, 8].

Рассмотрим случай, когда прожекторный ультразвуковой луч падает на пьезокварцевый приемник, размеры которого много больше длины волны: $R \gg \lambda$.

На рис. 1 представлены ситуации (1), когда волновой вектор $\mathbf{k}$ и нормаль $\mathbf{n}$ к поверхности приемника параллельны друг другу. При этом набег фаз на поверхности приемника $\Delta\varphi = 0$, а величина напряжения, снимаемая с приемника, максимальная $U_{1\max}$. При образовании угла между нормалью к поверхности кварца и волновым вектором (2), такого, что одна половина площади приемного кварца будет находится в зоне сжатия, а другая в зоне разрежения, набег фаз от одного края приемника до противоположного будет $\Delta\varphi = 360^\circ$. Напряжение, снимаемое с приемника, будет минимальное $U_{1\min}$.

Продолжая дальше увеличивать угол между нормалью и волновым вектором (3), можно опять достичь такого набега фаз на приемнике, при котором величина напряжения возрастает до некоторой максимальной величины $U_{2\max}$ и т.д. Осцилляционный характер сигнала будет зависеть от разности хода лучей, приходящих к краям приемника.

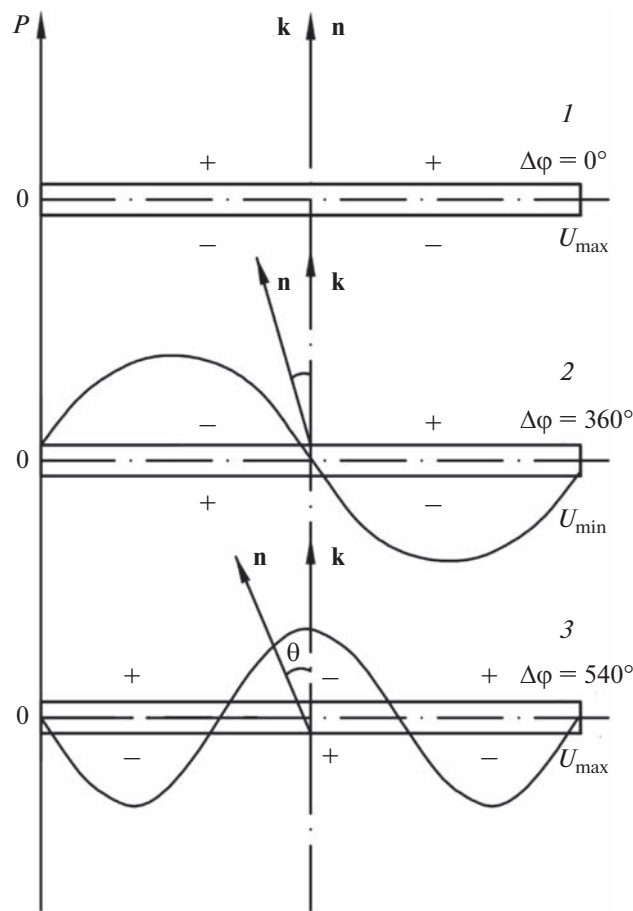


Рис. 1. Набег фаз на поверхности пьезодатчика при падении ультразвуковой волны.

Найдем выражение эффективного давления $\langle P \rangle$ для поршневого приемника радиуса $R \gg \lambda$, обычно применяемого в экспериментальной практике. Введем сферическую систему координат ρ, θ, φ с началом в центре приемного кварца. На рис. 2 представлена схема наклонного падения УЗ луча на поверхность приемника и показаны параметры, входящие в формулы.

Когда поверхность приемника параллельна фазовой поверхности волны, то давление P в каждой точке приемника имеет одну и ту же фазу и

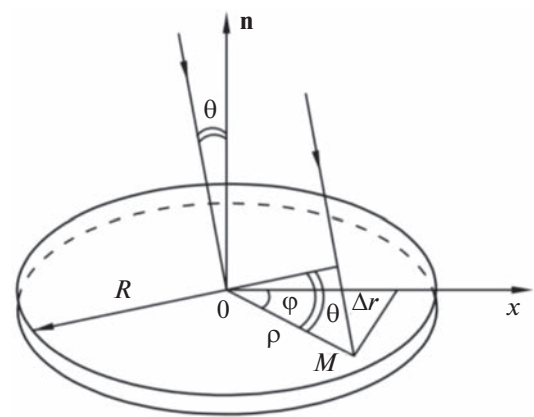


Рис. 2. Разность хода лучей при наклонном падении акустической волны на пьезоприемник конечных размеров.

амплитуду. В случае возникновения угла между направлением волнового вектора и нормалью к поверхности приемника имевшее место равенство давлений и постоянств фаз на приемнике нарушается. Разность хода лучей, приходящих в разные точки приемника Δr будет определяться следующим образом: $\Delta r = \rho \cos \varphi \sin \theta$.

Эффективное давление $\langle P \rangle$, определяющее величину напряжения, снимаемого с приемника, записывается следующим образом [1, 8]:

$$\frac{\langle P \rangle}{P_0} = \frac{\cos \theta}{S} \int_0^R \int_0^{2\pi} \cos(k\rho \sin \theta \cos \varphi) d\varphi d\rho, \tag{1}$$

где k – волновое число. Используя соотношение из теории специальных функций [14]:

$$J_0(z) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \cos(z \cos t) dt,$$

где J_0 – функция Бесселя, преобразуем (1) к виду:

$$\frac{\langle P \rangle}{P_0} = \frac{\cos \theta}{\pi R^2} \int_0^R 2\pi J_0(k\rho \sin \theta) \rho d\rho. \tag{2}$$

Вычислив интеграл, получим:

Таблица 1. Экспериментальные данные измерения скорости УЗВ в воде, хладоне, глицерине при нормальных условиях и частоте $\nu = 3$ МГц, радиусе приемника $R = 0.007$ м

Вещество	$\theta_{\min}$, град	$\sin \theta_{\min}$	β	$c \pm \Delta c$, м/с
Дистиллированная вода	2.45	0.04	3.8	1480 ± 30
Хладон	1.3	0.02	3.8	815 ± 20
глицерин	2.9	0.05	3.8	1850 ± 40

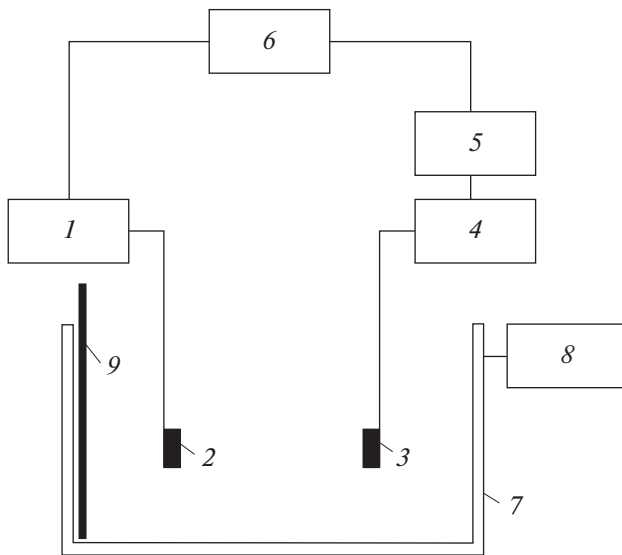


Рис. 3. Блок-схема установки: 1 – генератор, 2, 3 – пьезодатчики, 4 – усилитель, 5 – аттенуатор, 6 – осциллограф, 7 – кювета, 8 – термостат, 9 – термометр.

$$\frac{\langle P \rangle}{P_0} = \cos \theta \frac{2J_0(\beta)}{\beta} = f(k, R, \sin \theta), \quad (3)$$

$$\beta = kR \sin \theta. \quad (4)$$

Используя выражение для β , можно получить:

$$c = \sin \theta_{\min} \frac{2\pi \nu R}{\beta}, \quad (5)$$

ν – частота волны.

Измеряя зависимость $\langle P \rangle / P_0$ от θ , определяем $\theta_{\min}$, при котором $\langle P \rangle / P_0$ достигает минимума. По таблицам $J_0(\beta)$ определяем величину β . Величины ν , R задаются условиями эксперимента. Подставляя эти данные в формулу (5), рассчитываем скорость звука в исследуемой жидкости.

Акустоэлектронный способ измерения скорости ультразвука в жидкостях отрабатывался при измерениях скорости в дистиллированной воде.

На рис. 3 представлена блок-схема установки, на которой измерялась скорость УЗВ в дистиллированной воде, хладоне, глицерине акустоэлектронным методом. В кювету, заполненную исследуемой средой, опускались герметизированные пьезодатчики (2, 3) на любую технологически требуемую глубину. Центры датчиков находились на одной оси, плоскости устанавливались параллельно друг другу. Расстояние между ними выбиралось так, чтобы они были во взаимноперпендикулярных зонах. При частоте 3 МГц и радиусе образца кварца $R = 7$ мм протяженность прожекторной зоны L определялась по формуле $L = R^2 / 2\lambda$ [9] для воды, глицерина, хладона: $L_{\text{в}} = 5 \times 10^{-2}$ м, $L_{\text{г}} = 4 \times 10^{-2}$ м, $L_{\text{х}} = 9 \times 10^{-2}$ м. В этом случае угол

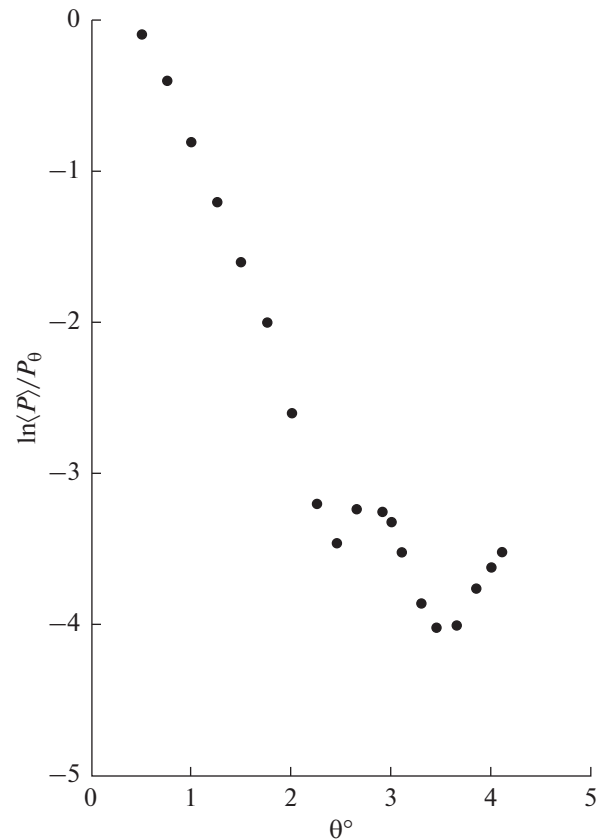


Рис. 4. Зависимость $\ln \langle P \rangle / P_0$ от θ в дистиллированной воде.

между волновым вектором $\mathbf{k}$ распространяющихся волн и нормалью приемника $\theta = 0$, на осциллографе фиксировалась высота амплитуды первого прошедшего импульса, отмечалось показание аттенуатора. Затем приемный кварц начинали вращать вокруг оси, лежащей в его плоскости и делящей его площадь в отношении $S/2$. При вращении приемника его площадь начинала попадать в разнофазовые плоскости УЗВ, возникал набег фаз. Возникали соответствующие изменения высоты импульса. Высоту импульса на экране осциллографа, с помощью аттенуатора, подстраивали до первоначальной величины. По градуировочной кривой аттенуатора находили логарифмические значения величин высот импульсов при повороте приемного кварца, при соответствующих углах θ . Строился график: по оси абсцисс наносились углы поворота приемника, по оси ординат соответствующие логарифмические значения величин высот импульсов. Выбирался шаг угла поворота приемника, позволяющий надежно фиксировать угол первого минимума $\theta_{\min}$.

На рис. 4–6 приведены зависимости $\langle P \rangle / P_0$ от угла θ , области углов первого минимума, полученные при измерении скорости УЗВ в воде, хла-

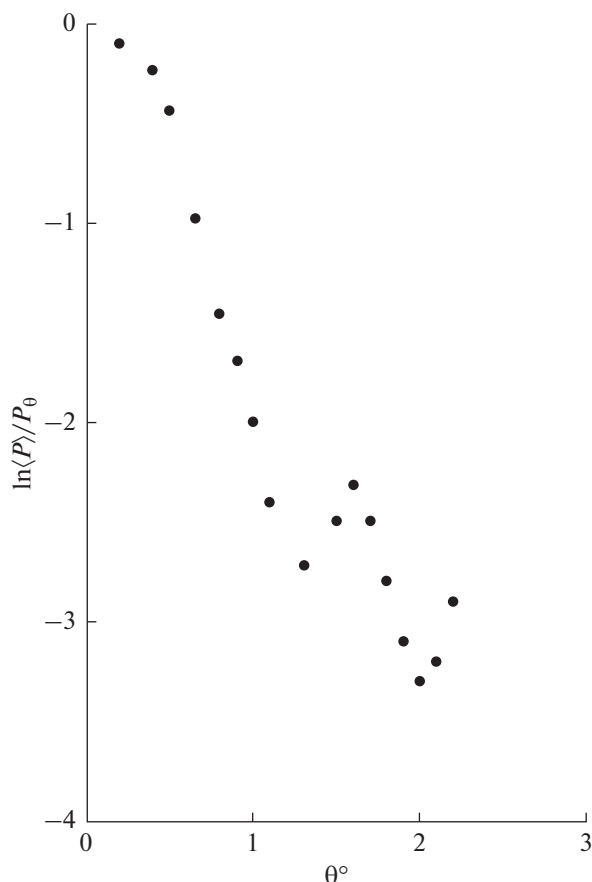


Рис. 5. Зависимость $\ln \langle P \rangle / P_0$ от θ в глицерине.

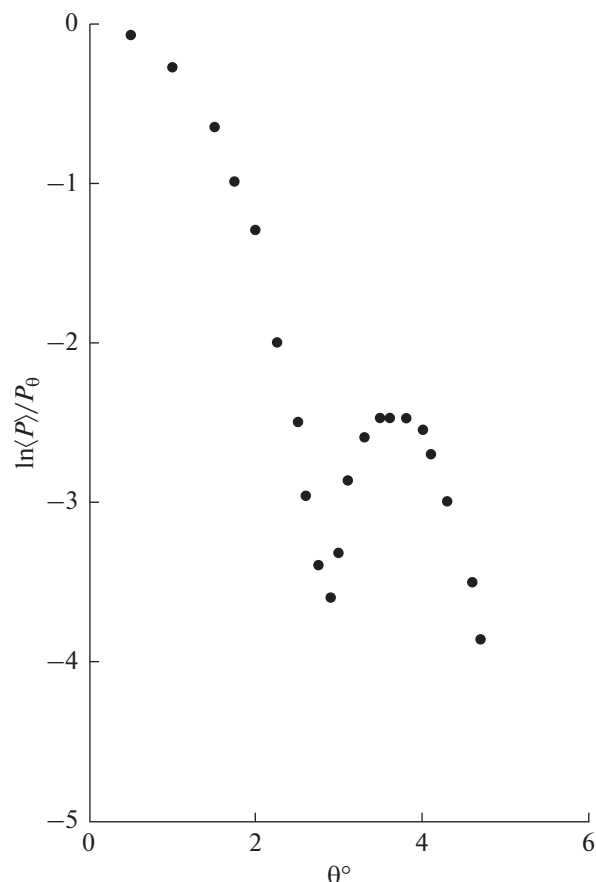


Рис. 6. Зависимость $\ln \langle P \rangle / P_0$ от θ в глицерине.

доне, глицерине при нормальных условиях и частоте $\nu = 3$ МГц, радиусе приемника $R = 0.007$ м. Экспериментальные данные приведены в табл. 1.

Полученные данные удовлетворительно согласовывались с табличными [15]. Основная погрешность измерения скорости УЗВ акустоэлектронным методом определяется погрешностями измерения углов и размеров приемника. В общем случае она лежала в области 1–5%. Изменение угла между направлением распространения волны и нормалью к плоскости приемника осуществлялось вручную. Из рис. 4–6 хорошо видно, как при уменьшении шага изменения угла увеличивается точность определения угла $\theta_{\min}$. Данный метод можно реализовать в автоматическом варианте, предусмотрев максимальные условия для уменьшения погрешности измерения.

Таким образом, в работе рассматривается связь между скоростью УЗВ в исследуемой среде, набегом фаз на поверхности пьезоприемника, величиной импульса как функции от угла между волновым вектором ультразвуковой волны и нормалью к поверхности пьезоприемника.

Акустоэлектронный метод измерения скорости ультразвука, в частности, может быть успешно применен для оперативного контроля температурных, полимеризационных, динамических процессов в полимерных средах, так как малые смещения пьезоприемника в процессе измерения $\theta_{\min}$ не будут вызывать деструкцию в вязкой полимерной среде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела. М.: Мир, 1972. 307 с.
2. Шутилов В.А. Основы физики ультразвука. Л.: Изд-во ЛГУ, 1980. 284 с.
3. Кузнецова И.Е., Зайцев Б.Д., Джоши С.Г., Теплых А.А. Влияние жидкости на характеристики антисимметричных волн Лэмба в тонких пьезоэлектрических пластинах // Акуст. журн. 2007. Т. 53. № 5. С. 637–644.
4. 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.
5. Жогликов В.А., Лебедев Е.В., Ванягин А.В., Дерябин М.С. Способ определения скорости звука в жидких сре-

- дах // RU Патент 2436050 С1. Оpubл. 10.12.2011. Бюл. № 34.
6. Майер А.Е., Погорелко В.В., Яловец А.П. Упругие волны в суспензиях // Акуст. журн. 2011. Т. 57. № 2. С. 153–160.
7. Богданов С.В. Интерференционный акустооптический метод измерения скорости звука // Акуст. журн. 2002. Т. 48. № 4. С. 461–466
8. Кольцова И.С., Михайлов И.Г., Журбенко В.П. Исследование акустического фона приемником конечных размеров // Вестник ЛГУ. 1981. № 16. С. 18–21.
9. Мэзон У. Физическая акустика. М.: Мир, 1966. Т. 1. Гл. 7. С. 501–557.
10. Исакович М.А. Общая акустика. М.: Наука, 1973. 495 с.
11. Кольцова И.С. Распространение ультразвуковых волн в гетерогенных средах. СПб.: СПбГУ, 2007. 245 с.
12. Гуляев Ю.В., Крамер Н.И., Королюк А.П., Рой В.Ф. Акустомагнетоэлектрический эффект // Открытие № 133 от 31 января 1964 г.
13. Гуляев Ю.В., Хикернелл Ф.С. Акустоэлектроника: история, современное состояние и новые идеи для новой эры // Акуст. журн. 2005. Т. 51. № 1. С. 101–110.
14. Янке Е., Эмде Ф., Леш Ф. Специальные функции. Л., М.: Наука, 1977. 342 с.
15. Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М. и др. Физические величины. Справочник // Под. ред. Григорьева И.С., Мейлихова Е.З. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.