

## ВИБРАЦИОННЫЕ ПЛОТНОМЕРЫ ГАЗОВ И ЖИДКОСТЕЙ ДЛЯ ПРОДУКЦИИ ГАЗОКОНДЕНСАТНЫХ СКВАЖИН

О.В. Зацерклянный

Из существующих способов измерений плотности непосредственно в технологических линиях или производственных агрегатах, наибольшее распространение получили методы, основанные на использовании механических систем со стабильными частотными характеристиками и с применением искусственного радиоактивного излучения. По сравнению с радиоактивным вибрационный или частотный способ измерений обладает рядом преимуществ, заключающихся в более высокой точности и стабильности измерений, а также значительно меньшим временем отклика. Кроме того, вибрационные плотномеры достаточно надежны, просты и удобны в эксплуатации, способны работать в сложных климатических условиях, не требуют применения специального оборудования, разрешений на проведение работ с радиоактивными источниками излучения и избавляют от хлопот, связанных с их утилизацией.

В вибрационных плотномерах плотность жидкости или газа определяется по резонансной частоте некоторого тела (вибратора), взаимодействующего с измеряемой средой. Существует несколько практических способов построения вибраторов, но все их можно разделить на три основные группы:

- простые вибраторы (масса на пружине, балки);
- уравновешенные вибраторы (камертон);
- тонкостенные резонаторы (цилиндры, кольца, фужеры).

Погружение в вещество датчика в виде колеблющегося камертона соответствует добавлению к системе эквивалентной присоединенной массы и изменению его резонансной частоты. Величина присоединенной массы зависит от плотности вещества, следовательно, девиация частоты резонансных колебаний является параметром, по которому определяется плотность.

На основе этого принципа разрабатывается конструкция плотномера удовлетворяющего следующим техническим требованиям:

- диапазон измеряемых плотностей жидкости:  $0 \dots 2000 \text{ кг/м}^3$ ;
- погрешность измерения  $\pm 0,5 \text{ кг/м}^3$ ;
- диапазон температур:  $-70^\circ \dots +80^\circ \text{ C}$ ;
- диапазон давлений: от 0 до 16 МПа.

Рассмотрим упрощенную модель камертона, имеющей лопасти в виде прямоугольных параллелепипедов длиной  $L$ , шириной  $a$  и толщиной  $h$ .

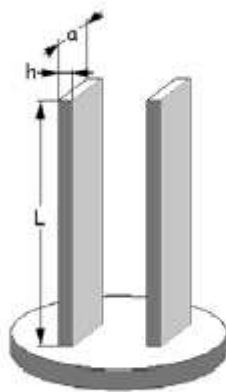


Рис. 1. Модель простейшего камертонного датчика плотности среды.

Согласно [1], изменение собственной частоты камертона от плотности окружающей среды есть:

$$\frac{F_0}{F} = \frac{\Theta_0 + \Theta_F}{\Theta_0} \quad (1)$$

где  $F_0$  - резонансная частота камертона на основной моде в воздухе;

$\Theta_0$  и  $\Theta_F$  - моменты массы лопаток камертона на вакууме и в среде с плотностью  $\rho_F$  соответственно.

В вакууме при нормальном давлении

$$\Theta_0 = 3.33 \cdot 10^{-7} h a L^3 \rho_m \quad (2)$$

В среде с плотностью  $\rho_F$ , например, в жидкости

$$\Theta_F = (0.0151 a^2 + 0.0226 a) L^3 \rho_m / 64000, \quad (3)$$

где  $\rho_F$  - плотность среды (жидкости), г/см<sup>3</sup>,

$\rho_m$  - плотность материала камертона, г/см<sup>3</sup>

$h, a, L$  - размеры лопасти камертона, мм.

Формула (1) может быть преобразована к виду пригодному для вычисления плотности среды по известной плотности материала камертона, частоте колебаний в вакууме и в измеряемой среде:

$$\rho_f = \rho_m \left( \frac{f_0}{f} \right)^2 - \frac{K}{L^3} \quad (4)$$

$f$  - частота камертона в среде;

$f_0$  - частота камертона в вакууме;

$\rho_f$  - плотность среды, кг/м<sup>3</sup>;

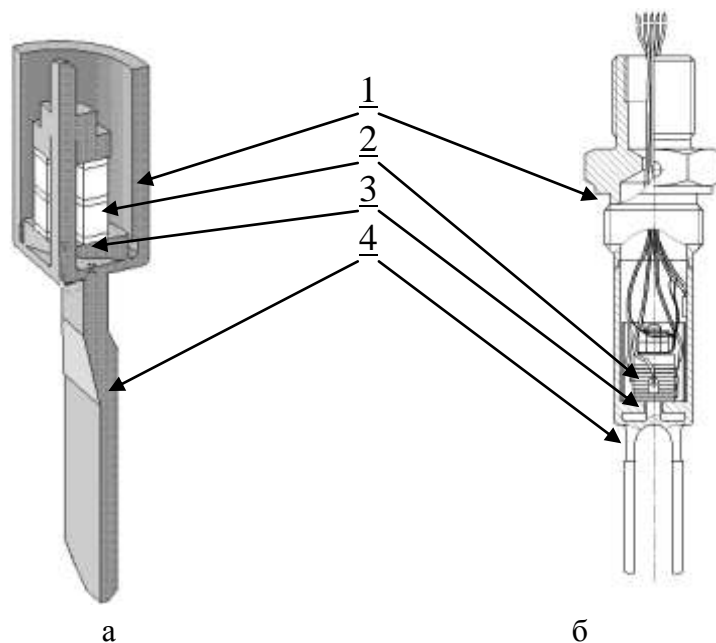
$\rho_m$  - плотность материала камертона, кг/м<sup>3</sup>;

$K$  - безразмерный коэффициент, связанный с геометрией и материалом камертона.

Низкая погрешность измерения плотности в широком диапазоне значений, широкий температурный диапазон и высокие рабочие давления определяют следующие требования к первичному преобразователю плотномера:

- рабочая частота в вакууме от 900 до 1400 Гц;
- девиация частоты в диапазоне плотностей от 0 до 2000 кг/м<sup>3</sup> не менее 35%;
- выходной сигнал не менее 10 мВ/В;
- изменение рабочей частоты от температуры не больше 0,02 Гц/10 °С;
- нестабильность рабочей частоты не более 0,02 Гц/год;
- устойчивость к химическому воздействию измеряемой среды;
- смачиваемость поверхности камертона измеряемой средой;
- прочность конструкции.

Для практической реализации камертона был проведен расчет геометрических размеров методом конечных элементов. На рисунке 2а показана геометрическая модель камертонного преобразователя плотности, использованная при моделировании в пакете программ ANSYS. Чертеж преобразователя приведен на рисунке 2б.



*Рис. 2. Геометрическая модель и схема камертонного преобразователя плотности среды.*

Металлический корпус 1 обеспечивает защиту от влияния измеряемой среды на внутренние детали плотномера и механическую прочность конструкции. В качестве пьезодвижителя 2 используются пьезоэлементы в форме шайб, одни из которых являются активными (возбуждающими), а другие пассивными (принимающими). Пьезоэлементы отделены изолирующими слоями друг от друга и от корпуса. Пьезоэлементы с

изоляторами зажаты между конусной шайбой 3, опирающейся на мембрану, и металлической накладкой при помощи гайки. Материалом для пьезоэлементов служит пьезоэлектрическая керамика, которая имеет характеристики, указанные в книге [2]. В качестве материала мембраны и лопаток камертона 4 может быть использована нержавеющая сталь 12Х18Н9Т или сплавы элинваров. Характеристики металлов содержатся в справочнике [3].

Приведенные выше характеристики камертонных преобразователей плотности определяют схемотехнику электронного устройства возбуждения резонансных колебаний камертона, а также характеристики входных цепей микропроцессорного преобразователя частоты колебаний в измеренное значение плотности вещества.

Коэффициент  $K$  и  $\rho_m$  в (4) в общем случае зависят от температуры, а значение частоты колебаний камертона можно представить как функцию плотности среды и температуры камертона  $f = F(\rho, T)$ , что делает совершенно необходимым измерение температуры камертона.

Ниже приведены основные требования к электронному блоку плотномера:

- возбуждение колебаний камертона на частоте резонанса в среде;
- измерение частоты с погрешностью не выше  $\pm 0,02$  Гц;
- измерение температуры камертона с погрешностью не выше  $\pm 0,05$  °С;
- проведение математических вычислений с плавающей запятой;
- хранение калибровочных коэффициентов в EEPROM;
- вывод результатов измерений и вычислений на ЖК – индикатор;
- преобразование значения плотности в аналоговый выходной сигнал 4-20мА в соответствии с установленными пределами;
- обеспечение цифровой связи по интерфейсам USART и RS-485 по протоколу Modbus.

Для практической реализации плотномера жидких и газовых сред предложена блок-схема электронного преобразователя, изображенная на рисунке 3.

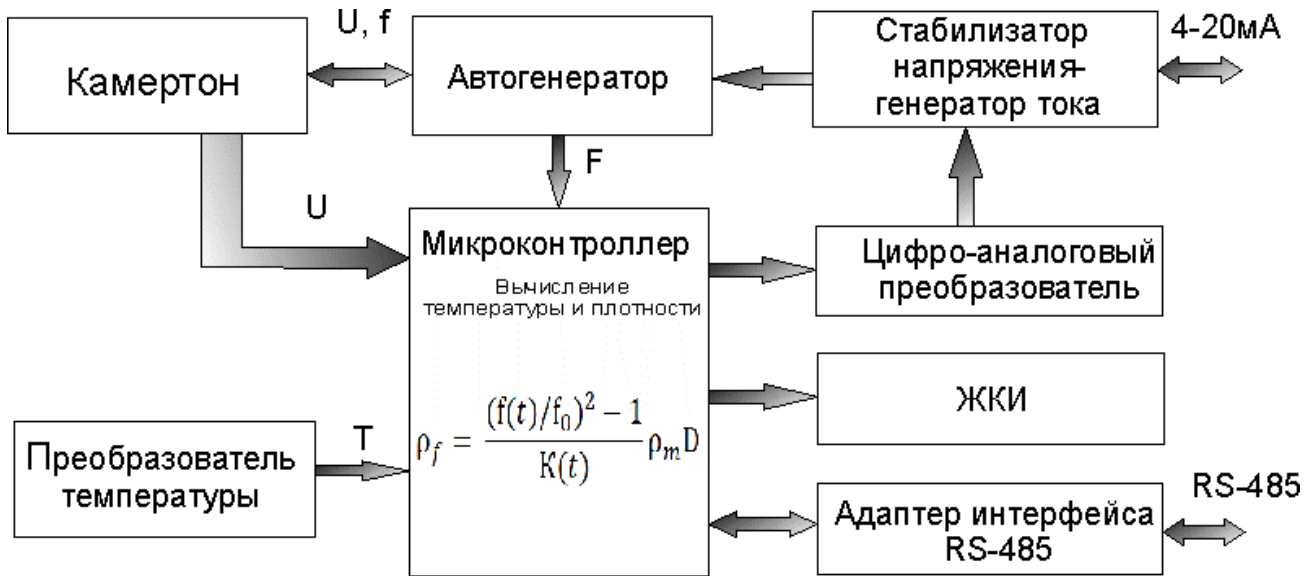


Рис. 3. Блок-схема электронного преобразователя плотномера

Стабилизатор напряжения обеспечивает питание внутренних блоков схемы, высокостабильный источник опорного напряжения - функционирование преобразователя температуры и цифро-аналогового преобразователя, а также преобразование выходного напряжения цифро-аналогового преобразователя в выходной токовый сигнал 4-20 мА.

Автогенератор обеспечивает возбуждение камертона на частоте 1-й моды изгибных колебаний лопаток камертона, подавляя возбуждение на следующих модах. От автогенератора на вход микроконтроллера поступает электрический сигнал с частотой равной частоте колебаний лопаток. Микроконтроллер измеряет частоту сигнала с погрешностью от  $\pm 0,01$  до  $\pm 0,02$  Гц. Время измерения не превышает 200 мс.

На вход высокоскоростного АЦП микроконтроллера для измерения амплитуды поступает ответный сигнал от пьезодвижителя. На другой вход АЦП поступает напряжение от термометра, расположенного в непосредственной близости от конусной шайбы камертона (позиция 3, рисунок 2б). Погрешность измерения амплитуды сигнала не превышает  $\pm 5$  мВ, погрешность измерения температуры не превышает  $\pm 0,05$  °С.

Получая информацию о текущей частоте колебаний камертона, его температуре и амплитуде сигнала обратной связи, микроконтроллер вычисляет текущую плотность вещества с учетом температурных изменений колебательной системы. Комбинация значений частоты, амплитуды и температуры дает информацию о возможном налипании, демпфировании или коррозии камертона. Информация о текущем значении плотности с признаками достоверности отображается на жидкокристаллическом индикаторе (ЖКИ) и передается по линии аналогового сигнала 4-20 мА, либо по цифровому интерфейсу с протоколом Modbus. На рисунке 4 изображено устройство и внешний вид плотномера 804.



Рис. 4. Устройство и внешний вид плотномера 804.

Ниже приведены основные технические характеристики плотномера 804.

- калибруемый диапазон измерения плотности среды,  $\text{кг/м}^3$ ;
- жидкости от 620 до 1330  $\text{кг/м}^3$ ;
- газа от 0 до 160  $\text{кг/м}^3$ ;
- пределы допускаемой основной погрешности измерения в нормальных условиях:
  - по цифровому сигналу,  $\Delta$ ,  $\text{кг/м}^3$ , не более: .....  $\pm 0,5$ ;
  - по аналоговому сигналу,  $\gamma$ , % по формуле (1), не более:

—

где:  $\Delta\rho = (\rho_{\max} - \rho_{\min})$  – величина установленного для аналогового сигнала постоянного тока диапазона измерений.

- диапазон рабочих температур измеряемой среды  $^{\circ}\text{C}$ : от минус 70 до +80;
- дополнительная погрешность, вызванная изменением температуры и давления в диапазоне рабочих температур и давлений:  $\text{кг/м}^3$ , не более: .....  $\pm 1,0$ ;
- максимальное давление среды, МПа, из ряда, не более: ..... 16;
- вязкость среды,  $\text{мм}^2/\text{с}$ , не более: ..... 100;
- индикация значения измеряемого параметра в установленных единицах на встроенном индикаторе с жидкокристаллическим дисплеем,  $\text{кг/м}^3$ : от 0 до 2000;
- выходные сигналы (исполнение):

цифровые по интерфейсу:

.....RS485,

.....USART,

аналоговый .....постоянного тока 4-20 мА;

- скорость передачи данных по цифровому интерфейсу  
с протоколом обмена Modbus, бод: ..... 9600;
- время готовности данных после включения, с, не более: ..... 5;
- электрическое питание плотномера осуществляется от источника питания постоянного тока напряжением от 12 до 24 В, для варианта с выходным сигналом USART от 3 до 5 В;
- потребляемая мощность плотномера, ВА, не более при выходном сигнале:
  - цифровом RS485 ..... 1,2,
  - цифровом USART ..... 0,5,
  - аналоговом ..... 0,5.

Основную погрешность плотномера определяют по эталонным газам или жидкостям (т.е., на входе плотномера устанавливают номинальные значения плотности), а по другому эталонному СИ измеряют соответствующие значения выходного аналогового сигнала.

При поверке плотномера с цифровым выходным сигналом к его выходу подключают приемное устройство - компьютер, поддерживающее соответствующий цифровой коммуникационный протокол для считывания информации.

Показания СИ или считывание информации с монитора производится при стабилизации состояния измеряемой среды, при которой нестабильность температуры в течение 5 минут не превысит  $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ , а давления соответственно  $\pm 0,1\%$ .

Определение основной погрешности плотномера, настроенного на жидкости, проводится при нормальных условиях по эталонным жидкостям (образцам плотности в пределах установленного диапазона измерений плотномера) на стенде, схема которого показана на рисунке 5.

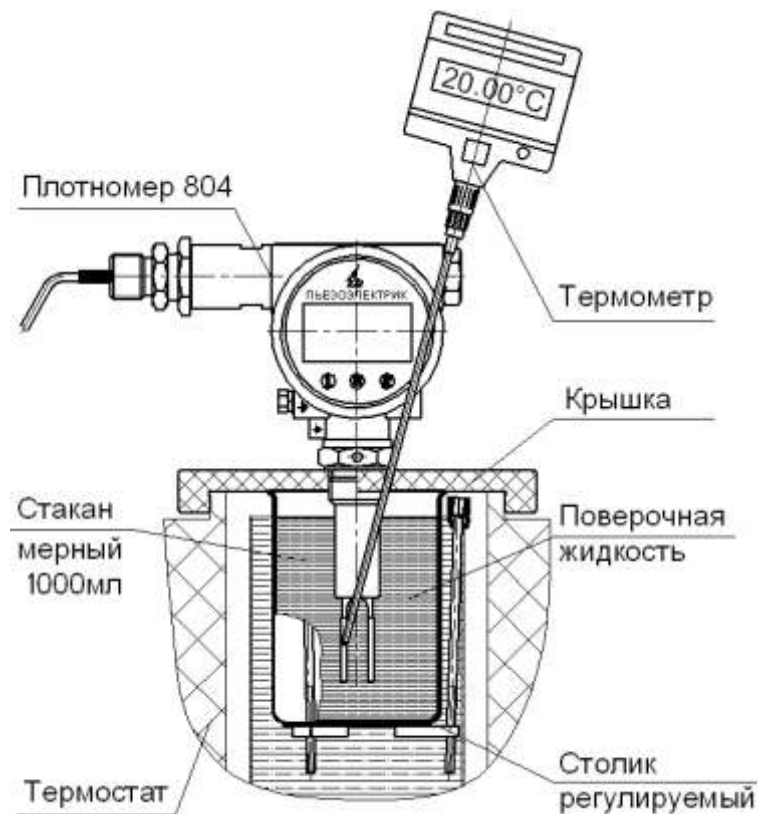


Рис. 5. Схема стенда для проверки плотномера эталонными (поверочными) жидкостями.

При поставке плотности эталонных жидкостей указываются при температурах  $20,01 \pm 0,01$  °C и  $15,01 \pm 0,01$  °C с абсолютной погрешностью  $0,1 \text{ кг/м}^3$ , поэтому конструкция стенда обеспечивает установку и поддержание температуры эталонной жидкости с погрешностью не хуже  $\pm 0,01$  °C. Некоторые из применяемых эталонных жидкостей и их характеристики приведены в таблице 1.

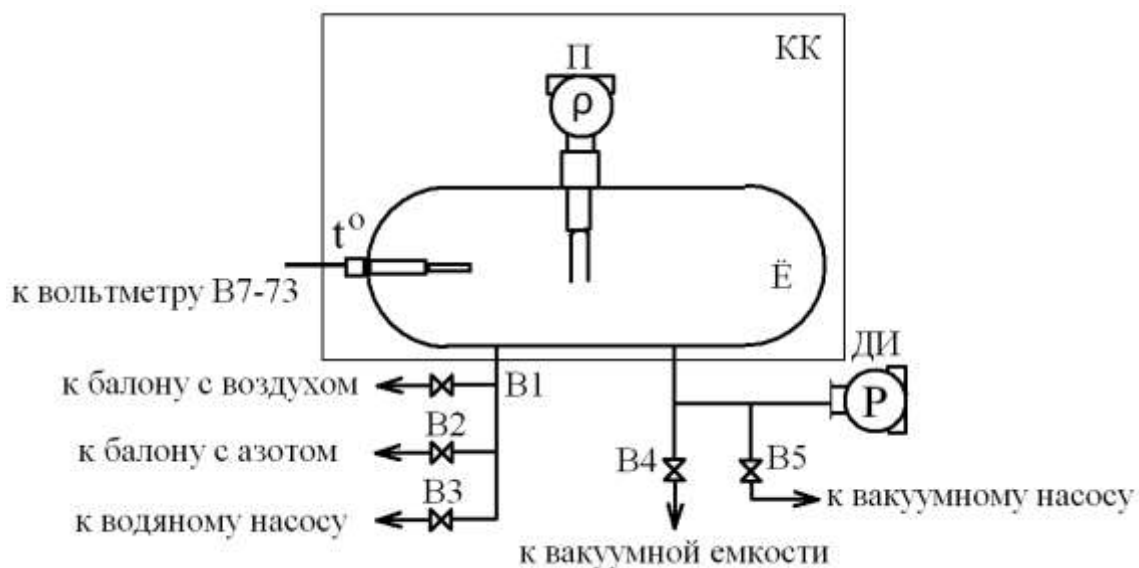
Таблица 1. Образцы плотности.

Тип жидкости	Интервал значений плотности, $\text{кг/м}^3$
РЭП-1 04.02.016 (ГСО 8579-2004)	$683,0 \div 697,2$
РЭП-5 04.02.020 (ГСО 8583-2004)	$998,0 \div 999,0$
РЭП-7 04.02.022 (ГСО 8585-2004)	$1316,7 \div 1343,0$
РЭП-8 04.02.008 (ГСО 8102-2002)	$1590,0 \div 1630,0$

Определение основной погрешности плотномера, настроенного на газы, проводится при нормальных условиях по эталонным газам (азоту, воздуху или иному газу



с известными характеристиками плотности) на стенде, схема которого показана на рисунке 6.



*Рис. 6. Схема испытательного стенда для проверки плотномеров эталонными газами.*

Емкость «Ё» испытательного стенда помещается в климатическую камеру «КК», в которой может быть установлена температура в диапазоне от минус 70 до плюс 95 °С. Плотность газа в емкости определяется по измеренным значениям температуры и давления с применением таблиц ГСССД. При испытаниях плотномеров 804 использовался азот газообразный, повышенной чистоты по ГОСТ 9293-2006. Погрешность измерения температуры составляет  $\pm 0,01$  °С, давления –  $\pm 8$  кПа, что обеспечивает вычисление плотности азота с погрешностью  $\pm 0,09$  кг/м<sup>3</sup>.

Внешний вид испытательной установки в процессе испытаний плотномеров приведен на рисунке 7.



*Рис. 7. Внешний вид установки и плотномеров в процессе испытаний.*

Опытные образцы плотномера 804, разработанные и изготовленные ООО «Пьезоэлектрик» прошли опытную эксплуатацию в составе счетчика СВГ.МЗ-100 (производства ОАО ИПФ «Сибнефтеавтоматика») на газоконденсатной скважине нефтепромысла ООО «РН-Пурнефтегаз» Тюменская область г. Губкинский. Измеряемой средой являлась продукция газоконденсатных скважин, с избыточным давлением 9,5 МПа, температурой от 24 до 26 °С, объемным расходом при рабочих условиях от 39 до 40 м<sup>3</sup>/ч, плотностью (98...107) кг/м<sup>3</sup> и объемным содержанием жидкой фазы от 1 до 1,5%. Окружающая среда – открытая установка, температура окружающего воздуха от минус 45 до +35 °С.

Результаты опытной эксплуатации показали, что плотномеры 804 работоспособны в условиях нефтепромысла, метрологические характеристики отвечают требованиям, предъявляемым к системам контроля параметров и учета продукции нефтяных и газовых скважин (ГОСТ Р 8-615-2005).

### **Литература**

1 Лопатин С.С., Пфайффер Х. Датчики предельного уровня для жидкостей. Физические принципы работы и возможности вибрационных датчиков// Технические средства автоматизации. 2004, № 12.,с 24-29.

2 Пьезоэлектрическое приборостроение: сборник в 3 томах. Т. 3. Богуш М.В. Пьезоэлектрические датчики для экстремальных условий эксплуатации. Ростов-на-Дону. Издательство СКНЦ ВШ, 2006. 346 с: ил.

3 Физические величины: Справочник/ А.П.Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.; Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.; Энергоатомиздат, 1991. -1232 с.

## **ВИБРАЦИОННЫЕ ПЛОТНОМЕРЫ ГАЗОВ И ЖИДКОСТЕЙ ДЛЯ ПРОДУКЦИИ ГАЗОКОНДЕНСАТНЫХ СКВАЖИН**

### **Аннотация**

Описаны физические принципы и требования к первичному преобразователю и электронной схеме вибрационного плотномера. Приведены примеры практической реализации первичного преобразователя, блок-схема электронного блока и основные характеристики плотномера 804.

Вибрационный плотномер 804, первичный преобразователь.

## **THE VIBRATION DENSIMETER OF GASES AND LIQUIDS FOR THE GAS-CONDENSATE WELLS**

### **Abstract**

The physical principles and requirements for primary converters and the electronic circuit of the vibration densimeter are adduced. The example of the practical realization of the primary converter, the flowchart of the electronic block and main characteristics of the densitometer 804 are adduced.

vibration densimeter 804, primary converters