

Dykina Lyubov Alexandrovna – Southern Federal University, Institute for Advanced Technologies and Piezotechnics; e-mail: diykina@mail.ru; 344090, Rostov-on-Don, Milchakova street, 10; chief of laboratory.

Panich Alexander Anatol'evich – e-mail: rctt.rctt@mail.ru, director; professor.

Skrylev Alexander Vladimirovich – e-mail: skrylyov@sfnedu.ru, leading engineer.

Proskoryakova Yulia Anatol'evna – Rostov State Transport University; e-mail: ydo@yandex.ru, 344038, Rostov-on-Don, av. Lenina, 2; associate professor.

УДК 53.082.4

DOI 10.18522/2311-3103-2020-6-179-189

О.В. Зацеклянный

АЛГОРИТМ ТЕМПЕРАТУРНОЙ КОРРЕКЦИИ ВИБРАЦИОННЫХ ПЛОТНОМЕРОВ

Рассматривается дополнительная температурная погрешность вибрационных плотномеров жидкостей и газов, а именно проблема влияния изменения температуры среды на частоту колебаний вибропреобразователей плотности. Описывается принцип действия и преимущества вибрационных плотномеров. Приводится анализ и описание существующих алгоритмов вычисления плотности и активной термокомпенсации, а также их недостатки. Указывается на серьёзные ограничения температурного диапазона калибровки существующих методов, связанные с обязательным применением дистиллированной воды. Опираясь на проведённое ранее моделирование вибропреобразователя и на выявленную основную роль температурных свойств модуля упругости металла, предложен новый алгоритм термокомпенсации без применения жидкостей-компараторов. Приводятся преимущества нового алгоритма, связанные с использованием вакуума в качестве среды, окружающей вибропреобразователь. В качестве основного преимущества приводится значительное расширение калибруемого температурного диапазона. Предполагается возможность применения алгоритма для калибровки плотномеров при экстремально низких и высоких температурах. Приведены формулы вычисления значения периода колебаний преобразователя, с учётом температурных изменений - термокомпенсированного периода. Описаны преимущества применения в качестве градуировочной функции полинома второго порядка с нулевым линейным членом. Подробно описаны методики проведения экспериментов, виды оборудования и средств измерений. Представлены полученные экспериментальные данные для вибропреобразователей из трёх разных металлов. Проведён анализ полученных данных и сделан вывод о целесообразности применения предложенного алгоритма термокомпенсации вибропреобразователей плотности жидкостей и газов.

Вибропреобразователь; плотномер; дополнительная погрешность от температуры; алгоритм термокомпенсации; жидкость-компаратор; калибровочные коэффициенты.

O.V. Zatserklyanyi

ALGORITHM FOR TEMPERATURE CORRECTION OF VIBRATION DENSITY METERS

In this article additional temperature error of vibration density meters in liquids and gases is reviewed. Particularly scrutinized are the effects of change in the temperature of the medium on the vibration frequency of the density vibration transducers. Main principle of operation and advantages of vibration density meters is described. The article analyzes and describes the existing algorithms of calculating density and active temperature compensation as well as the disadvantages of those algorithms. It points out to the significant limitations of temperature calibration diapason of the existing methods which relate to the necessity of using distilled water. Basing on the previous vibration transducer simulation and on the established main func-

tion of the elastic modules of the metal' temperature properties a new thermal compensation algorithm, which does not involve liquid compensators, was introduced. Main advantages of the new algorithm are demonstrated. Those advantages emerge due to using vacuum as a medium surrounding the vibration transducer. One of the most notable benefits is significant extension of the calibrated temperature range. A possibility of applying the algorithm for calibrating density meters in extreme temperatures is introduced. Furthermore, formulas for calculating the value of the oscillation period of the converter which account for temperature changes (thermal compensation period) are presented. The advantages of using second order polynomial with zero linear term as a calibration function are also provided. Methodology behind conducting the experiments, types of equipment and measuring instruments are described in detail. Resulting experimental data for vibration transducers made of three different metals is presented. The obtained data is analyzed, which led to a conclusion that application of suggested algorithm of thermal compensation of liquid and gases density meters' vibration transducers is feasible and expedient.

Vibrations transducer; density meter; additional temperature measurement error; thermal compensation algorithm; comparator fluid; calibration coefficients.

Введение. Дополнительная температурная погрешность является неотъемлемой характеристикой любого средства измерения и часто становится наибольшей составляющей полной погрешности прибора. В вибрационных плотномерх изготовленных из нержавеющей сталей или титана чувствительность к температуре может достигать $1 \text{ кг/м}^3/\text{°C}$, поэтому минимизация этого параметра является одной из основных задач при проектировании устройств.

Применяемые методы снижения влияния температуры на погрешность измерения можно условно разделить на две группы: минимизация температурной зависимости преобразователя вида энергии – пассивная термокомпенсация и коррекция полученных значений выходного сигнала или вычисленной измеряемой величины – активная термокомпенсация. С появлением микропроцессорной техники вторая группа получила новый мощный импульс в развитии. Постоянное снижение энергопотребления и повышение производительности микропроцессоров и периферии позволяет реализовывать всё более сложные математические методы и алгоритмы непосредственно внутри измерительных приборов. В настоящей статье речь пойдёт об одном из методов активной температурной коррекции вибрационных плотномеров.

В вибрационных плотномерх плотность жидкости или газа определяется по резонансной частоте некоторого тела (вибратора) взаимодействующего с измеряемой средой. По способу взаимодействия различают проточные и погружные вибропреобразователи плотности (ВПП). В проточных ВПП жидкость или газ протекают внутри резонатора и участвует в колебаниях как инертная масса. Как правило, это трубчатые ВПП, в которых возбуждение и измерение параметров осуществляется с помощью электромагнитной системы. В погружных ВПП вибратор помещается непосредственно в измеряемую среду, вовлекаемую в движение и действующую как некоторая «присоединённая масса» [1]. Величина этого воздействия зависит от плотности вещества, поэтому девиация частоты резонанса является параметром, по которому определяется плотность.

Высокая точность (до $0,1 \text{ кг/м}^3$), чувствительность, надёжность, индифферентность к типу и составу жидкости, широкий диапазон температур и давлений, а также лёгкая автоматизация процесса это метод измерения плотности одним из самых перспективных и востребованных.

Предлагаемый алгоритм термокомпенсации ВПП. Существуют различные типы математических моделей для калибровки ВПП по влияющему фактору [2–5]. Все модели требуют проведения измерений плотности на некоторых эта-

лонных жидкостях и газах в диапазоне изменения влияющего фактора. В случае термокомпенсации измерения проводятся во всём предполагаемом диапазоне температур измеряемых жидкостей. Анализ методик поверки и калибровки существующих погружных вибрационных плотномеров [6–9] показал, что в качестве измеряемых сред обычно используют жидкости с малой вязкостью и газы с известными свойствами в широком диапазоне температур и давлений, в частности, дистиллированную воду, нефтепродукты, спирты и чистый азот.

Как правило, общее уравнение плотности имеет вид [10–12]:

$$\rho = K0 + K1 \times \tau + K2 \times \tau^2, \quad (1)$$

где ρ – расчётная плотность, τ – период времени колебаний камертона, а $K0$, $K1$ и $K2$ калибровочные коэффициенты преобразования периода колебаний в плотность измеряемой среды.

При этом температурная коррекция вводится как:

$$\rho' = \rho \times (1 + K18 \times (T - 20) + K19 \times (T - 20)^2), \quad (2)$$

где ρ' – компенсированная по температуре величина плотности, T – температура измерений, а $K18$ и $K19$ – поправочные температурные коэффициенты.

Калибровочные коэффициенты преобразования периода в плотность вычисляются по значениям периода колебаний ВПП, измеренным в нескольких жидкостях-компараторах и плотностей этих жидкостей, измеренных эталонным плотномером. Обычно применяют три жидкости со значениями плотности, равномерно распределёнными по предполагаемому диапазону измерения. Для вычисления поправочных температурных коэффициентов проводят аналогичные измерения в нескольких точках предполагаемого температурного диапазона, но в этом случае матрица состоит уже из значений плотности жидкостей-компараторов измеренных ВПП эталонным плотномером и температур жидкостей, измеренной эталонным термометром. Для аппроксимации этой поверхности обычно используются полиномиальные или кусочно-линейные функции, принимая, что изменение аддитивной и мультипликативной составляющих погрешности от температуры имеет линейный характер во всём диапазоне температур или её частях. Рассчитанные коэффициенты заносятся в постоянную память прибора, либо промышленного контроллера, которые проводят измерение периода колебаний и температуры среды, а далее по формуле 1 и 2 вычисляют плотность.

Алгоритм типичного процесса калибровки и вычисления коэффициентов термокомпенсации представлен на рис. 1. Необходимым этапом представленного алгоритма является калибровка по эталонным жидкостям и проверка абсолютной погрешности измерения плотности Δ_p . Переход к процедурам термокомпенсации возможен только после достижения заданных параметров отклонения значений $\Delta_{кр}$, так как в процессе участвуют вычисленные значения плотности и их отклонения от истинных значений плотности эталонных жидкостей при различных температурах. На последнем этапе проверки вычисленных коэффициентов рекомендуется дополнительно проводить измерения на жидкостях отличных от использованных при калибровке. Представленный алгоритм отличается высокой трудоёмкостью, требует большого числа жидкостей-компараторов и значительных затрат времени работы оборудования, в том числе на проверочные операции. Кроме того применение воды ограничивает диапазон термокомпенсации областью положительных температур.

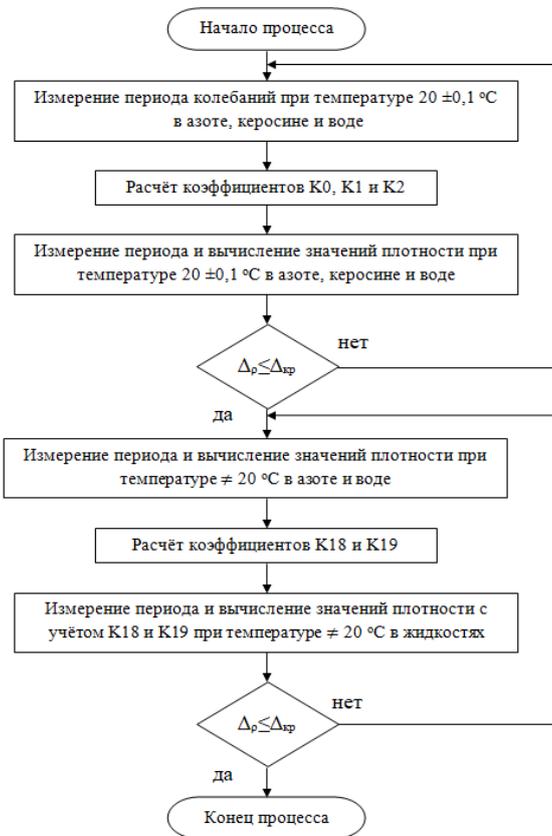


Рис. 1. Типичный алгоритм калибровки и термокомпенсации вибрационных плотномеров

Приведённые в [13] результаты моделирования выявили основные параметры, влияющий на изменение резонансной частоты ВПП от температуры: модуль упругости металла и его плотность. При этом влияние температурных изменений модуля Юнга на порядок превышает влияние остальных параметров. Основываясь на этой модели, можно предложить метод термокомпенсации не требующий проведение калибровки в жидкостях и газах во всём диапазоне температур. Предполагая изменение модуля упругости главным фактором, влияющим на изменение частоты колебаний ВПП с постоянной массой (без присоединённой массы), приходим к выводу о том, что температурные изменения резонансной частоты нужно фиксировать при нулевой плотности измеряемой среды. Поэтому предлагается проводить измерения периода резонансных колебаний в вакууме. В этом случае не требуется проводить калибровку по плотности до термокомпенсации, что даёт возможность существенно изменить алгоритм калибровки и расчёта коэффициентов, а именно, проводить калибровку по температуре до калибровки по плотности. Термокомпенсированный период колебаний может быть представлен как зависящая от температуры переменная в удобном для вычисления виде

$$\tau_T = \tau \times \sum_{i=0}^N K_{\tau i} (T - 20)^i, \quad (3)$$

где τ – измеренный период колебаний, τ_T – термокомпенсированный период колебаний, $K_{\tau i}$ – коэффициенты полинома, T – температура ВПП.

После компенсации влияния температурных свойств модуля упругости металла проводится калибровка по плотности жидкости-компаратора и воздуху при температуре $20 \pm 0,1$ °С. В качестве градуировочной функции применяется зависимость вида

$$\rho_{ж} = K2x^2 + K0, \quad (4)$$

где, $K2$ и $K0$ – некоторые константы, определяемые при калибровке в двух средах с известной плотностью [13].

Применение полинома второго порядка даёт возможность при калибровке применять только две среды с известной плотностью, одной из которых может быть воздух при атмосферном давлении. В качестве жидкости-компаратора удобно применять дистиллированную воду, поэтому не требуется проводить измерения плотности с помощью эталонного лабораторного плотномера. По измеренным значениям периода колебаний ВПП в дистиллированной воде и на воздухе определяются коэффициенты $K0$ и $K2$, после чего можно приступить к контрольным операциям. При вычислении значения плотности по формуле 4, итоговый алгоритм калибровки по температуре приобретает вид, представленный на рис. 2.

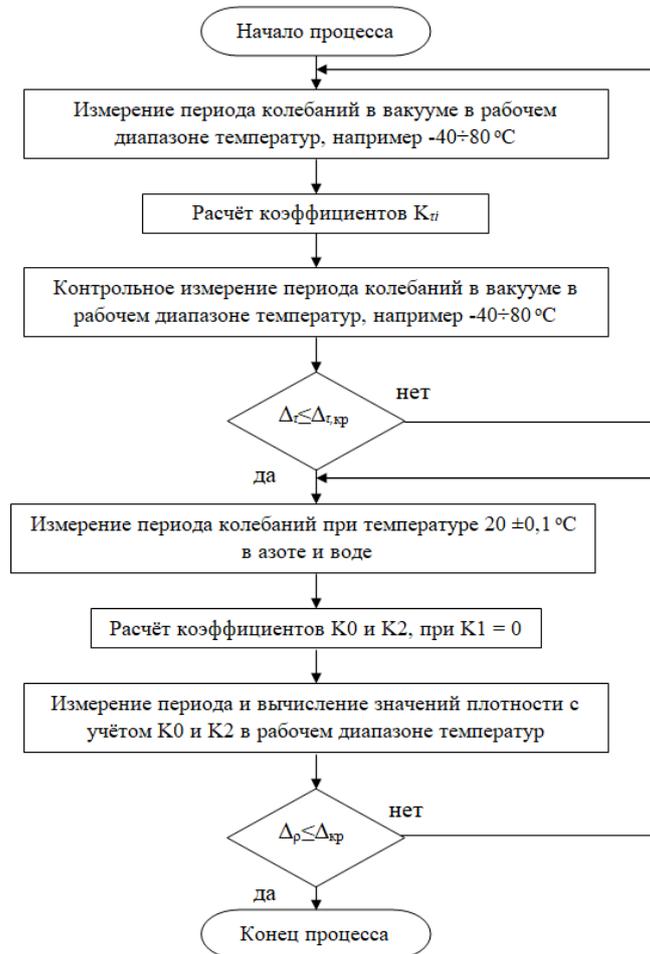


Рис. 2. Алгоритм калибровки вибрационных плотномеров по периоду колебаний ВПП

На первом шаге термокалибровки проводятся испытания исследуемого образца ВПП в вакууме. Для этого он монтируется в специальный сосуд, из которого выкачивается воздух. Далее вся конструкция устанавливается в климатическую камеру, где проходит весь цикл испытаний в требуемом диапазоне температур. В процессе термокалибровки ВПП проводятся измерения периода колебаний и температуры ВПП в температурных точках, расположенных через каждые 10 °С. Эти точки состояний формируют зависимость изменения периода колебаний от температуры, которая в общем случае может быть аппроксимирована различными методами. Наилучшим образом эта характеристика может быть описана полиномиальной функцией. Одним из главных преимуществ предлагаемого метода является существенное расширение диапазона температур термокалибровки, которые ограничены только термостойкостью ВПП, сосуда и линий связи. В частности таким способом проводилась калибровка ВПП диапазоне от минус 196 до 400 °С.

На втором шаге по измеренным значениям периода колебаний и температуры методом наименьших квадратов определяются коэффициенты полинома 3, которые заносятся в постоянную память прибора, после чего проводятся контрольные операции и измерения для подтверждения корректности проведённых расчётов и процедур записи.

После проведения контрольных операций и подтверждения расчётных характеристик проводится измерение периода колебаний ВПП при температуре $20 \pm 0,1$ °С в воздух и в дистиллированной воде. По измеренным характеристикам производится расчёт коэффициентов K_0 и K_2 .

Испытания. Для проведения термокомпенсации в соответствии с предложенным алгоритмом необходимо исключить влияние всех факторов, влияющих на частоту колебаний ВПП, кроме температуры, поэтому в качестве измеряемой среды используется вакуум. Исследуемые ВПП присоединяются к баллону испытательного стенда Т 804.100, представленного на рис. 3 [14], после чего из него выкачивается воздух.

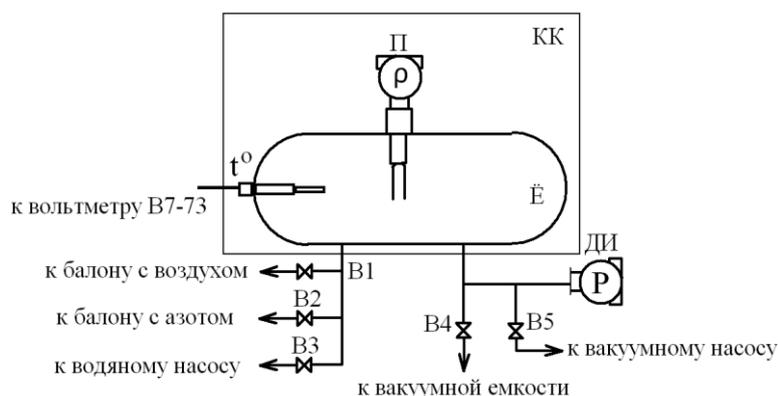


Рис. 3. Схема испытательного стенда Т 804.100

t° – термометр сопротивления; П – испытываемый плотномер 804; КК – камера климатическая (термокамера); Ё – ёмкость; В1 ÷ В5 – вентиль игольчатый ВД250; ДИ – датчик абсолютного давления.

Стенд состоит из баллона (Ё) объёмом 5 литров, выполненного из нержавеющей стали и выдерживающего давление до 20 МПа. В баллон вкручивается испытуемый ВПП и термометр сопротивления с погрешностью $\pm 0,05$ °С. Преобразование сопротивления термопреобразователя в температуру осуществляется при

помощи цифрового вольтметра в режиме измерения температуры. К баллону подключён датчик давления с диапазоном измерения от 0 до 16 МПа и линии закачки и сброса чистых газов и вакуума. Подключение линий давления к баллону производится через ручные краны высокого давления В1÷В5. Предусмотрена возможность создания в системе вакуума, подачи воздуха, чистого азота и дистиллированной воды.

Баллон с установленным ВПП и термометром помещается в климатическую камеру (КК) (рис. 4), а датчик давления и дополнительное оборудование вынесены за её пределы. Для испытаний применялась климатическая камера с внутренним объёмом 1,0 м³. Датчик давления подключён к одной из пневматических линий, как показано на рис. 3. Из баллона с помощью вакуумного насоса удаляется воздух и перекрывается кран В5. Проводится проверка герметичности системы по показаниям давления. В процессе испытаний в климатической камере задаётся требуемая температура и выдерживается до стабилизации показаний термометра, установленного в баллоне.



Рис. 4. Внешний вид установки и плотномеров в процессе испытаний.

После стабилизации показаний температуры на индикаторе контроллера климатической камеры режим выдерживают до момента стабилизации показаний встроенного в баллон термометра. Значения показаний термометра могут незначительно отклоняться от установленной температуры. Как правило разность значений не превышает $\pm 2,5$ °С. Измерения проводятся при температурах минус 50, 30, 10, плюс 10, 40, 60 и 80 °С. Возбуждение ВПП осуществлялось от генератора синусоидальных колебаний. Контроль сдвига фаз осуществляется при помощи осциллографа, а измерение периода колебаний – частотомера. Результаты измерений и аппроксимации приведены на рис. 5.

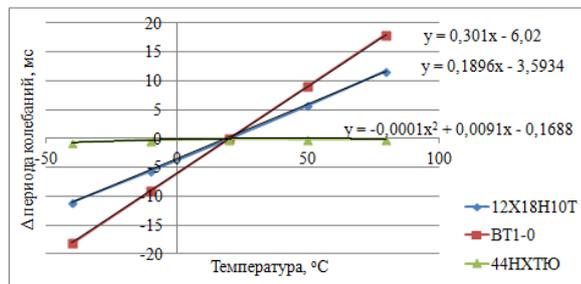


Рис. 4. Изменение периода колебаний экспериментальных образцов ВПП

Как и предполагалось в [13], наибольшее влияние температуры на частоту колебаний наблюдается у ВПП, изготовленного из титанового сплава ВТ1-0, что почти вдвое превышает изменение частоты у камертона из нержавеющей стали и примерно соответствует изменениям модуля упругости от температуры у этих металлов [15]. Следует отметить нелинейную зависимость частоты от температуры у ВПП, изготовленного из сплава со специальными свойствами модуля упругости, для аппроксимации которой потребовалось применение полинома третьей степени.

На следующем этапе испытаний необходимо получить значения коэффициентов преобразования периода колебаний в значение плотности. Для этого проводится калибровка по плотности эталонной жидкости и воздуху. Измерение периода колебаний в воздухе проводилось в климатической камере при температуре 20 °С. Для калибровки по жидкости применялся стенд, представленный на рис. 6, а в качестве жидкости-компаратора использовалась дистиллированная вода [16].

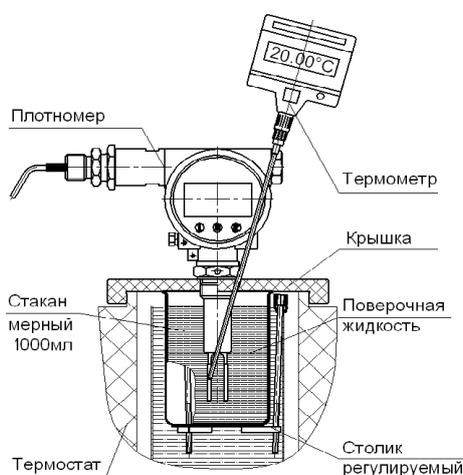


Рис. 5. Схема стенда для проверки плотномера жидкостями-компараторами

Для проверки корректности предложенного алгоритма термокомпенсации и калибровки после расчёта калибровочных коэффициентов проводились контрольные измерения периода резонансных колебаний исследуемых образцов ВПП в жидкостях компараторах при температурах 10, 30 и 40 °С. По значениям периода и температуры ВПП, а также полученных ранее коэффициентов, вычислялась плотность измеряемых сред. Выбранный диапазон температур обусловлен техническими характеристиками лабораторного плотномера, который использовался в качестве эталонного средства измерений.

Термокалибровочные коэффициенты представлены в табл. 1, результаты измерений характеристик ВПП из стали 12Х18Н10Т приведены в табл. 2 [17–20].

Таблица 1

Рассчитанные термокалибровочные коэффициенты ВПП.

Коэффициенты	ВПП №001	ВПП №002	ВПП №003
$K_{\tau 0}$	1	1	1
$K_{\tau 1}$	-2.12363E-4	-3,84220E-4	-4.38981E-6
$K_{\tau 2}$	0	0	1.75404E-7
$K_{\tau 3}$	0	0	-1.28357E-9

Таблица 2

**Погрешность измерения плотности жидкостей и воздуха ВПП №001
в диапазоне температур от 10 до 40 °С.**

Наименование среды	t, °С	ρ_0 , кг/м ³	τ , МКС	ρ , кг/м ³	Δ , кг/м ³	τ_t , МКС	ρ_t , кг/м ³	Δ_t , кг/м ³
Воздух	10	1,2	951,844	-4,1	-5,3	953,865	1,4	0,1
	20	1,2	953,816	1,2	0,0	953,816	1,2	0,0
	30	1,2	955,818	6,6	5,5	953,788	1,2	0,0
	40	1,1	957,880	12,2	11,1	953,811	1,2	0,1
Нефрас	10	698,6	1181,523	690,3	-8,3	1184,032	698,7	0,1
	20	689,9	1181,443	690,0	0,1	1181,443	690,0	0,1
	30	681,4	1181,507	690,2	8,8	1178,998	681,8	0,4
	40	672,3	1181,274	689,4	17,1	1176,257	672,7	0,4
Спирт	10	826,2	1218,817	817,1	-9,1	1221,406	826,1	-0,1
	20	817,7	1218,955	817,6	-0,1	1218,955	817,6	-0,1
	30	808,7	1219,032	817,9	9,2	1216,443	808,9	0,2
	40	799,6	1218,763	816,9	17,3	1213,587	799,1	-0,5
ПМС - 10	20	932,6	1251,744	932,4	-0,2	1251,744	932,4	-0,2
	30	922,8	1251,518	931,6	8,9	1248,861	922,2	-0,6
	40	914,4	1251,893	932,9	18,6	1246,576	914,1	-0,3
Вода	10	999,7	1267,925	990,2	-9,6	1270,617	999,9	0,1
	20	998,2	1270,145	998,2	-0,1	1270,145	998,2	-0,1
	30	995,7	1272,136	1005,3	9,7	1269,435	995,6	0,0
	40	992,2	1273,823	1011,4	19,2	1268,413	991,9	-0,3

Выводы. Анализ полученных результатов показывает, что:

- ◆ температурные зависимости образцов из стали 12Х18Н10Т и титана ВТ1-0 соответствуют модели ВПП, а наименьшие отклонения периода колебаний наблюдаются у образцов из сплава 44НХТЮ;

- ◆ наименьшие отклонения плотности вычисленной по предложенному алгоритму от измеренной лабораторным плотномером (принимаем эталонным) в диапазоне температур от 10 до 40 °С наблюдаются у ВПП, изготовленного из сплава 44НХТЮ (элинвар) и не превышает $\pm 0,3$ кг/м³;

- ◆ отклонения значений плотности, вычисленной по предложенному алгоритму от измеренной лабораторным плотномером в диапазоне температур от 10 до 40 °С у ВПП, изготовленных из нержавеющей стали и титанового сплавов, близки и не превышает $\pm 1,0$ кг/м³;

- ◆ полученные данные измерений полностью подтверждают возможность применения предложенного алгоритма термокомпенсации и калибровки ВПП.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Маловичко М.Ф., Анисеев А.А., Ткаченко В.А. Использование эффекта присоединённой массы для измерения плотности растворов // Известия Томского политехнического института им. С.М. Кирова. – 1970. – Т. 184.
2. Outcalt C.D. Holcomb and S.L. A theoretically based calibration and evaluation procedure for // Fluid Phase Equilib. – 1998. – Vol. 150/151. – P. 815-827.
3. Bouchot C., and Richon D. An enhanced method to calibrate vibrating tube densimeters // Fluid Phase Equilib. – 2001. – Vol. 191. – P. 189-208.
4. Comiñas María J.P. Density of Diethyl Adipate using a New Vibrating Tube Densimeter from (293.15 to 403.15) K and up to 140 MPa. Calibration and Measurements // J. Chem. Eng. – 2008. – Vol. 53. – P. 986-994.

5. *Al, José J. Segovia et. Automated densimetric system: Measurements and uncertainties for compressed fluids // J. Chem. Thermodynamics. – 2009. – Vol. 41. – P. 632-638.*
6. Преобразователи плотности и вязкости жидкости измерительные моделей 7825, 7826, 7827, 7828, 7829. Описание типа средства измерений №26331/1.
7. Плотномеры вибрационные Liquiphant M Density. Описание типа средства измерений №35819.
8. Плотномеры 804. Описание типа средства измерений №44065.
9. Плотномеры 804. Методика поверки МП.
10. Жуков Ю.П. Вибрационные плотномеры. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 144 с.
11. Техническое руководство – Цифровой вискозиметр модель 7829 - Solartron mobrey, 2002 г.
12. Преобразователи плотности жидкости измерительные Micro Motion 7835/45/47. Руководство по установке и настройке конфигурации. ММІ-20018786, Ред. АА, 2011. – 150 с.
13. Бозуш М.В., Зацерклянный О.В., Пикалев Э.М. Моделирование вибрационного датчика плотности методом конечных элементов // Датчики и системы. – 2018. – № 10. – С. 8-13.
14. Зацерклянный О.В. Вибрационные плотномеры газов и жидкостей для продукции газоконденсатных скважин // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2011. – № 2. – С. 9-13.
15. Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М. и др. Физические величины: Справочник / под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
16. ГОСТ 6709-72. Вода дистиллированная. Технические условия. – М.: Стандартиформ, 2007. – 12 с.
17. ГСССД 8-79 Воздух жидкий и газообразный. Плотность, энтальпия, энтропия и изобарная теплоёмкость при температурах 70–1500 К и давлениях 0,1...100 МПа. Таблицы стандартных справочных данных. – 10 с.
18. ГСССД 187-99 Вода. Удельный объем и энтальпия при температурах 0...1000 °С и давлениях 0,001...1000 МПа. Таблицы стандартных справочных данных. – 41 с.
19. ГОСТ 443-76. Нефрасы С2-80/120 и С3-80/120. Технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 7 с.
20. ГОСТ 13032-77. Жидкости полиметилсилоксановые. Технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1997. – 17 с.

REFERENCES

1. *Malovichko M.F., Anikeev A.A., Tkachenko V.A. Ispol'zovanie effekta prisoedinennoy massy dlya izmereniya plotnosti rastvorov [The use of the attached mass effect for measuring the density of solutions], Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo instituta im. S.M. Kirova [Proceedings of the Tomsk Polytechnic Institute named after S. M. Kirov], 1970, Vol. 184.*
2. *Outcalt C.D. Holcomb and S.L. A theoretically based calibration and evaluation procedure for, Fluid Phase Equilib, 1998, Vol. 150/151, pp. 815-827.*
3. *Bouchot C., and Richon D. An enhanced method to calibrate vibrating tube densimeters, Fluid Phase Equilib, 2001, Vol. 191, pp. 189-208.*
4. *Comiñas María J.P. Density of Diethyl Adipate using a New Vibrating Tube Densimeter from (293.15 to 403.15) K and up to 140 MPa. Calibration and Measurements, J. Chem. Eng., 2008, Vol. 53, pp. 986-994.*
5. *Al, José J. Segovia et. Automated densimetric system: Measurements and uncertainties for compressed fluids, J. Chem. Thermodynamics, 2009, Vol. 41, pp. 632-638.*
6. *Preobrazovateli plotnosti i vyazkosti zhidkosti izmeritel'nye modelely 7825, 7826, 7827, 7828, 7829. Opisanie tipa sredstva izmereniy №26331/1 [Liquid density and viscosity transducers measuring models 7825, 7826, 7827, 7828, 7829. Description of the type of measuring instrument No. 26331/1].*
7. *Plotnomery vibratsionnye Liquiphant M Density. Opisanie tipa sredstva izmereniy №35819 [The Liquiphant M density meter the vibrating Density. Description of the type of measuring instrument No. 35819].*
8. *Plotnomery 804. Opisanie tipa sredstva izmereniy №44065 [Density meters 804. Description of the type of measuring instrument No. 44065].*
9. *Plotnomery 804. Metodika poverki MP [Density meters 804. Method of checking MP].*
10. *Zhukov Yu.P. Vibratsionnye plotnomery [Vibrational density meters]. Moscow: Energoatomizdat, 1991, 144 p.*

11. Tekhnicheskoe rukovodstvo – TSifrovoy viskozimetr model' 7829 - Solartron mobrey, 2002 g. [Technical Manual-Digital Viscometer model 7829-Solartron mobrey, 2002].
12. Preobrazovateli plotnosti zhidkosti izmeritel'nye Micro Motion 7835/45/47. Rukovodstvo po ustanovke i nastroyke konfiguratsii. MMI-20018786, Red. AA, 2011 [Liquid density transmitters measuring Micro Motion 7835/45/47. Installation and Configuration guide. MMI-20018786, Ed. AA, 2011], 150 p.
13. Bogush M.V., Zatserklyannyy O.V., Pikalev E.M. Modelirovanie vibratsionnogo datchika plotnosti metodom konechnykh elementov [Modeling of a vibration density sensor by the finite element method], *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems], 2018, No. 10, pp. 8-13.
14. Zatserklyannyy O.V. Vibratsionnye plotnomery gazov i zhidkostey dlya produktsii gazokondensatnykh skvazhin [Vibrational density meters of gases and liquids for the production of gas-condensate wells], *Avtomatizatsiya, telemekhanizatsiya i svyaz' v neftyanoy promyshlennosti* [Automation, telemechanization and communication in the oil industry], 2011, No. 2, pp. 9-13.
15. Babichev A.P., Babushkina N.A., Bratkovskiy A.M. i dr. Fizicheskie velichiny: Spravochnik [Physical quantities: Handbook], ed.by I.S. Grigor'eva, E.Z. Meylikhova. Moscow: Energoatomizdat, 1991, 1232 p.
16. GOST 6709-72. Voda distillirovannaya. Tekhnicheskie usloviya [GOST 6709-72. Distilled water. Technical conditions]. Moscow: Standartinform, 2007, 12 p.
17. GSSSD 8-79 Vozdukh zhidkiy i gazoobraznyy. Plotnost', ental'piya, entropiya i izobarnaya teploemkost' pri temperaturakh 70–1500 K i davleniyakh 0,1...100 MPa. Tablitsy standartnykh spravochnykh dannykh [GSSSD 8-79 Liquid and gaseous air. Density, enthalpy, entropy and isobaric heat capacity at temperatures of 70-1500 K and pressures of 0.1 ... 100 MPa. Tables of standard reference data], 10 p.
18. GSSSD 187-99 Voda. Udel'nyy ob'em i ental'piya pri temperaturakh 0...1000 °S i davleniyakh 0,001...1000 MPa. Tablitsy standartnykh spravochnykh dannykh [GSSSD 187-99 Water. Specific volume and enthalpy at temperatures 0 ... 1000 With and pressures of 0.001...1000 MPa. Tables of standard reference data], 41 p.
19. GOST 443-76. Nefrasy S2-80/120 i S3-80/120. Tekhnicheskie usloviya [GOST 443-76. Oil solvent S2-80/120, and C3-80/120. Technical conditions]. Moscow: Izd-vo standartov, 1988, 7p.
20. GOST 13032-77. Zhidkosti polimetilsiloksanovye. Tekhnicheskie usloviya [GOST 13032-77. Polymethylsiloxane liquids. Technical conditions]. Moscow: Izd-vo standartov, 1997, 17 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Ю.К. Шелковников.

Зацерклянный Олег Владимирович – НКТЬ "Пьезоприбор" лаборатория 2.6, Южный федеральный университет; e-mail: ZaOleg2003@rambler.ru; Ростов-на-Дону, Россия; тел.:+79287617874; инженер.

Zatserklyanyi Oleg Vladimirovich – SCTB "Piezopribor", laboratory 2.6, Southern Federal University; e-mail: ZaOleg2003@rambler.ru; Rostov-on-Don, Russia; phone: +79287617874; engineer.

УДК 621.373.52

DOI 10.18522/2311-3103-2020-6-189-196

А.Н. Зикий, А.С. Кочубей

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕТЕРОДИННОГО МОДУЛЯ

Гетеродины являются неотъемлемой составной частью любого супергетеродинного приёмника. Именно они определяют стабильность и точность настройки приёмника. Целью данной работы является создание гетеродинного модуля с улучшенными электрическими параметрами, с малыми габаритами и массой. Объектом исследования является пятиканальный гетеродин сантиметрового диапазона волн. Такой гетеродин можно использовать в многоканальном супергетеродинном приёмнике обнаружения сигналов. Проведено экспериментальное исследование двух каналов пятиканального гетеродина – верхнего и нижнего по частоте настройки. Представлены результаты в виде кривых выбега частоты за полчаса работы после включения, а также спектры выходных сигналов в