

# МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ, ДАВЛЕНИЯ И ДЕФОРМАЦИЙ НА УСТАНОВКАХ, РАБОТАЮЩИХ С ИЗОТОПАМИ ВОДОРОДА

*М. В. Логинов, А. Н. Дмитриенко, Д. Т. Ситдиков, С. В. Фильчагин,  
О. П. Вихлянцев, М. В. Казимов, А. А. Юхимчук*

РФЯЦ – Всероссийский НИИ экспериментальной физики,  
607188, г. Саров, Нижегородская обл., Россия

## 1. Введение

За последние годы уровень измерительной техники получил значительное развитие. На смену большим и массивным измерительным, усиливающим, питающим и отображающим экспериментальные данные устройствам, включающим в свой состав разного рода осциллографы и самописцы, пришли устройства, имеющие не только небольшие размеры, но и высокую степень функциональности. Такими устройствами являются аналого-цифровые преобразователи (АЦП), используемые совместно со стационарными персональными компьютерами или ноутбуками.

Кроме того, современные темпы научно-технического прогресса предъявляют все возрастающие требования к точности измерительной и контрольной аппаратуры. При этом речь идет не только об эталонах и образцовых средствах измерения, но и об аппаратуре, непосредственно применяемой в экспериментах. Поэтому во многих случаях приходится использовать предельные возможности методов и средств измерения. В этих ситуациях правильная оценка точности имеющихся средств измерений и правильное обоснование требуемой точности измерения имеют важное значение.

Нами были разработаны методики выполнения измерений (МВИ) температуры давления и деформации:

«Измерение температуры твердых тел, порошковых материалов и жидкостей термopарами типа К и тип L»;

«Измерение температуры твердых тел, порошковых материалов и жидкостей термометрами сопротивления»;

«Измерение избыточного давления газовых смесей и жидкостей»;

«Измерение относительной деформации с помощью тензорезисторов».

При разработке методик произведен расчет погрешностей измерений температуры давления и деформации типовыми измерительными каналами при нормальных условиях. Проведен большой объем аттестационных измерений для подтверждения метрологических характеристик.

По результатам работ МВИ прошли метрологическую аттестацию для их применения в нормальных условиях.

## 2 Состав измерительных систем и характеристики используемого оборудования

Измерительные системы представлены в виде двух подсистем:

- подсистема «медленных» измерений (частота опроса 0,5 Гц на канал измерения);
- подсистема «быстрых» измерений (частота опроса до 1000 Гц на канал измерения).

Подсистема «медленных» измерений разработана на базе модулей аналогового и цифрового ввода/вывода ICP DAS серии I-7000. Питание модулей осуществляется от блока питания с выходным напряжением 24 В. Модули объединяются в локальную сеть двухпроводной линией связи в стандарте RS-485. Данные на компьютер поступают через стандартный порт RS-232 посредством преобразователя интерфейса RS-485 в RS-232.

Подсистема «быстрых» измерений предназначена для регистрации быстро изменяющихся процессов с частотой опроса до 1000 Гц на канал. Подсистема разработана на базе преобразователя напряжения измерительного Е14. Управление работой и питание преобразователя Е14 осуществляются от персонального компьютера, подключение к которому обеспечивается посредством стандартного интерфейса USB.

Типовые каналы измерения температуры термомпарами (ТП) и термометрами сопротивления (ТС) приведены на рис. 1 и 2 соответственно. На рисунке 3 представлена схема измерения давления датчиками типа AP и WIKA. Типовые каналы измерения относительных деформаций тензорезисторами представлена на рис. 4.

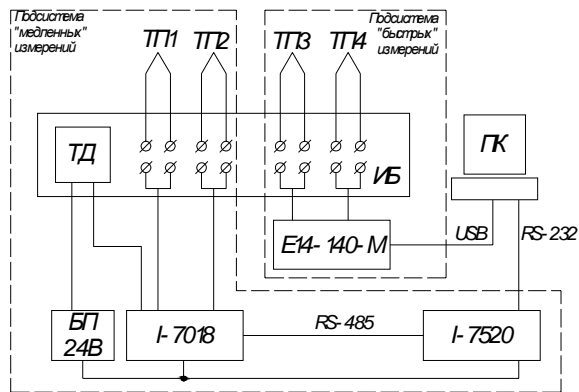


Рис. 1. Структурная схема каналов измерения температуры термомпарами: ТП1, ТП2, ТП3, ТП4 – термомпары; ИБ – измерительный блок температуры холодного спая термомпар; ТД – температурный датчик; БП 24 В – блок питания модулей Метран – 602М; I-7018 – 8-канальный модуль аналогового ввода; I-7520 – преобразователь RS-485/RS-232; ПК – персональный компьютер; E14-140-M – преобразователь напряжения измерительный

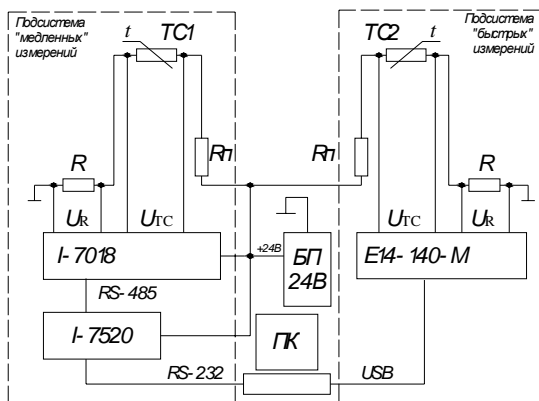


Рис. 2. Структурная схема каналов измерения температуры термометрами сопротивления: TC1, TC2 – термометры сопротивления; БП 24 В – блок питания модулей; I-7018 – 8-канальный модуль аналогового ввода; I-7520 – преобразователь RS-485/RS-232; ПК – персональный компьютер; E14-140-M – преобразователь напряжения измерительный; Rp, R – резисторы С2-29ВОЖО.467.130ТУ

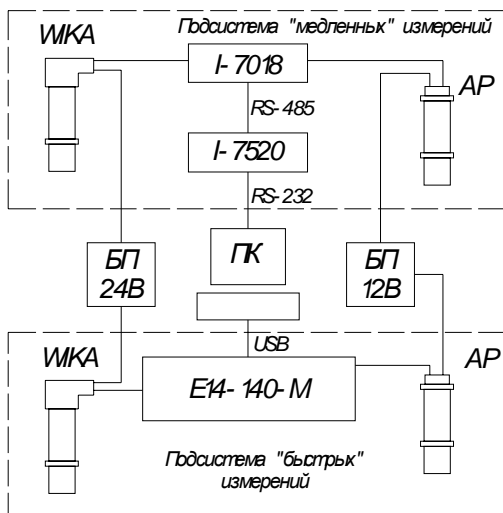


Рис. 3. Структурная схема каналов измерения давления: AP и WKA – датчики давления типа AP и WKA; I-7018 – 8-канальный модуль аналогового ввода; I-7520 – преобразователь RS-485/RS-232; E14-140-M – преобразователь напряжения измерительный; БП 12В - блок питания Метран-604М; БП 24В – блок питания Mean Well DR-120-24

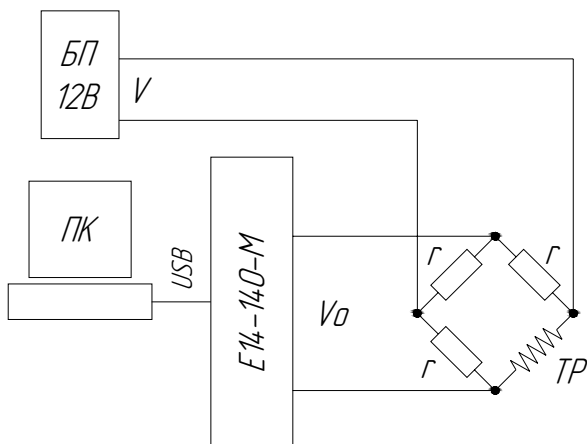


Рис. 4. Структурная схема канала измерения относительной деформации: ТР – тензорезистор; БП 12 В – блок питания измерительного моста Метран-602М; ПК – персональный компьютер; Е14-140-М – преобразователь напряжения измерительный;  $V_0$  – напряжение, возникающее за счет разбалансировки измерительного моста;  $V$  – напряжение питания тензометрического моста, 12 В; USB – интерфейс передачи данных

### 3. Описание структуры измерительных каналов

Термопары подключаются к клеммам измерительного блока (см. рис. 1). В измерительном блоке установлен температурный датчик для фиксирования температуры холодных спаев. Термо-ЭДС регистрируется модулями многоканального аналогового ввода I-7018 и измерительным преобразователем напряжения Е14. На модуль I-7018, так же, подается сигнал с температурного датчика. Компенсация холодного спая производится программно. Персональный компьютер (ПК) с помощью программного пакета CRW-DAQ осуществляет обработку, представление и длительное хранение результатов измерений.

Подключение ТС осуществляется по 4-х проводной схеме (см. рис. 2). Сопротивление  $R$  является опорным, напряжение на котором позволяет найти сопротивление на ТС. Сопротивления  $R_{ТС}$  и  $R$  соединены последовательно, поэтому имеет место равенство:

$$I = \frac{U_{ТС}}{R_{ТС}} = \frac{U_R}{R}, \quad (1)$$

где  $I$  – ток в цепи, А;  $R_{ТС}$  – сопротивление ТС, Ом;  $U_{ТС}$  – напряжение на ТС, В;  $R$  – опорное сопротивление, Ом;  $U_R$  – напряжение на сопротивлении  $R$ , В.

Из этого равенства выразим  $R_{ТС}$ :

$$R_{ТС} = \frac{U_{ТС}}{U_R} R. \quad (2)$$

Значение тока в цепи (см. рис. 2) равно:

$$I = \frac{U_{\text{пит}}}{R_{\text{ТС}} + R_{\text{п}} + R}, \quad (3)$$

где  $U_{\text{пит}}$  – напряжение питания, В;  $R_{\text{п}}$  – понижающее сопротивление, Ом.

Сопротивление  $R_{\text{п}}$  подбирается так, чтобы при максимальном измеряемом сопротивлении ТС ( $R_{\text{ТС}}^{\text{max}}$ ) напряжение на нем соответствовало пределу измерения АЦП ( $\Pi$ ). Учитывая уравнения (1) и (3):

$$R_{\text{п}} = \frac{R_{\text{ТС}}^{\text{max}} U_{\text{пит}}}{\Pi} - R_{\text{ТС}}^{\text{max}} - R, \quad (4)$$

где  $R_{\text{ТС}}^{\text{max}}$  – максимальное измеряемое сопротивление ТС, Ом;  $\Pi$  – предел измерения АЦП, В.

Предел измерения АЦП выбирается из учета наименьшей величины силы тока в цепи, чтобы исключить саморазогрев ТС.

Измерение давления производится с помощью датчиков давления типа АР и WKA (см. рис. 3). Чувствительный элемент датчика давления АР представляет собой полый цилиндр. На внешней поверхности чувствительного элемента наклеены фольговые тензорезисторы, соединенные между собой в мостовую схему; используемые тензорезисторы являются термокомпенсированными в диапазоне температур от плюс 10 до плюс 120 °С. Деформирование чувствительного элемента происходит непосредственно под действием давления среды, находящейся во внутренней полости элемента. Чувствительный элемент датчика давления АР выполняется из водородостойкого материала (сплав ЭИ787-ВД).

Действие датчика давления WKA (модель S-10 и IS-20-H) основано на принципе упругой деформации чувствительного элемента. Измеряемое давление воздействует на мембрану чувствительного элемента, на которую нанесен тензорезистивный элемент. Под воздействием измеряемого давления мембрана деформируется, что приводит к изменению электрического сопротивления тензорезистивного элемента, которое в электронном модуле усиливается и преобразуется в унифицированный аналоговый выходной сигнал.

Измерение относительной деформации производится косвенным методом, при этом в качестве первичного источника преобразования применяется тензорезистор, действие которого основано на изменении активного электрического сопротивления металлической решетки тензорезистора при ее деформировании (растяжении или сжатии).

Для измерения относительной деформации используется четверть-мостовая схема подключения тензорезисторов.

Относительная деформация  $\varepsilon$  (мкм/м) связана с изменением сопротивления тензорезистора  $\Delta R$  (Ом), подключенного по схеме, указанной на рис. 4, выражением:

$$\varepsilon \cdot 10^6 = \frac{\Delta R}{Rk}, \quad (5)$$

где  $R$  – номинальное сопротивление тензорезистора, Ом;  $k$  – коэффициент тензочувствительности,  $\frac{\text{Ом/Ом}}{\text{мкм/м}}$ .

Измеряемое модулем E14-140-M выходное напряжение (напряжение разбалансировки) с измерительного моста связано с изменением сопротивления тензорезистора уравнением:

$$V_0 = \frac{\Delta R V}{4R}, \quad (6)$$

где  $V$  – напряжение питания моста, В.

Зависимость относительной деформации от выходного сигнала с измерительного моста:

$$\varepsilon \cdot 10^6 = \frac{4V_0}{Vk}, \quad (7)$$

Обратная зависимость:

$$V_0 = \frac{\varepsilon \cdot 10^6 Vk}{4}. \quad (8)$$

#### 4. Теоретические (расчетные) характеристики МВИ

Погрешность измерения температуры термопарой типа К (хромель-алюмель) представлена на рисунке 4. Графики для  $\delta_{\text{апп}} = 0,1\%$ ,  $\Pi = 100$  мВ (канал «медленных» измерений) и  $\delta_{\text{апп}} = 0,5\%$ ,  $\Pi = 150$  мВ (канал «быстрых» измерений) для термопары типа К представлены на рис. 1.

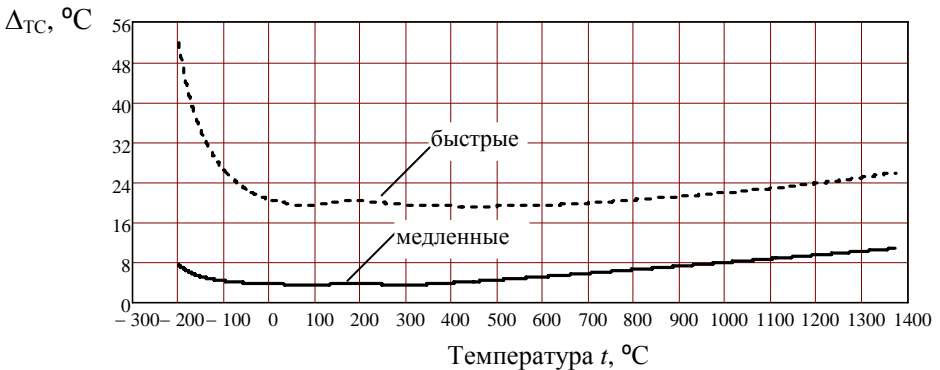


Рис. 5. Погрешность измерения температуры термопарами типа К и в подсистеме «медленных» измерений

На рис. 6 и 7 приведены графики зависимости погрешности измерения температуры различными типами платиновых ТС от измеренного значения

температуры в подсистеме «медленных» и «быстрых» измерений соответственно.

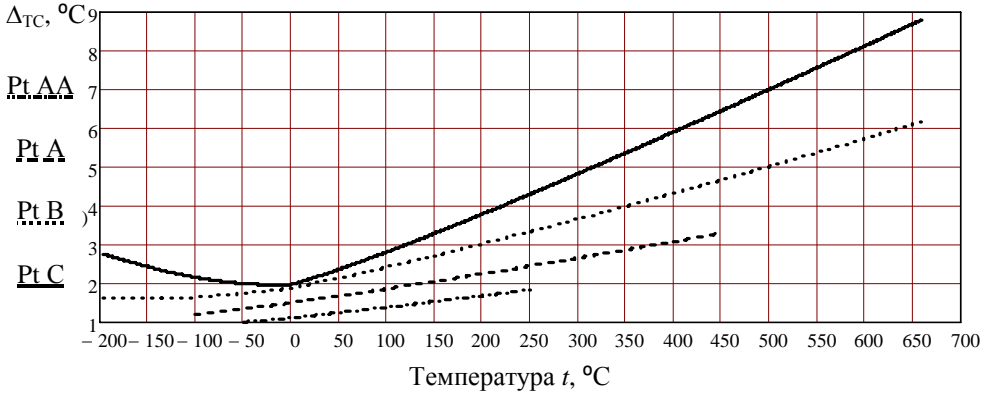


Рис. 6. Погрешность измерения температуры платиновыми термометрами сопротивления различных типов (типы AA, A, B, и C) в подсистеме «медленных» измерений

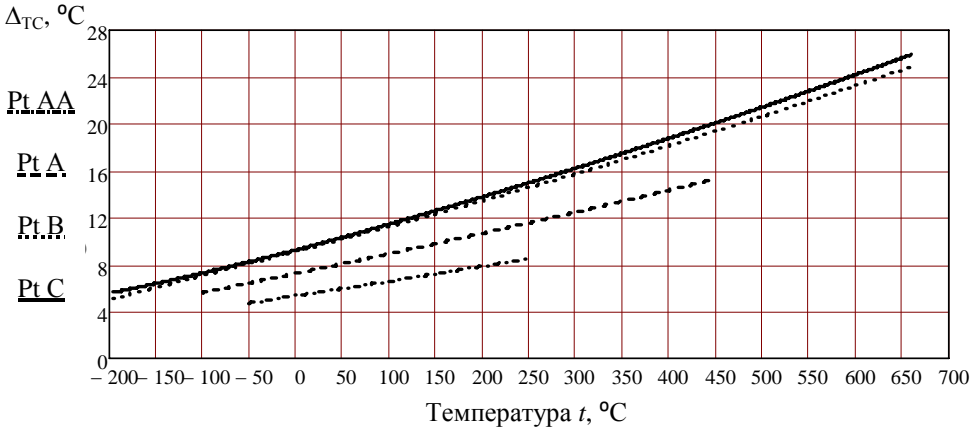


Рис. 7. Погрешность измерения температуры платиновыми термометрами сопротивления различных типов (типы AA, A, B, и C) в подсистеме «быстрых» измерений

Абсолютную погрешность измерения давления определяли по формуле:

$$\Delta_P = \frac{1,1P_{\text{пр}}}{100} \sqrt{\delta_d + \left( \delta_{\text{аип}} \frac{\Pi}{\Delta U} \right)^2}. \quad (9)$$

где –  $P_{\text{пр}}$  – верхний предел измерения датчика давления, МПа;  $\delta_d$  – предел допускаемой основной приведенной погрешности датчика давления;  $\delta_{\text{аип}}$  – предел допускаемой основной приведенной погрешности измерений напряжения постоянного тока в диапазоне, %;  $\Pi$  – предел диапазона измерения АЦП, мВ;  $\Delta U$  – максимальная величина выходного сигнала датчика давления, мВ.

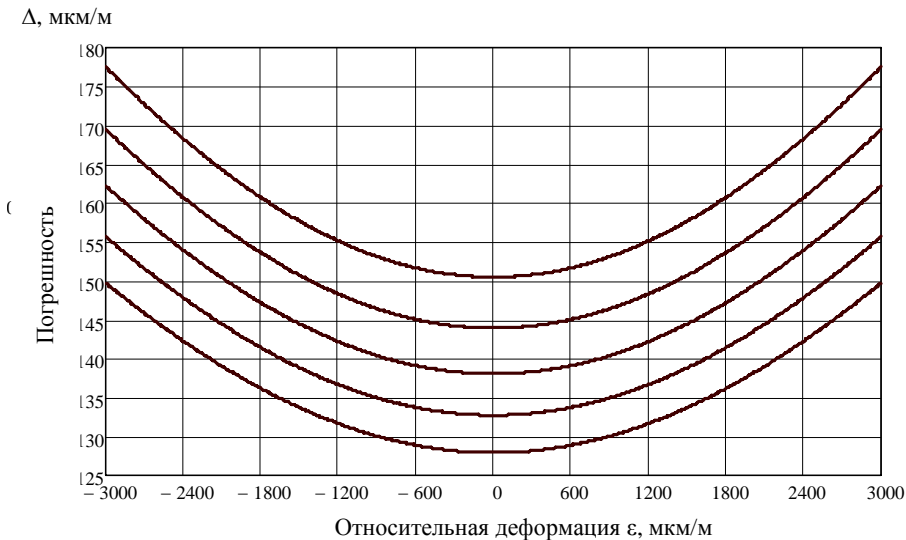


Рис. 8. Погрешность измерения относительных деформаций

## 5. Исследование показателей точности

Экспериментальные исследования показателей точности МВИ проводились при следующих условиях:

- температура окружающего воздуха  $(20 \pm 5)$  °С;
- относительная влажность воздуха от 30 до 80 %;
- атмосферное давление от 83990 Па (630 мм рт.ст.) до 106654 Па (800 мм рт.ст.);
- напряжение сетевого питания  $(220 \pm 22)$  В с частотой  $(50 \pm 1)$  Гц.

Исследования проводились для аттестации методик выполнения измерений

Цель исследования заключалась в наборе статистических данных для определения случайной составляющей погрешности измерений.

Вместо первичного источника преобразования (термопары типа К и типа L) использовался компаратор напряжений типа Р3003. Выход электрического сигнала компаратора напряжений подключался к клеммам измерительного блока (ИБ). На компараторе напряжений задавались значения номинальных статистических характеристик соответствующих преобразователей по ГОСТ Р.8.585-2001 «Термопары. Номинальные статистические характеристики преобразования». ПК с помощью программного пакета осуществлял обработку, представление и длительное хранение результатов измерений.

Вместо ТС использовался магазин сопротивлений ММЭСР 3026 с классом точности 0,005 и ценой деления 0,001 Ом. На магазине сопротивления задавалось значение номинальных статистических характеристик соответствующих типов термометров сопротивления по ГОСТ Р.8.625 – 2006 «Термометры сопротивления из платины меди и никеля. Общие технические требования и методы испытаний».



Градуировка измерительных каналов давления и последующие многократные нагружения, для набора необходимых статистических данных, проводились с использованием грузопоршневого манометра WIKA CPB5000HP (погрешность 0,025 % от измеренной величины, диапазон измерений 2,5...400 МПа) в качестве эталонного устройства создания избыточного давления.

Для исследования каналов измерения относительной деформации вместо первичного измерительного преобразователя использовался магазин сопротивлений МСР-63.

### **Выводы**

В ходе проведенных работ произведен расчет метрологических характеристик измерительных каналов температуры (термопарами типа *K* и *L* и термометрами сопротивления), давления и деформации. Проведены исследования показателей точности измерительных каналов.

По результатам данных работ проведена аттестация методик измерения температуры, давления и деформации.