

**Исследование метрологических характеристик  
вибрационного преобразователя плотности  
с пьезоэлектрическим возбуждением  
и измерением параметров колебаний**

*О.В Зацеклянный*

В основе действия погружных вибрационных плотномеров лежит понятие «присоединённой массы». При неустановившемся движении твердого тела в жидкости или газе необходимо преодолевать инерцию окружающей тело массы вещества, что вызывает дополнительное сопротивление. В случае колебательного движения малой амплитуды скорость жидкости и твёрдого тела имеет одинаковое значение и равна скорости перемещения тела. При подсчёте присоединённой массы жидкость считают лишённой вязкости и обычно пренебрегают её сжимаемостью [1]. Физический смысл присоединённой массы заключается в том, что если присоединить к телу, движущемуся в жидкости, дополнительную массу, равную массе жидкости увлекаемой телом, то закон движения тела в жидкости будет таким же, как в пустоте. Таким образом, измеряя значение присоединённой массы жидкости при колебаниях тела определённой формы, мы измеряем плотность этой жидкости. При этом можно считать объём присоединённой жидкости постоянным для данной формы тела и моды колебаний [2].

В погружных вибрационных плотномерах чувствительный элемент находится в резервуаре или трубопроводе, со всех сторон окружённый жидкостью или газом и измеряет плотность вещества в небольшой зоне колебаний среды вокруг чувствительного элемента. Обычно чувствительный элемент представляет собой металлический вибропреобразователь (ВПП) камертонного типа. Резонансная частота колебаний вибратора зависит от его механических характеристик, температуры и плотности измеряемой среды.

Основным элементом вибрационного преобразователя плотности жидкостей и газов является колебательная система, которая изменяет свою собственную резонансную частоту в зави-

симости от плотности окружающей его среды. Контролируя резонансную частоту, можно судить о плотности среды.

Типичный вариант реализации ВПП камертонного типа представлен на рис. 1. Механическая колебательная система состоит из двух лопастей

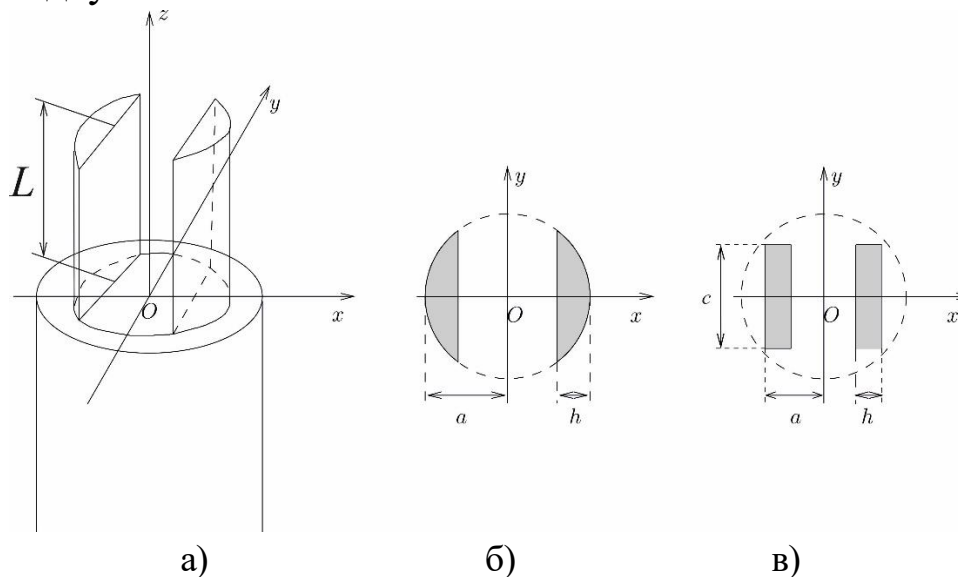


Рис. 1 – Схема погружного камертонного ВПП:

а – модель камертонного ВПП;

б и в – различный профиль лопастей длиной  $L$ , расположенных на мембране симметрично относительно центральной оси  $Z$ .

Мембрана жёстко соединена с защитным цилиндром, отделяющим систему возбуждения колебаний от измеряемой среды. Частота колебаний вибратора определяется геометрическими размерами лопастей, расстоянием между ними, размерами мембраны, плотностью материала камертона и присоединённой массой жидкости вокруг него. Лопасты могут выполняться из различных материалов и иметь различную форму и размеры.

Частота первой моды колебаний в вакууме описывается уравнением:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_0}{\theta_0}}, \quad (1)$$

где  $C_0$  – жесткость лопатки камертона;  $\theta_0$  – момент массы лопатки камертона в вакууме.

При колебаниях, которые совершаются в среде с плотностью, отличной от нуля, появляется момент присоединенной массы:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_0}{\theta_0 + \theta}}, \quad (2)$$

где  $\theta$  – момент присоединенной массы [3].

Из этого выражения можно получить простую функцию вычисления плотности жидкости  $\rho_{\text{ж}}$  от периода колебаний ВПП

$$\rho_{\text{ж}} = ax^2 + b, \quad (3)$$

где  $a$  и  $b$  – некоторые константы, определяемые при калибровке в двух средах с известной плотностью.

Общепринятым является решение, когда значение плотности из периода получается в результате вычисления полинома второй степени, в котором все члены не равны нулю, при этом, наличие линейного члена объясняется влиянием внутренних и внешних потерь на трение [4]. Применение ВПП, в котором возбуждение и измерение колебаний проводится с помощью высокоэффективных пьезоэлектрических преобразователей, значительно снижает внутренние потери и даёт возможность перейти к применению соотношения (3) [5, 6]. В этом случае можно значительно упростить процесс калибровки, и применять не три калибровочные среды, а две, в качестве одной из которых, можно применить атмосферный воздух. В качестве второй калибровочной жидкости может быть использована дистиллированная вода, плотность которой известна в широком диапазоне температур и давлений, или любая другая жидкость с известной плотностью.

Для подтверждения возможности применения формулы (3) были проведены экспериментальные исследования камертонных ВПП двух типов с пьезоэлектрическим возбуждением и измерением параметров колебаний. ВПП изготавливались из титанового сплава ВТ1-0, стали 12Х18Н10Т и сплава 44НХТЮ.

Методика испытаний основана на сличении результатов измерений плотности жидкостей-компараторов, выполненных при одинаковых условиях испытуемым плотномером и эталонным

лабораторным плотномером (анализатором плотности жидкости). Расчёт плотности жидкости-компаратора проводится по измеренному значению периода частоты резонансных колебаний ВПП. Определение метрологических характеристик испытываемых ВПП выполняется непосредственным сличением результата и показаний плотности лабораторного плотномера ВИП-2МР [7]. Измеряемые жидкости были помещены в одинаковые условия при атмосферном давлении, без движения измеряемой среды и выдерживались до достижения температуры  $(20,0 \pm 0,1) ^\circ\text{C}$ . Для исключения влияния вязкости на результат измерений жидкости-компараторы подбирались с вязкостью не более 10,0 сПз. В качестве рабочего диапазона плотности выбран диапазон от 0,5 до 1680 кг/м<sup>3</sup>, так как в указанный диапазон плотности и вязкости попадают газы (воздух, азот) и широкий спектр жидкостей, в том числе нефтепродукты, спирты и вода.

На рис. 2 представлены взятые по модулю абсолютные погрешности базовых (с пометкой Б.) и экспериментальных (с пометкой Э.) образцов ВПП.

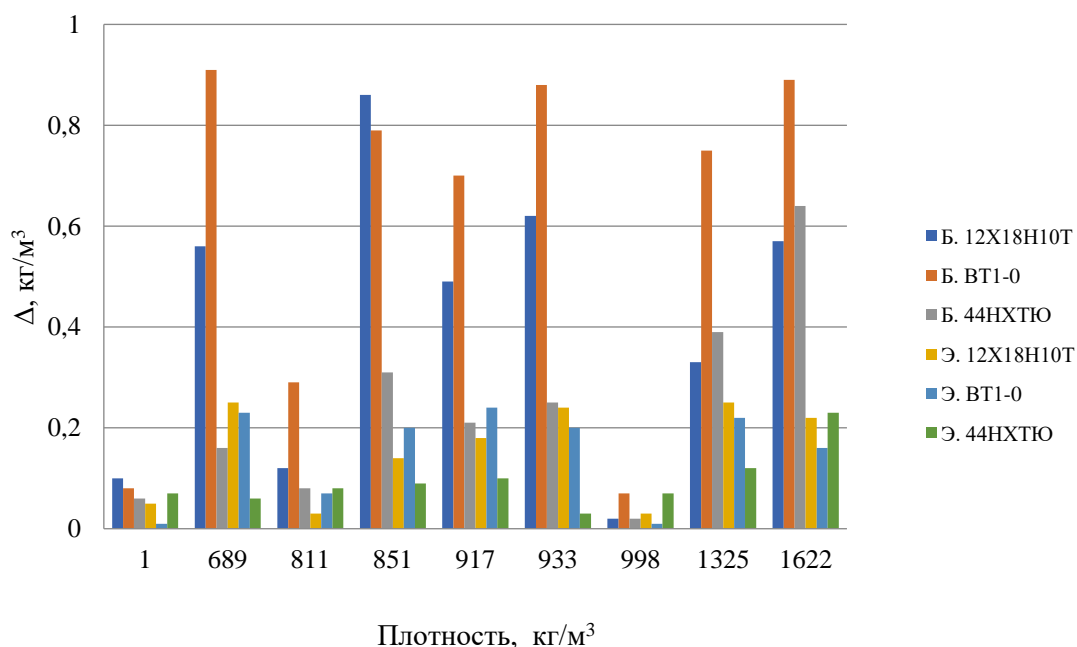


Рис. 2 – Погрешность измерения плотности базовых и экспериментальных образцов ВПП

Проведенные экспериментальные исследования, подтвердили возможность применения полинома второй степени с нулевым

линейным членом для вычисления плотности жидкостей и газов по периоду колебаний ВПП. Наибольшее отклонение значений плотности вычисленной по периоду ВПП от значений, полученных при измерении лабораторным плотномером  $\rho_{\text{э}}$ , не превышает  $\pm 1,0$  кг/м<sup>3</sup>.

### Список литературы

1. Биркгоф, Г. Гидродинамика / Г. Биркгоф. – М. : Издательство иностранной литературы, 1963.
2. Риман, И.С. Присоединенные массы тел различной формы/ И.С. Риман, Р.Л. Крепс. – М. : ЦАГИ, 1947.
3. Лопатин, С.С. Датчики предельного уровня для жидкостей. Физические принципы и возможности вибрационных датчиков / С.С. Лопатин, Х. Пфайффер // Автоматизация в промышленности. – 2004. – №12. – С. 24-29.
4. Жуков, Ю.П. Вибрационные плотномеры / П.Ю. Жуков. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 144 с.
5. Зацерклянный, О.В. Пьезоэлектрические материалы для датчиков вибрации и актюаторов в устройствах измерения плотности жидкостей и газов / О.В. Зацерклянный, А.Е. Панич // Датчики и системы. – 2020. – №4. – С. 48–54.
6. Панич, А.Е. Пьезокерамические актюаторы / А.Е. Панич. – Ростов-на-Дону : 2008. – 159 с.
7. Описание типа средств измерений – Измерители плотности жидкостей вибрационные ВИП-2М и ВИП-2МР – RU.C.31.02.A N 27163-09 2009 г.