



УДК 543.054:547.466

## Импедансная модель функционирования пьезокварцевого сенсора в системе «сенсор–селективное покрытие–жидкая фаза»

Зяблов А.Н., Селеменев В.Ф.

ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный университет», Воронеж

Поступила в редакцию 20.09.2013 г.

### Аннотация

В работе рассмотрена система «пьезоэлектрический сенсор – селективное покрытие – жидкая фаза», основанная на импедансной модели. Показано, что пьезокварцевые сенсоры являются электрохимическими системами чувствительными к акустической нагрузке.

**Ключевые слова:** пьезоэлектрический сенсор, селективное покрытие, вязко-эластичное покрытие, жидкая фаза.

The system «piezoelectric sensor – selective layer – liquid phase», based on impedance model is viewed. It is shown, that piezoquartz sensor are electrochemical systems sensitive to acoustical load

**Keywords:** piezoelectrical sensor, selective covering, viscous-elastic covering, liquid phase

### Введение

Часто пьезорезонансные датчики называют масс-чувствительными или кварцевыми кристаллическими микровесами (ККМ) [1 – 9]. Их действие основано на изменении собственной частоты колебаний кварцевого резонатора от массы вещества, адсорбированного на его поверхности.

Для описания характеристик масс-чувствительных резонаторов используют, как правило, уравнение Sauerbrey, которое было получено в предположении, что присоединяемая масса – твердотельная пленка, обладающая идеально упругими свойствами. На практике часто приходится иметь дело с покрытиями резонатора в виде жидкой фазы. Так в работах [10 – 18] были предприняты попытки оценить влияние жидких и вязко-упругих сред на работу кварцевых резонаторов.

Однако все представленные подходы являются лишь дополнениями к модели Sauerbrey, согласно которой изменение резонансной частоты пьезокварца линейно зависит от приложенной массы. При работе пьезосенсора в жидкости наблюдаются отклонения от линейности, поскольку на датчик оказывают влияние физико-химические свойства растворов (плотность, вязкость, диэлектрическая проницаемость и др.). Таким образом, целью работы было рассмотрение взаимодействий в системе «сенсор – селективное покрытие – жидкая среда».

## Обсуждение результатов

Детектирование веществ в жидкостях можно проводить двумя способами: а) анализируемый раствор наносится микрошприцем на электрод пьезоэлектрического датчика; б) пьезосенсор погружается в анализируемый раствор.

В таблице 1 представлены значения частоты колебаний пьезорезонатора, когда он закреплен горизонтально и на него нанесли микрошприцем воду и когда сенсор погружен в ячейку.

Таблица 1. Зависимость частоты колебаний пьезорезонатора ( $f_{cp}$ ) от объема  $H_2O$

V ( $H_2O$ ) на электроде, мкл	$f_{cp} \pm \Delta$ , Гц	V ( $H_2O$ ) на кварце, мкл	$f_{cp} \pm \Delta$ , Гц	V ( $H_2O$ ) в ячейке, $cm^3$	$f_{cp} \pm \Delta$ , Гц
1	4607835 $\pm$ 6	1	4607706 $\pm$ 1	10	4581278 $\pm$ 7
10	4607324 $\pm$ 9	10	4607133 $\pm$ 8	20	4581280 $\pm$ 2
20	4607070 $\pm$ 5	20	4606993 $\pm$ 5	40	4581274 $\pm$ 9
30	4606947 $\pm$ 5	30	4606967 $\pm$ 2	60	4581276 $\pm$ 3
$f_{cp}$ на воздухе	4607986 $\pm$ 1	$f_{cp}$ на воздухе	4607884 $\pm$ 1	$f_{cp}$ на воздухе	4583680 $\pm$ 1

Как видно из таблицы увеличение объема пробы, наносимой на поверхность электрода, приводит к уменьшению частоты колебаний пьезорезонатора. В этом случае правомочно утверждать, что пьезорезонатор – это масс-чувствительный сенсор, поскольку масса это отношение веса тела (сила воздействия тела на опору, возникающая в поле сил тяжести) к ускорению свободного падения в данной точке. При погружении сенсора в ячейку с различным объемом воды уменьшения частоты не наблюдается.

Поэтому актуальным является рассмотрение принципа работы пьезорезонатора погруженного в жидкость. Существуют различные подходы к рассмотрению работы пьезокварцевых сенсоров. В данной работе остановимся на одном из них, который учитывает комплексное акустическое сопротивление (импеданс) системы в воздушной среде [19 – 20], в жидкостях [21 – 26], в «смешанных» средах (пленка–жидкость) [27 – 29]. В большинстве публикаций рассмотрены частные случаи, и лишь незначительное количество работ посвящено оценке всей системы «сенсор – селективное покрытие – анализируемая среда». Однако в этих работах есть допущения ограничивающие использование предлагаемых моделей. В частности считается, что активная составляющая комплексного сопротивления является доминирующей; среда, контактирующая с резонатором вязкая или вязко-эластичная; не учитываются свойства жидкости и т.д.

Поэтому актуальным является рассмотрение пьезорезонатора как электроакустического устройства – активного элемента системы «сенсор – селективное покрытие – анализируемая среда».

Как известно, пьезокварцевый резонатор, включенный в электрическую цепь, совершает механические колебания, приводящие к распространению звуковой волны. В результате чего в веществе возникает череда механических деформаций растяжения–сжатия и сдвига, что приводит к появлению переменного звукового давления  $p_a$  и смещению частиц вблизи точки покоя с колебательной скоростью  $v$ .

Отношение звукового давления к колебательной скорости частиц среды называют волновым акустическим сопротивлением  $Z_a$  [30]. Для безграничной среды оно является действительной величиной, а в случае сред с потерями – имеет комплексный вид.

$$Z_a = \operatorname{Re} Z_a + j \operatorname{Im} Z_a; \quad j = \sqrt{-1} \quad (1)$$

где  $\operatorname{Re} Z_a$  – действительная часть или активное акустическое сопротивление;  $\operatorname{Im} Z_a$  – мнимая часть или реактивное акустическое сопротивление.

Акустическое комплексное сопротивление  $Z_a$  изменяется в широких пределах в зависимости от конструкции пьезовибратора (его рабочей частоты, типа излучаемых волн) и свойств среды (ее состава, температуры, давления). Средой, с которой акустически связан резонатор, может являться газ, жидкость или твердое тело [31, 32].

Большинство выпускаемых промышленностью резонаторов, возбуждаются при последовательном резонансе, поэтому импеданс вибратора может быть записан как

$$Z_q = R_q + jX_q = R_q + j \left( \omega L_q - \frac{1}{\omega C_q} \right) \quad (2)$$

где  $R_q$  и  $X_q$  – активное и реактивное сопротивления, соответственно [33, 34].

Реактивные параметры  $L_q$  и  $C_q$  определяются упругими, диэлектрическими и пьезоэлектрическими коэффициентами, а также плотностью пьезоматериала. Значения этих параметров существенно зависят от среза (ориентации) пьезоэлемента, вида и частоты возбуждаемых механических колебаний, размеров пьезоэлемента и электродов.

Активное сопротивление  $R_q$  во многом определяется конструкцией резонатора и технологией его изготовления и характеризует не только потери на трение в колеблющейся пьезопластине  $r_0$ , но и на излучение колебаний в окружающую среду.

При этом любая среда (твердая, жидкая, газообразная) оказывает сопротивление внешнему воздействию и в ней возникают реактивные силы (силы противодействия), обусловленные массой, упругостью, трением. Поэтому это сопротивление – сопротивление излучению выражают в комплексной форме

$$Z_R = r_R + jx_R = \rho c S (r'_R + j x'_R) \quad (3)$$

где  $S$  – площадь излучателя;  $\rho c$  – волновое или удельное акустическое сопротивление среды;  $r'_R$ ,  $x'_R$  – соответственно безразмерные удельные коэффициенты активного и реактивного сопротивлений, отнесенные к единице поверхности источника и к среде с единичным удельным акустическим сопротивлением.

При колебаниях вибратора в движение вовлекается некоторый объем окружающей его среды, что оказывается эквивалентным утяжелению вибратора дополнительной, осциллирующей с ним присоединенной массой (соколеблющейся массой). В известной мере эффект аналогичен эффекту масс-чувствительности. Однако имеется принципиальная особенность: масс-чувствительный резонатор удерживает дополнительную присоединенную массу и в отсутствие колебаний [35 39 41 – 45]. Величина соколеблющейся массы будет равна: для случая когда одна поверхность закрыта и не излучает (например, закрыта звуконепропускаемым

капсюлем)  $m_R = 2 \rho r^3$  и для случая, когда обе поверхности поршня открыты и

излучают  $m_R = \frac{4}{3} \rho r^3$

где  $\rho$  – плотность среды;  $r$  – радиус поршня.

Не смотря на то, что в уравнение сопротивление излучению (3) входит акустическое сопротивление, необходимо рассмотреть свойства самой среды и процессы, протекающие в ней при прохождении ультразвука.

При распространении акустических волн в жидкостях, газах и твердых телах происходят необратимые потери энергии, что связано с вязкостью и теплопроводностью упругих сред. В этом случае импеданс имеет комплексный вид

$$Z_{\text{medium}} = R_{\text{medium}} + jX_{\text{medium}} \quad (4)$$

При распространении волн в реальных средах происходит уменьшение амплитуды колебаний частиц в волне, что может быть вызвано, в частности, затуханием. Коэффициент затухания представляет собой сумму коэффициентов поглощения и рассеяния:

$$\alpha = \alpha_a + \alpha_d, \quad (5)$$

где  $\alpha_a$  – коэффициент поглощения;  $\alpha_d$  – коэффициент рассеяния. Коэффициент  $\alpha$  определяется как величина, обратная расстоянию, на котором амплитуда звуковой волны уменьшается в  $e = 2,718$  раз.

При рассеянии энергия не трансформируется, а уходит из направленно распространяющейся волны в результате многократных отражений. В гомогенных газах и жидкостях рассеяние отсутствует, а затухание определяется только поглощением, которое пропорционально квадрату частоты [40].

Основной причиной поглощения акустических волн является сила вязкого сопротивления между соседними частицами среды, обладающими различными скоростями. Возникает это из-за влияния внутреннего трения, действующего на частицы среды, в которой распространяется акустическая волна [31, 41 – 43].

В жидкостях поглощение происходит в основном за счет внутреннего трения, поэтому потерями на теплопроводность можно пренебречь [40, 44 – 46]. В этом случае *действительную часть* акустического сопротивления среды можно представить

$$R_{\text{medium}} = R_{\text{liquid}} = \frac{2}{3} \frac{\omega^2}{\alpha c^2} \eta, \quad (6)$$

где  $\alpha$  – коэффициент поглощения звуковой волны;  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота;  $c$  – скорость звука;  $\rho$  – плотность;  $\eta$  – вязкость среды.

*Мнимая часть* акустического сопротивления среды имеет вид

$$X_{\text{medium}} = X_{\text{liquid}} = j\left(\omega m_a - \frac{s_a}{\omega}\right) \quad (7)$$

где  $m_a$  – акустическая масса;  $s_a$  – акустическая упругость.

$$m_a = \frac{\rho h}{S} \quad ; \quad \frac{1}{s_a} = c_a = \frac{V}{\rho c^2 S^2}$$

где  $\rho$  – плотность среды;  $S$  – площадь излучателя;  $h$  – толщина слоя среды;  $c_a$  – акустическая гибкость;  $c$  – скорость света в среде;  $V$  – объем среды, с которой контактирует излучатель.

Поскольку *действительная часть*  $\text{Re}Z_a$  акустического сопротивления связана с диссипацией энергии в самом резонаторе и с затратами энергии на излучение звука, то ее можно представить как импеданс кварца  $Z_q$ . *Мнимая часть* акустической системы обусловлена реакцией сил инерции (масс) или сил упругости, т.е. характеризует сопротивление излучению, связана с диссипацией энергии в среде и,

следовательно, ее можно представить как сумму комплексного сопротивления излучению  $Z_R$  и импеданса среды  $Z_{\text{medium}}$ .

Следует отметить, что в химическом анализе пьезорезонатор может работать не только в системе «пьезорезонатор – среда», когда он непосредственно контактирует с жидкостью или газом (рис. 1. а, б), но и в системе «пьезорезонатор – селективное покрытие – среда», когда электроды резонатора модифицированы материалом химической или биологической природы (рис. 1. в).

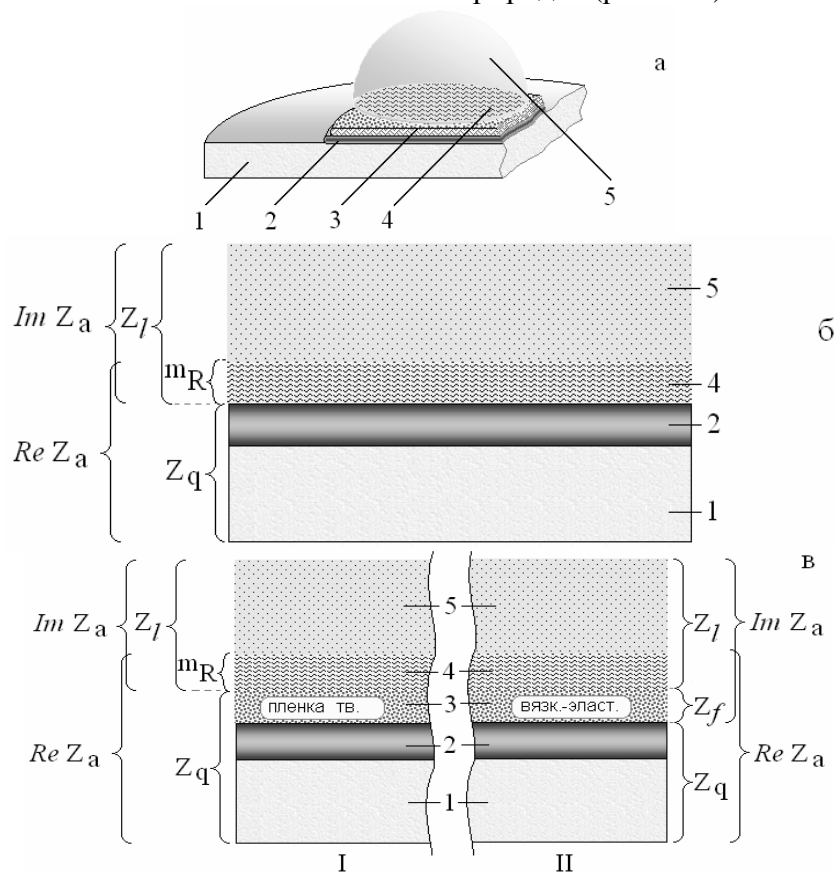


Рис. 1. Пьезокварцевый резонатор с прилегающими средами  
а – пьезорезонатор в разрезе (общий вид); б – пьезорезонатор в контакте с жидкой фазой; в – пьезорезонатор с селективным покрытием и жидкой фазой (I – пленка твердая; II – пленка вязко-эластичная);

1 – пьезокварц; 2 – электрод; 3 – селективное покрытие на электроде;  
4 – пограничный слой, колеблющийся одновременно с резонатором;  
5 – жидкая фаза

$Z_l$  – импеданс жидкости,  $Z_f$  – импеданс селективного покрытия,  $Z_q$  – импеданс кварца,  $Re Z_a$  – активное акустическое сопротивление системы,  $Im Z_a$  – реактивное акустическое сопротивление системы,  $m_R$  – соколеблющаяся масса.

Эти системы можно представить в виде моделей многослойных структур (Рис.1). Для любой из них резонатор, находясь в контакте с жидкостью и совершая колебания сдвига по толщине, приводит к движению слою жидкости вблизи поверхности пьезоэлемента [47]. В результате вблизи поверхности, вследствие действия сил вязкости в ламинарном подслое, образуется тонкий слой заторможенной жидкости, в пределах которого скорость изменяется от нуля на поверхности тела до скорости невозмущенного потока (вдали от тела) [48]. Этот слой «заторможенной» жидкости действует как нагружающая масса

(присоединенная масса), наличие которой приводит к понижению собственной частоты погруженного в жидкость излучателя по сравнению с его частотой при колебаниях в воздухе.

Наряду с инерционным сопротивлением, обусловленным присоединенной массой, пристеночный вязкий слой создает активное сопротивление, приблизительно равное удельному волновому сопротивлению стоксовских волн (поперечных волн), умноженному на радиус излучателя. В комплексной форме имеет вид

$$Z_{\delta} = R_{\delta} + jX_{\delta}$$

$$R_{\delta} = \rho c' h S \left(1 + \frac{2\delta}{r}\right); \quad X_{\delta} = \omega \rho h S \left(1 + \frac{\delta}{r}\right); \quad (8)$$

где  $\rho$  – плотность раствора;  $h$  – расстояние от резонатора до стенки кюветы или высота капли на электроде резонатора;  $S$  – площадь излучателя;  $r$  – радиус резонатора;  $\delta$  – толщина пограничного слоя, рассчитывается по уравнению 3.5;  $c'$  – фазовая скорость стоксовских волн

$$c' = \sqrt{\frac{2\eta\omega}{\rho}}; \quad \omega = 2\pi f; \quad (9)$$

Формула 8 верна для отношений  $\delta/r < 0.1$ , в противном случае это сопротивление не играет существенной роли [31].

Если пьезорезонатор имеет селективное покрытие, то для описания работы пьезокварцевых резонаторов необходимо учитывать акустическое сопротивление присоединяемой к вибратору пленки.

Так при колебании пьезорезонатора (сдвиг по толщине) жесткая пленка, закрепленная на поверхности электрода, движется одновременно с ним не деформируясь. Поэтому полимерные пленки следует рассматривать как неотъемлемую часть электродов вибратора, а приращение толщины необходимо учитывать при оценке импеданса резонатора, как инерционную составляющую реактивного сопротивления.

Если селективное покрытие вязко-эластичное, то при колебании резонатора частицы пленки смещаются параллельно поверхности электрода не одновременно с плоскостью сдвига, а запаздывая относительно нее. Такой запаздывающий переход колебания от одной частицы пленки к другой обусловлен наличием у материала упругости и массы и, следовательно, характеризуется комплексным сопротивлением  $Z_f$ . Импеданс среды при этом складывается из импедансов пленки  $Z_f$  и жидкости  $Z_l$ .

Сопротивление излучения  $Z_R$  учитывает реакцию всех сред если на пьезорезонаторе вязко-эластичная пленка и если пленка твердая, то учитывает только влияние жидкости.

Поэтому, полное акустическое сопротивление

$Z_a = Re Z_a + j Im Z_a$  системы «пьезорезонатор – селективное покрытие – среда» можно представить в виде схемы (рис. 2).

Следует отметить, что при описании представленных систем не учитывается молекулярное строение среды, она рассматривается как сплошная, т.е. непрерывно распределенная в пространстве и обладающая упругими свойствами.

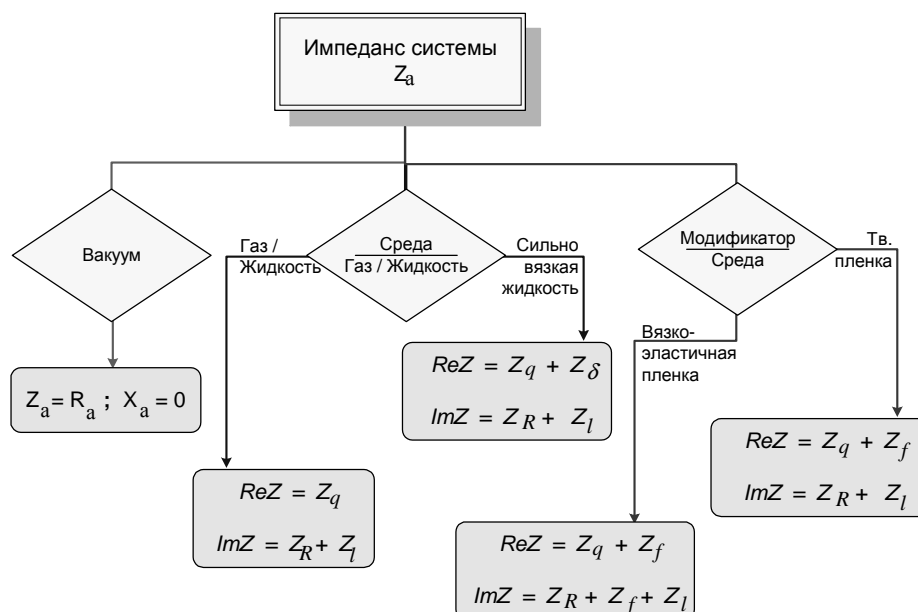


Рис. 2. Полное акустическое сопротивление системы

Таким образом, наиболее перспективным представляется рассмотрение системы «сенсор – селективное покрытие – анализируемая среда» с помощью импедансной модели, учитывающей свойства среды, свойства селективного материала и взаимосвязь между ними.

На основании рассмотренной импедансной модели целесообразно пьезокварцевые сенсоры называть пьезоэлектрические сенсоры чувствительные к акустической нагрузке, эквивалентной приложенной массе.

*Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы  
Grant-00020/8/711/2012-1.2.1-12-000-1003-036.*

## Список литературы

1. Xing Wan-Li, He Xi-Wen. Crown ether-coated piezoelectric crystal sensor array for detection of organic vapor mixtures using several chemometric methods // *Analyst.* – 1997. Vol. 122. № 6. P. 587.
2. Коренман Я.И., Кочетова Ж.Ю., Кучменко Т.А. Применение пьезокварцевых микровесов для определения фенола и его нитропроизводных в воздухе // *Журнал прикладной химии.* 2001. Т. 74. № 9. С. 1473.
3. Смагина Н.Н., Коренман Я.И., Кучменко Т.А. Микровзвешивание паров уксусной кислоты // *Сенсор.* 2005. №2. С. 31.
4. Светолунова С.Е., Мельникова Е.И., Коренман Я.И., Нифталиев С.И. Сенсорометрический анализ индивидуальных компонентов молочной сыворотки // *Сенсор.* 2004. №4. С. 38.
5. Коренман Я.И., Кучменко Т.А. Подходы к анализу пищевых продуктов. Разработка масс-чувствительных сенсоров // *Российский химический журнал.* – 2002. Т. XLVI. № 4. С. 34.
6. Schierbaum K.D., Gerlach A., Haug M., Göpel W. Selective detection of organic molecules with polymers and supramolecular compounds: application of capacitance,

quartz microbalance and calorimetric transducers // *Sensors and Actuators A : Physical*. 1992. Vol. 31. № 1–3. P. 130.

7. Hauptmann P., Lucklum R., Hartmann J., Auge J., Adler B. Using the quartz microbalance principle for sensing mass changes and damping properties // *Sensors and Actuators A : Physical*. 1993. Vol. 37–38. P. 309.

8. Mecea V.M., Carlsson J.O., Bucur R.V. Extensions of the quartz-crystal-microbalance technique // *Sensors and Actuators A : Physical*. 1996. Vol. 53. № 1–3. P. 371.

9. Mecea V.M. Is quartz crystal microbalance really a mass sensor? // *Sensors and Actuators A*. 2006. Vol. 128. № 2. P. 270.

10. Nomura T. Single-drop method for determination of cyanide in solution with a piezoelectric quartz crystal // *Analytica Chimica Acta*. 1981. Vol. 124. № 1. P. 81.

11. Nomura T., Okuhara M. Frequency shifts of piezoelectric quartz crystals immersed in organic liquids // *Analytica Chimica Acta*. 1982. Vol. 142. № 3. P. 281.

12. S.-Z. Yao, T.-A. Zhou. Dependence of the oscillation frequency of a piezoelectric crystal on the physical parameters of liquids // *Analytica Chimica Acta*. 1988. Vol. 212. №1. P. 61.

13. Shen D.Z., Zhu W.H., Nie L.H., Yao S.Z. Behaviour of a series piezoelectric sensor in electrolyte solution // *Analytica Chimica Acta*. 1993. Vol. 276. № 1. P. 87.

14. Lin Z., Ward M.D. The role of longitudinal waves in quartz crystal microbalance applications in liquids // *Analytical Chemistry*. 1995. Vol. 67. № 4. P. 685.

15. Lucklum R., Behling C., Hauptmann P. Role of mass accumulation and viscoelastic film properties for the response of acoustic-wave-based chemical sensors // *Analytical Chemistry*. 1999. Vol. 71. № 13. P. 2488.

16. Lucklum R., Hauptmann P. The quartz crystal microbalance: mass sensitivity, viscoelasticity and acoustic amplification // *Sensors and Actuators B*. 2000. Vol. 70. № 1. P. 30.

17. F. Nelson Nunalee, Kenneth R. Shull. Quartz crystal microbalance studies of polymer gels and solutions in liquid environments // *Analytical Chemistry*. 2006. Vol. 78. № 4. P. 1158.

18. Bruckenstem S., Shay M. Experimental aspects of use of the quartz crystal microbalance in solution // *Electrochimica Acta*. 1985. Vol. 30, № 10. P. 1295.

19. Kanazawa K., Nam-Joon Cho Quartz crystal microbalance as a sensor to characterize macromolecular assembly dynamics // *Journal of Sensors*. 2009. Vol. 2009. P. 1.

20. Svilainis L., Motiejūnas G. Power amplifier for ultrasonic transducer excitation // *Ultragarsas*. 2006. Vol. 58. № 1. P. 30.

21. Muramatsu H., Tamiya E., Karube I. Computation of equivalent circuit parameters of quartz crystals in contact with liquids and study of liquid properties // *Analytical Chemistry*. 1988. Vol. 60. № 19. P. 2142.

22. Rodahl M., Höök F., Kasemo B. QCM operation in liquids: an explanation of measured variations in frequency and q factor with liquid conductivity // *Analytical Chemistry*. – 1996. Vol. 68. № 13. P. 2219.

23. Jouko Kankare, Kari Loikas, Mikko Salomäki. Method for measuring the losses and loading of a quartz crystal microbalance // *Analytical Chemistry*. 2006. Vol. 78. № 6. P. 1875.

24. Duncan-Hewitt W.C., Thompson M. Four-layer theory for the acoustic shear wave sensor in liquids incorporating interfacial slip and liquid structure // *Analytical Chemistry*. 1992. Vol. 64. № 1. P. 94.

25. Martin S.J., Spates J.J., Wessendorf K.O., Schneider T.W., Huber R. J. Resonator/oscillator response to liquid loading // *Analytical Chemistry*. 1997. Vol. 69. № 11. P. 2050.



26. Mengsu Yang, Michael Thompson. Multiple chemical information from the thickness shear mode acoustic wave sensor in the liquid phase // *Analytical Chemistry*. 1993. Vol. 65. № 9. P. 1158.
27. Seok-Won Lee, Hinsberg W. D., Kanazawa K.K. Determination of the viscoelastic properties of polymer films using a compensated phase-locked oscillator circuit // *Analytical Chemistry*. 2002. Vol. 74. № 1. P. 125.
28. Gamby J., Lazerges M., Girault H.N., Deslouis C., Gabrielli C., Perrot H., Tribollet B. Electroacoustic polymer microchip as an alternative to quartz crystal microbalance for biosensor development // *Analytical Chemistry*. 2008. Vol. 80. № 23. P. 8900.
29. Rupa Patel, Rongnong Zhou, Kristofer Zinszer, Fabien Josse. Real-time detection of organic compounds in liquid environments using polymer-coated thickness shear mode quartz resonators // *Analytical Chemistry*. 2000. Vol. 72. № 20. P. 4888.
30. Голямина И.П. Ультразвук : маленькая энциклопедия. М.: Изд-во «Советская энциклопедия», 1979. 400 с.
31. Лепендин Л.Ф. Акустика. – М.: Вш, 1978. 448 с.
32. Красильников В.А. Введение в акустику. – М.: Изд-во МГУ, 1992. 152 с.
33. Справочник по кварцевым резонаторам / В.Г. Андросова, В.Н. Банков, А.Н. Дикиджи [и др.]; под ред. П.Г. Позднякова. М.: Связь, 1978. 288 с.
34. Глюкман Л.И. Пьезоэлектрические кварцевые резонаторы. М.: Радио и связь, 1981. 232 с.
35. Звук / Г. Чедд ; пер. с англ. Г.И. Кузнецова ; под ред. С.Б. Гуревича. М.: Мир, 1975. 206 с.
36. Римский-Корсаков А.В. Электроакустика. М.: Связь, 1973. 272 с.
37. Фурдуев В.В. Электроакустика. М.–Л.: Изд-во Технико-теоретичой литературы, 1948. 515 с.
38. Шарапов В.М. Пьезоэлектрические датчики. М.: Техносфера, 2006. 632 с.
39. Иофе В.К., Лизунков М.В. Бытовые акустические системы. М.: Радио и связь, 1984. 96 с.
40. Мэзон У. Пьезоэлектрические кристаллы и их применения в ультразвуке / Пер. с англ. ; под ред. А.В. Шубникова, С.И. Ржевкина. М.: ИЛ, 1952. 447 с.
41. Альтшуллер Г.Б. Кварцевая стабилизация частоты. М.: Связь, 1974. 272 с.
42. Пейн Г. Физика колебаний и волн / пер. с англ. А.А. Колоколова ; под ред. Г.В. Скроцкого. М.: Мир, 1979. 389 с.
43. Крылов В.В. Основы теории излучения и рассеяния звука. М.: МГУ, 1989. 118 с.
44. Михайлов И.Г., Гуревин С.Б. Поглощение ультразвуковых волн в жидкостях // *Успехи физических наук*, 1948. Т. XXXV. Вып. 1. С. 1.
45. Бреховских Л.М., Годин О.А. Акустика слоистых сред. М.: Наука, 1989. 416 с.
46. Шендеров Е.Л. Излучение и рассеяние звука. Л.: Судостроение, 1989. 304 с.
47. Kanazawa K.K., Gordon J.G. II Frequency of a quartz microbalance in contact with liquid // *Analytica Chimica Acta*. 1985. Vol. 57. P. 1770.
48. Малкин А.Я., Исаев А.И. Реология : концепции, методы, приложения. С-Пб: Профессия, 2007. 560 с.

---

**Зяблов Александр Николаевич** – к.х.н., доцент кафедры аналитической химии ВГУ; Воронеж, тел. +7(473)220-89-32

**Селеменев Владимир Федорович** – д.х.н., проф. заведующий кафедрой аналитической химии ВГУ; Воронеж, тел.: +7(473)220-83-62

**Zyablov Alexander N.** – assistant professor Chair of Analytical Chemistry Voronezh State University; Voronezh

**Selemenev Vladimir F.** – professor, head of Department of Analytical Chemistry, Voronezh State University, Voronezh