

## ОСНОВЫ ПРИБОРОВ И УСТРОЙСТВ

УДК 53.082.4

ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ  
ВИБРАЦИОННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ  
ПЛОТНОСТИ ВЯЗКИХ ЖИДКОСТЕЙ

© Авторы, 2020

doi: 10.25210/jfor-2003-046051

**Зацерклянный О. В.** — инженер, НКТБ «Пьезоприбор» лаборатория 2.6, Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону. E-mail: ZaOleg2003@rambler.ru**Панич А. Е.** — д.т.н., директор-главный конструктор НКТБ «Пьезоприбор», Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону. E-mail: aepanich@yandex.ru**Аннотация**

Описаны физические принципы и требования к системе возбуждения и измерения параметров колебаний вибропреобразователя плотномера вязких жидкостей. Представлены критерии выбора оптимальных пьезоматериалов для применения в вибропреобразователях плотности вязких сред. Представлены экспериментальные данные, подтверждающие оптимальность выбора пьезоматериалов.

**Ключевые слова:** вибропреобразователь, плотномер, пьезокерамические материалы, актюаторы, пьезоэлектрические датчики механических величин, пьезомодуль, пьезоэлектрические коэффициенты

**Abstract**

Described were physical principles and requirements for a system of excitation and measurement of fluctuation parameters of a vibration transducer of a viscous liquids density meter. Criteria of determination for the optimal piezomaterials utilized in vibrations transducers of viscous environments were presented. Experimental evidence confirming optimality of choosing piezomaterials was introduced.

**Keywords:** vibration transducer, density meter, piezoceramic materials, actuator, piezoelectric sensor of mechanic quantities, piezomodulus, piezoelectric coefficients

**Введение**

В вибрационных плотномерах плотность жидкости или газа определяется по частоте колебаний механического резонатора, взаимодействующего с измеряемой средой. Резонаторы, или вибрационные преобразователи плотности (ВПП), разделяют по способу взаимодействия со средой на проточные и погружные. В проточных ВПП жидкость или газ протекают внутри резонатора и участвуют в колебаниях как инертная масса. В погружных ВПП резонатор помещают в контролируемую среду, действие которой подобно действию некоторой «присоединённой массы», связанной с резонатором и увлекаемой им в колебательное движение [1]. Величина присоединённой массы зависит от плотности вещества, поэтому девиация частоты резонансных колебаний является параметром, по которому определяется плотность. Существенным параметром жидкости, влияющим на работу ВПП, является вязкость. Потери энергии колебаний ВПП в вязкой жидкости приводят к существенной деформации АЧХ и значительному уменьшению (до двух порядков) отношения сигнал/шум. Целью данной работы является максимальное повышение эффективности ВПП в средах с высокой вязкостью за счёт улучшения системы возбуждения и измерения параметров колебаний.

**Определение задачи**

Для практического определения влияния вязкости на погрешность плотномера проведены испытания ВПП, разработанного в НКТБ «Пьезоприбор» г. Ростов-на-Дону, ОКР «Интроскопия» (рис. 1).

В представленной конструкции пакет пьезопреобразователей ВПП состоит из пьезоактюатора 5, составленного из четырёх пьезоэлементов и пьезодатчика 4 из двух пьезоэлементов. Пьезоэлементы отделены изоляторами 7 друг от друга и от корпуса 2. Пьезоэлементы с изоляторами зажаты между шайбой 3, опирающейся на мембрану 2, и металлической накладкой 8 при помощи гайки [2]. Передача электрических сигналов осуществляется по проводам 6.

Испытания проводились в жидкостях с номинальными значениями вязкости, равномерно распределёнными в диапазоне от 1 до 1000 сПз. Для выделения вязкости, как единственного влияющего параметра, измерения проводились при температуре  $20 \pm 0.02$  °С с использованием жидкостей близких по значению плотности. Измерялись фазочастотные характеристики, амплитуда и период колебаний на резонансе, а также добротность вибропреобразователя, как параметр, применяемый для определения вязкости жидкостей. На рис. 2 представлены фазочастотные характеристики камертонного преобразователя в средах с различной вязкостью.

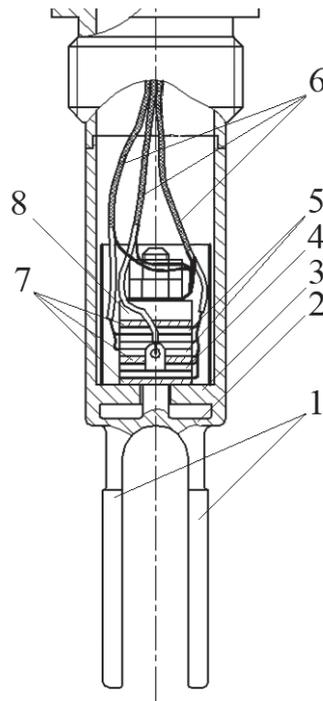


Рис. 1. Схема камертонного вибропреобразователя плотности среды.

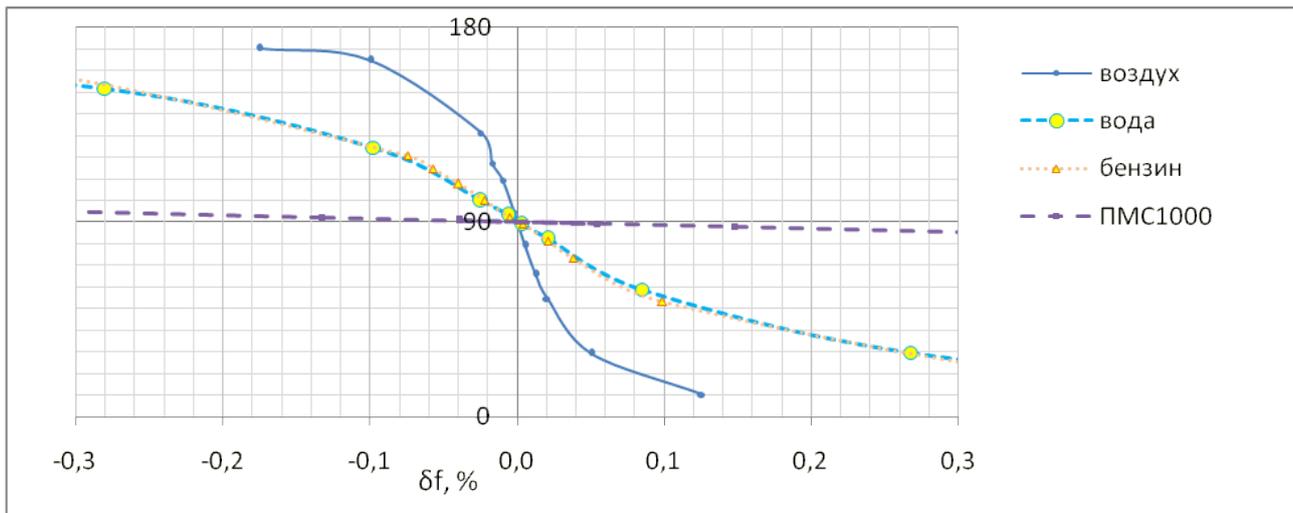


Рис. 2. Фазочастотные характеристики ВПП.

Видно, что для адекватного преобразования частоты колебаний камертона в значение измеряемой плотности необходимо обеспечить возбуждение при постоянном сдвиге фаз  $\varphi$  равном  $90^\circ$ . Только в этом случае частота однозначно зависит только от присоединённой массы и не зависит от добротности колебательной системы.

В табл. 1 приведены измеренные значения плотности жидкостей, а также добротности и амплитуды колебаний ВПП в измеряемых средах с вязкостью от 1 до 1000 сПз.

Из приведённых данных, видно, что наибольшее воздействие вязкость оказывает на амплитуду колебаний ВПП и его добротность. Добротность уменьшается в 140 раз, а амплитуда почти в 30. Уменьшение добротности ВПП приводит к ужесточению требований к точности поддерживаемой разности фаз, а уменьшение амплитуды полезного сигнала увеличивает погрешность определения фазового сдвига между сигналом возбуждения и обратной связи. Одним из способов разрешения этого противоречия является увеличение эффективности системы возбуждения колебаний и измерения их параметров. В представленной выше конструкции колебательная система выполнена на основе пьезоэлектрических элементов, что является наиболее целесообразным решением для ВПП погружного типа и даёт дополнительные возможности по повышению эффективности за счёт применения пьезокерамических материалов (ПКМ) со специально подобранными параметрами.

Таблица 1. Параметры колебаний ВПП и значения измеренной плотности

Наименование	$\mu$ , сПз	$\rho_z$ , кг/м <sup>3</sup>	$Q$	$V$ , мВ	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\Delta$ , кг/м <sup>3</sup>
Воздух	0.02	1.12	2517.0	2530	1.10	0.0
Вода	1.00	998.2	488.5	1818	998.2	0.0
ПМС-5	4.98	917.0	241.7	927	916.9	0.1
ПМС-20	19.31	951.9	131.9	514	951.9	0.0
ПМС-50	52.69	963.2	79.7	323	963.3	0.1
Масло И-20	62.23	832.5	73.2	298	832.6	0.1
ПМС-100	98.261	967.6	58.1	243	967.7	0.1
ПМС-150	152.25	969.6	46.7	203	969.7	0.1
ПМС-200	202.39	970.6	40.5	180	970.8	0.2
ПМС-500	508.35	973.1	25.5	115	973.8	0.7
ПМС-1000	1012.53	975.2	18.1	87	978.0	2.8

### Выбор пьезоматериалов

Рассмотрим основные параметры пьезокерамических материалов, в наибольшей степени определяющие характеристики пьезопреобразователей:

- пьезомодули  $d_{ij}$  непосредственно влияющие на значение амплитуды перемещения пьезоактюатора и коэффициента преобразования по заряду пьезодатчика;
- относительная диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon_{ij}$ , а отношение  $d_{ij} / \varepsilon_{ij}$  непосредственно влияет на значение генерируемого напряжения;
- пьезоэлектрические коэффициенты  $g_{ij} = d_{ij} / \varepsilon_{ij} \varepsilon_0$ , где  $\varepsilon_0 = 8.84 \cdot 10^{12} \text{ Ф} \cdot \text{м}^{-1}$  — диэлектрическая проницаемость вакуума, которая определяется как напряжённость электрического поля между электродами пьезоэлектрического элемента при разомкнутой цепи, вызванная действующей силой;
- температура фазового перехода (точка Кюри,  $T_c$ ), от значения которой зависит предельно допустимая рабочая температура ПКМ;
- показатель эффективности  $G_T = g_{ij} T_c$ , который учитывает роль значений пьезомодуля  $d_{ij}$  и диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_{ij} \varepsilon_0$  в формировании выходного сигнала преобразователя, а также предельную рабочую температуру [3,4].

Целесообразно проводить подбор ПКМ, разделив температурный диапазон на поддиапазоны, ориентируясь на требования измеряемой среды. С ростом температуры вязкость большинства известных жидкостей стремительно уменьшается, поэтому представляется возможным установить верхнюю границу рабочих температур для вязких сред на уровне 85°C. Это хорошо согласуется с требованиями промышленного диапазона температур с учётом северных территорий России (-70 ÷ 85°C), в котором представлен широкий спектр нефтей и нефтепродуктов, пищевых продуктов, различных жидкостей в химических производствах и т.п.

Как видно из табл. 1, для изготовления актюаторов и пьезодатчиков в этом температурном поддиапазоне можно применять любые ПКМ. В этом случае, основным ориентиром для выбора материала актюатора является пьезомодуль, в нашем случае это  $d_{33}$

$$\Delta l = N d_{33} E l, \quad (1)$$

где  $\Delta l$  — удлинение, м;  $N$  — количество активных слоёв в актюаторе;  $E$  — напряжённость электрического поля;  $l$  — длина пьезоактюатора.

Из соотношения (1) следует, что максимальное удлинение пьезоактюатора пакетного типа зависит от пьезомодуля и напряжённости поля. При имеющихся схемотехнических ограничениях напряжения сигнала возбуждения колебаний, увеличить действующую напряжённость электрического поля можно только уменьшив толщину пьезоэлементов в пакете. Исходя из близости технологических возможностей при изготовлении пьезоэлементов из существующих ПКМ, основной выигрыш можно получить выбором материала с максимальным пьезомодулем  $d_{33}$ . Для температурного диапазона до 85 оС можно рекомендовать такие материалы, как ЦТС-49/80 и ЦТС-ЦННФ. Эти материалы также имеют максимальное значение показателя

$$K_w d_{33}^2 / \varepsilon_{33}, \quad (2)$$

поэтому они подходят и для чувствительных элементов датчиков обратной связи при регистрации электрического заряда на выходе. При регистрации электрического напряжения наилучшим вариантом можно считать ПКМ ЦТС-19П и ЦТС-36; они также имеют высокий показатель  $K_w$ , но при максимальных значениях пьезокоэффициента  $g_{33}$ .

**Таблица 2.** Рекомендуемые ПКМ для использования в различных температурных условиях эксплуатации [5]

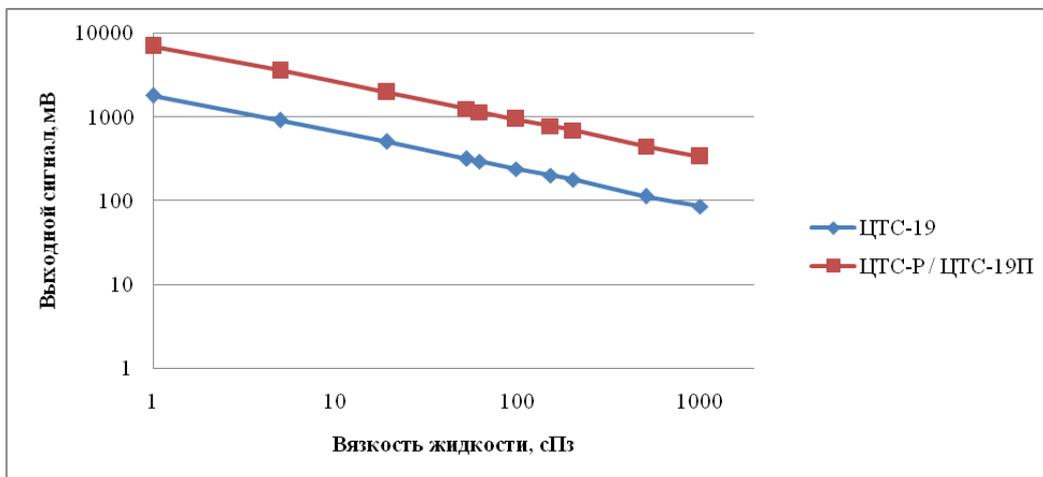
Температурные условия эксплуатации ПДМВ	Тип электрического сигнала на выходе ПДМВ					
	Заряд			Напряжение		
	ПКМ	$T_{max}, ^\circ\text{C}$	$K_3 / K_{3-19}$	ПКМ	$T_{max}, ^\circ\text{C}$	$K_H / K_{H-19}$
Нормальные температуры: до 70... 100 °С	ЦТС-ЦННФ	100	2.5	ЦТС-19П	150	2.2
	ПКР-7М	70	2.4			
Средние температуры: до 110...160 °С	ЦЛС-49/80	120	2.3	ЦТС-19М1	180	1.2
	ПКР-7	110	1.8	ЦТС-19М	150	1.2
	ЦТС-19М	150	1.4	ЦТС-19	160	1.0
	ЦТС-19	160	1.0			
Повышенные температуры: до 200...280 °С	ЦТС-45	250	1.1	ЦТС-36	260	1.9
	ЦТС-36	260	1.0	ЦТС-21	280	1.1
	ПКР-1	200	1.0	ЦТС-26	250	1.1
	ЦТС-83Г	280	0.9	ЦТС-Б	280	1.0
Высокие температуры: до 400...800 °С	НТВ-2	400	0.09	—		
	ТНВ-2	600	0.05			
	ПКР-61	800	0.03			
	ТНВ-1	700	0.03			

### Эксперимент

В соответствии с изложенными выше критериями параметров вибрационных плотномеров и ПКМ для изготовления пьезоактюатора экспериментального образца был выбран ПКМ ЦТС-Р, разработки НКТБ «Пьезоприбор». Для изготовления датчика вибрации выбран ПКМ ЦТС-19П, как материал с наибольшим значением коэффициента  $K_w$ .

Испытуемые пьезопакеты собирались и устанавливались в ВПП в соответствии со схемой, приведённой на рис. 1. Усилие зажатия пакета контролировалось при помощи динамометрического ключа. В процессе испытаний на вход актюатора подавалось синусоидальное напряжение от генератора ГЗ-112 амплитудой 3 В. Контроль входного и выходного сигналов осуществлялся по осциллографу RIGOLDS1074.

Оценка эффективности применяемых пьезоматериалов для пары актюатор/датчик проводилась сравнением выходных сигналов испытуемых ВПП с выходным сигналом базового варианта ( $K / K_{19}$ ), измеренных при температуре 20°С. В качестве базового варианта ВПП принято исполнение, в котором ПКМ ЦТС-19 применялся и для актюатора, и для датчика. Результаты испытаний представлены на рис. 3.



**Рис. 3.** Зависимость выходного сигнала ВПП от вязкости жидкости.

Как и у экспериментального, так и у базового исполнения ВПП наблюдается пропорциональное уменьшение выходного сигнала с увеличением вязкости среды. При этом во всём диапазоне изменения вязкости выходной сигнал экспериментального образца остаётся в четыре раза выше, чем у базового варианта. Наибольшее отклонение от этого значения не превышает 5% и наблюдается при измерениях в жидкостях с вязкостью выше 200 сПз. Причиной этого является низкий выходной сигнал базового исполнения ВПП.

### Заключение

Повышение эффективности ВПП увеличивает информативность сигнала, что позволяет снизить погрешность измерений и расширить диапазон измеряемых сред жидкостями с большей вязкостью. Анализ основных параметров пьезокерамических материалов, а также принципов функционирования и требований к системе возбуждения и измерения параметров колебаний вибропреобразователя плотномера позволили создать комбинации ПКМ пары актюатор/датчик для эффективной работы ВПП в жидкостях с большой вязкостью.

Применение ПКМ с высоким пьезомодулем  $d_{33}$  для актюаторов и высоким пьезоэлектрическим коэффициентом  $g_{33}$  для датчиков обеспечивает четырёхкратное увеличение эффективности в сравнении с базовым исполнением вибропреобразователя. Расширение верхней границы вязкости измеряемой жидкости даёт возможность разработки вибрационного плотномера на уровне с лучших зарубежных аналогов.

### Список литературы

1. Маловичко М. Ф., Анисеев А. А., Ткаченко В. А. Использование эффекта присоединённой массы для измерения плотности растворов // Известия Томского политехнического института имени С.М. Кирова. 1970. Т. 184.
2. Зацерклянный О. В. Вибрационные плотмеры газов и жидкостей для продукции газоконденсатных скважин // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2011. № 2. С. 9–13.
3. Горш А. В., Панич А. Е., Свирская С. Н., Янчик В. В. Перспективы развития пьезоэлектрических датчиков механических величин для РКТ и других областей // Сб. тр. науч.-техн. конф. «Информационно-измерительная техника». М.: РУНД, 2014. С. 282–293.
4. Панич А. Е., Янчик В. В. Управление характеристиками пьезоэлектрических датчиков с интегрированными многофункциональными преобразователями // Матер. V Международ. конф. «Геоинформационные технологии и космический мониторинг». Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2012. С. 329–334.
5. Панич А. Е. Отечественные пьезокерамические материалы для датчиков механических величин // Физические основы приборостроения. 2019. Т. 8. № 1. С. 30–35. DOI: 10.25210/jfor-1901-030035.

**Поступила 7 августа 2020 г.**

# PIEZOELECTRIC MATERIALS FOR VIBRATION DENSITY CONVERTERS OF VISCOUS LIQUIDS

O.V. ZATSERKLYANNYI, A.E. PANICH

doi: 10.25210/jfor-2003-046051

A possibility of broadening the measurement diapason of a vibrating density transducer depending on the viscosity parameters of measured liquid was researched in the article. по параметру вязкости измеряемой жидкости.

At the beginning of the article the justification behind the necessity of the undertaken research for submersible vibration density meters is presented. The aim of the research is to maximize the effectiveness of vibrating density transducers (VDT) utilized in high viscosity environments by improving the excitation and measurement system of oscillation parameters.

Further on the effects of viscosity on a liquid' density measurement error were determined by utilizing fork vibration transducer developed in SCTB "Piezoprobor" (Rostov-on-Don). As evidenced by the obtained data, viscosity has the most significant impact on the vibration amplitude and quality factor of the VDT. As an effect, Q factor increases 140 times and amplitude increases nearly 30 times. Decrease of Q factor of the VDT leads to stricter accuracy requirements in maintained phase difference whereas the decrease of useful signal amplitude leads to an increase of measurement error of phase shift between excitation signal and the feedback. In order to eliminate this inconsistency it was suggested to increase the effectiveness of vibration excitation system and its parameters measurement by applying piezoceramic materials (PCM) with specifically selected parameters.

To accomplish that reviewed were main parameters of piezoceramic materials which to the highest extent determine piezotransducers' characteristics. The selection of PCM was suggested to be based on division of temperature diapason into sub-diapasons, focusing on the requirements of a measured medium. The main reference point for the selection of the actuator material was piesomodule, in this particular case being  $d_{33}$ . For sensitive elements of the feedback sensors used for registration of the electric charge output section of the material with the highest  $g_{33}$  coefficient was recommended.

After the initial selection of the piesomaterials outcomes of the conducted experiments are presented, on the basis of which it is concluded that application of PCM with a high piesomodule  $d_{33}$  for actuators and high piezoelectric coefficient  $g_{33}$  for sensors ensures 4 times higher effectiveness in comparison with the basic version of the vibration transducer. Thus a significant improvement of VDT parameters and was attained and diapason of measured liquids depending on the viscosity was broadened. Increased upper limit of the viscosity of the measured liquid provides the opportunity of developing a vibration density meters at the competitive level of the foremost foreign equivalents.

## Уважаемые читатели!

Подписка на журнал оформляется через подписное агентство «Книга-Сервис» и объединенный каталог «Пресса России» (подписной индекс **29196**)

### Журнал включен:

- В *Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)*.
- В базу данных *Russian Science Citation Index (RSCI)* на платформе *Web of Science*.
- В *Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук*.