

ВИБРАЦИОННЫЕ ПЛОТНОМЕРЫ ГАЗОВ И ЖИДКОСТЕЙ ДЛЯ ПРОДУКЦИИ ГАЗОКОНДЕНСАТНЫХ СКВАЖИН

О.В. Зацерклянный
(ООО "Пьезоэлектрик")

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...2000 кг/м³;
- погрешность измерения ±0,5 кг/м³;
- диапазон температур -70...+80 °С;
- диапазон давлений 0...16 МПа.

Рассмотрим упрощенную модель камертона, имеющую лопасти в виде прямоугольных параллелепипедов длиной L , шириной a и толщиной h (рис. 1).

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

$$\frac{\Delta F}{F_0} = \left(\frac{\Theta_0}{\Theta_0 - \Theta_F} \right)^{1/2} - 1, \quad (1)$$

где F_0 – резонансная частота камертона на основной моде в воздухе; Θ_0 , Θ_F – моменты массы лопаток камертона на вакууме и в среде с плотностью ρ_F , соответственно.

В вакууме при нормальном давлении

$$\Theta_0 = 3,33 \cdot 10^{-7} haL^3 \rho_m. \quad (2)$$

В среде с плотностью ρ_F , например, в жидкости

$$\Theta_F = (0,0151a^2 + 0,0226a) L^3 \rho_m / 64000, \quad (3)$$

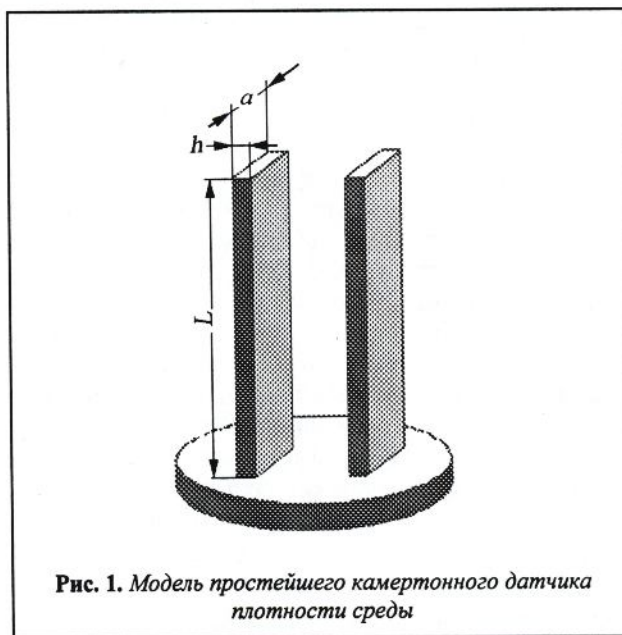
где ρ_F – плотность среды (жидкости), г/см³, ρ_m – плотность материала камертона, г/см³; h , a , L – размеры лопасти камертона, мм.

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

$$\rho_F = \frac{(f/f_0)^2 - 1}{K} \rho_m \quad (4)$$

где f – частота камертона в среде; f_0 – частота камертона в вакууме; ρ_F – плотность среды, кг/м³; ρ_m – плотность материала камертона, кг/м³; K – безразмерный коэффициент, связанный с геометрией и материалом камертона.

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



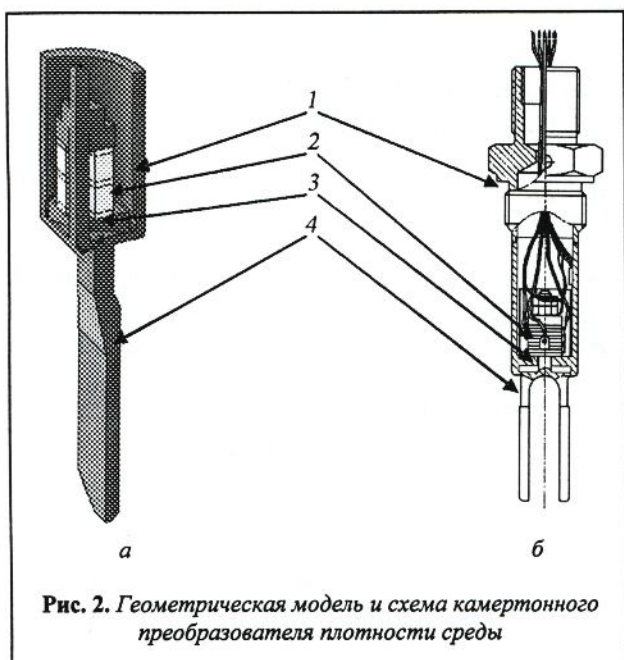


Рис. 2. Геометрическая модель и схема камертонного преобразователя плотности среды

- рабочая частота в вакууме – 900...1400 Гц;
- девиация частоты в диапазоне плотностей от 0 до 2000 кг/м³ – 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 рис. 2, а приведена геометрическая модель камертонного преобразователя плотности, использованная при моделировании в пакете программ ANSYS; схема преобразователя представлена на рис. 2, б.

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 с помощью гайки. Материалом для пьезоэлементов служит пьезоэлектрическая керамика, имеющая характеристики, указанные в работе [2]. В качестве материала мембраны и лопаток камертона 4 может быть использована нержавеющая сталь 12Х18Н9Т или сплавы элинваров. Характеристики металлов даны 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 ρ_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 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...20 мА 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 (рис. 3).

Стабилизатор напряжения обеспечивает питание внутренних блоков схемы, высокостабильный источник опорного напряжения – функционирование преобразователя температуры и цифро-аналогового преобразователя (ЦАП), а также преобразование выходного напряжения ЦАП 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 аналого-цифрового преобразователя (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 (3 на рис. 2, б). Погрешность измерения амплитуды сигнала не превышает ± 5 мВ, погрешность измерения температуры не превышает $\pm 0,05$ °С.

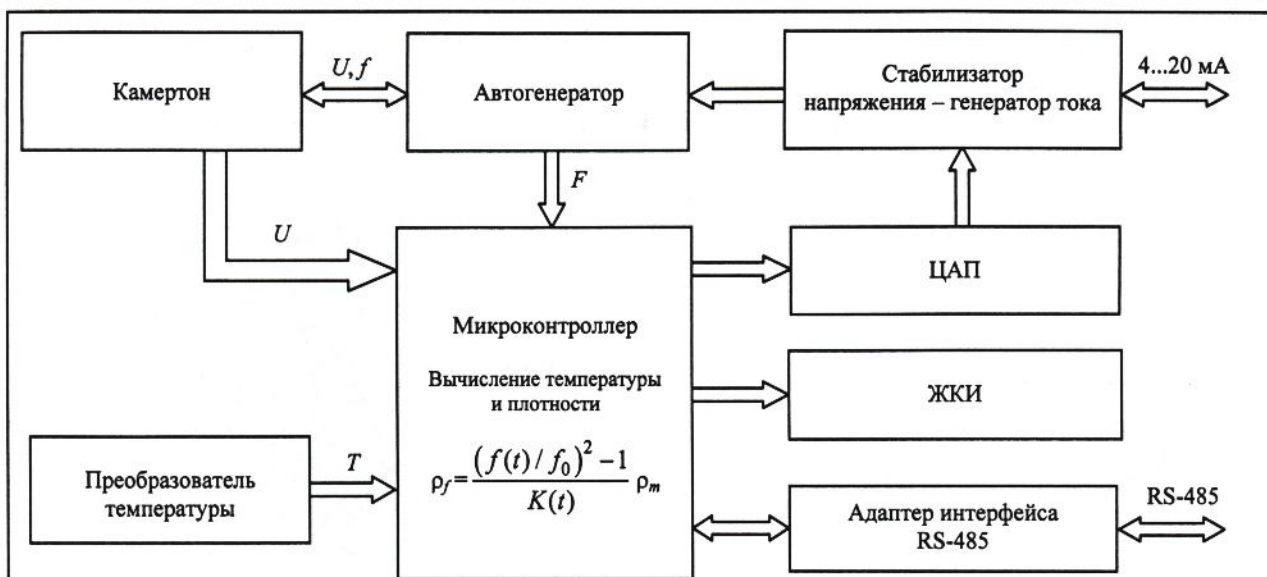


Рис. 3. Блок-схема электронного преобразователя плотнора

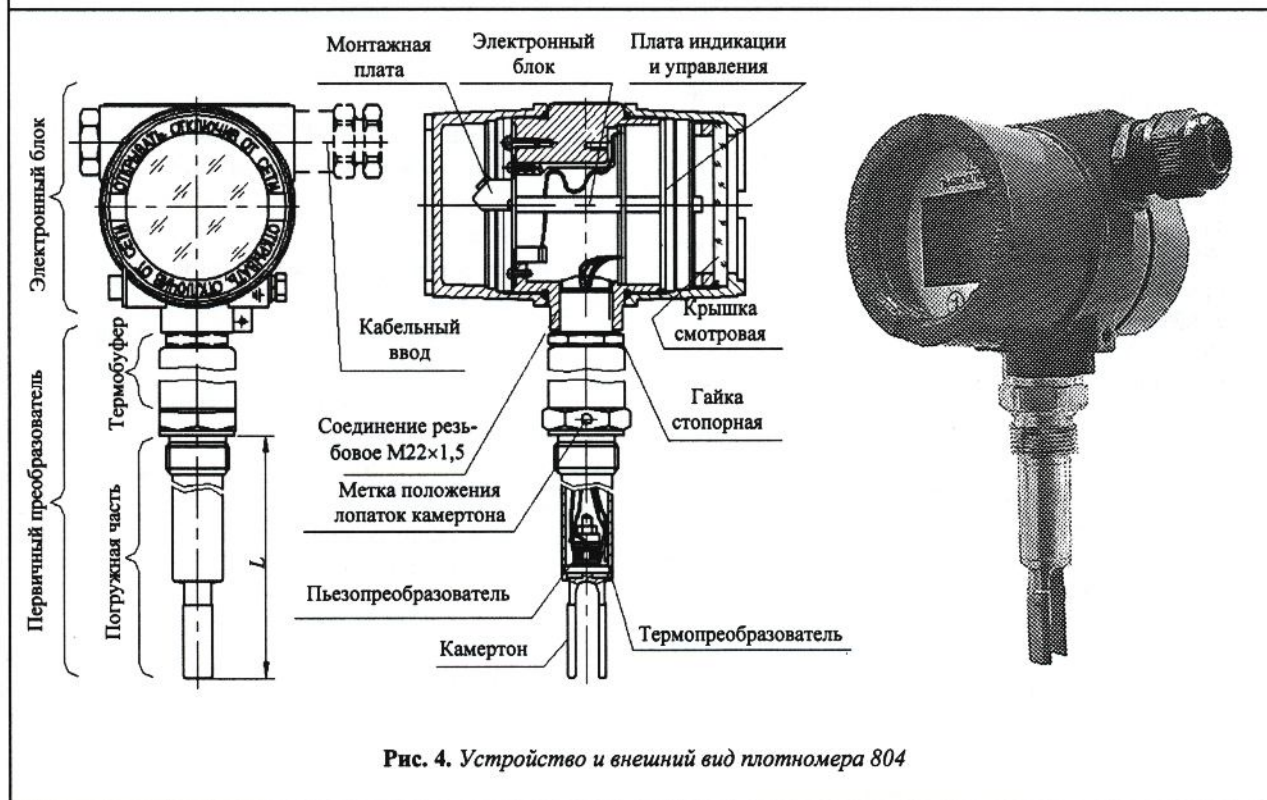


Рис. 4. Устройство и внешний вид плотнора 804

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 рис. 4 изображены устройство и внешний вид плотнора 804.

Ниже приведены основные технические характеристики плотнора 804.

Калибруемый диапазон измерения плотности среды, кг/м³:

жидкости..... 620...1330

газа 0...160

Пределы допускаемой основной погрешности измерения в нормальных условиях, не более:

по цифровому сигналу Δ , кг/м³±0,5

по аналоговому сигналу γ , %, по формуле (1) $\pm \left(\frac{\Delta}{\Delta\rho} \cdot 100 + 0,05 \right)$,

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

Диапазон рабочих температур измеряемой среды, °С-70...+80

Дополнительная погрешность, вызванная изменением температуры и давления в диапазоне рабочих температур и давлений, кг/м³, не более.....±1,0

Максимальное давление среды, МПа, из ряда, не более..... 16

Кинематическая вязкость среды, мм²/с, не более 100

Индикация значения измеряемого параметра в установленных единицах на встроенном индикаторе с жидкокристаллическим дисплеем, кг/м³ 0...2000

Выходные сигналы (исполнение):

цифровые по интерфейсу RS-485, USART

аналоговый Постоянного тока 4...20 mA

Скорость передачи данных по цифровому интерфейсу с протоколом обмена Modbus, бод 9600

Время готовности данных после включения, с, не более..... 5

Электрическое питание плотнoмера..... От источника питания постоянного тока напряжением 12...24 В, для варианта с выходным сигналом USART 3...5 В

Потребляемая мощность плотнoмера, В·А, не более, при выходном сигнале:

цифровом RS-485 1,2

цифровом USART 0,5

аналоговом..... 0,5

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

При поверке плотнoмера 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 мин не превысит ±0,1 °С, а давления – соответственно ±0,1 %.

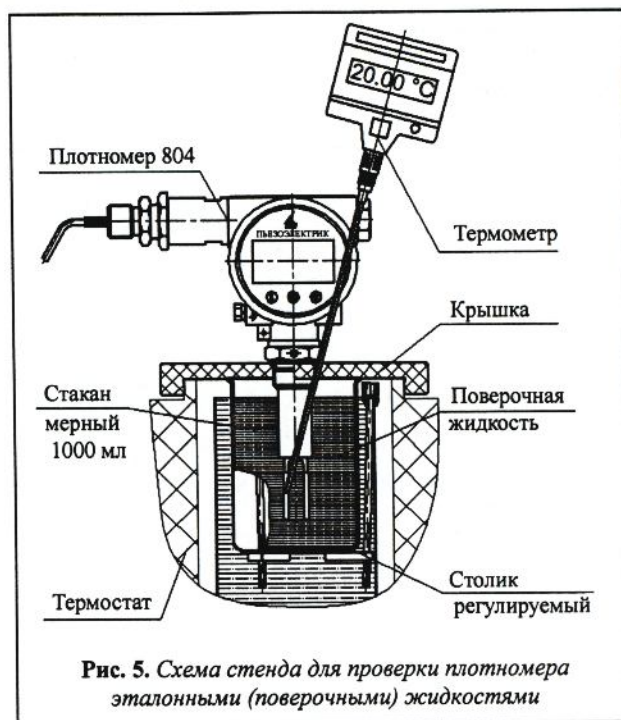


Рис. 5. Схема стенда для проверки плотнoмера эталонными (поверочными) жидкостями

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

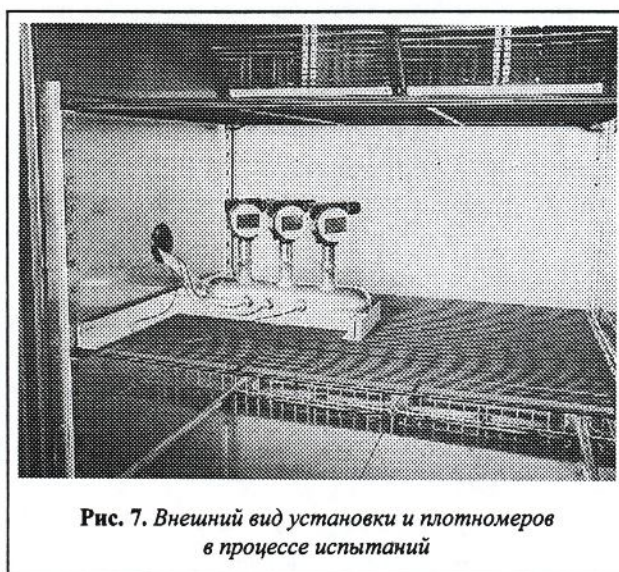
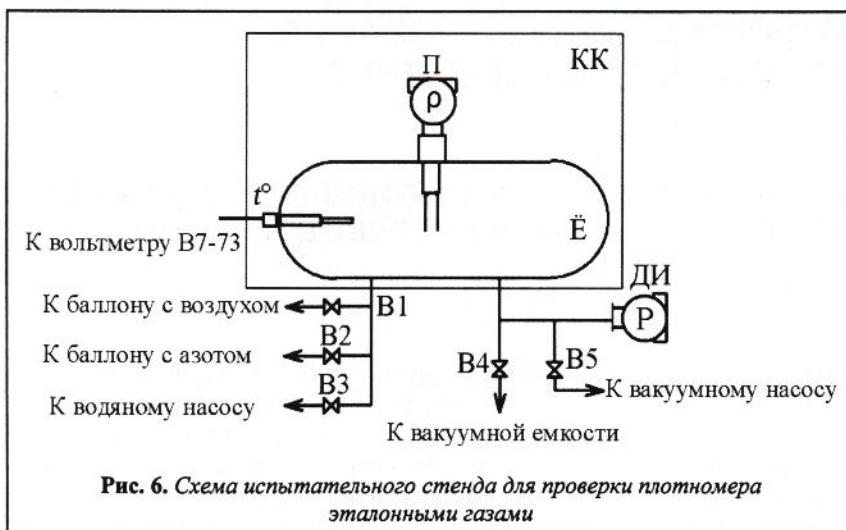
При поставке плотности эталонных жидкостей указываются при температурах (20,01±0,01) °С и (15,01±0,01) °С с абсолютной погрешностью 0,1 кг/м³, поэтому конструкция стенда обеспечивает установку и поддержание температуры эталонной жидкости с погрешностью не хуже ±0,01 °С. Некоторые из применяемых эталонных жидкостей и их характеристики приведены в таблице.

Образцы плотности

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

Определение основной погрешности плотнoмера, настроенного на газы, проводится при нормальных условиях по эталонным газам (азоту, воздуху или иному газу с известными характеристиками плотности) на стенде, схема которого приведена на рис. 6.

Емкость "Е" испытательного стенда помещается в климатическую камеру "КК", в которой может



быть установлена температура в диапазоне от -70 до $+95$ °С. Плотность газа в емкости определяется по измеренным значениям температуры и давления с применением таблиц ГС ССД. При испытаниях плотномеров 804 использовался азот газообразный, повышенной чистоты по ГОСТ 9293-2006. Погрешность измерения температуры составляет $\pm 0,01$ °С, давления ± 8 кПа, что обеспечивает вычисление плотности азота с погрешностью $\pm 0,09$ кг/м³.

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

Опытные образцы плотномеров 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 24...26 °С, объемным расходом 39...40 м³/ч при рабочих условиях, плотностью 98...107 кг/м³ и объемным содержанием жидкой фазы 1,0...1,5 %. Окружающая среда – открытая установка, температура окружающего воздуха от -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: сб. в 3 томах / М.В. Богуш // Пьезоэлектрические датчики для экстремальных условий эксплуатации. Т. 3. – Ростов-на-Дону: Издательство СКНЦ ВШ, 2006. – 346 с.
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.