

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ
ИНДИВИДУАЛЬНЫХ
МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК
ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ ТИПА
"САПФИР"

*В.И. Забурдаев, В.Ж. Мишуков,
К.А. Кузьмин, А.П. Алексеев*

Морской гидрофизический институт
НАН Украины
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: oaoi@alpha.mhi.iuf.net

Исследованиями установлено, что использование индивидуальных метрологических характеристик тензометрических датчиков давления "САПФИР", современной микроэлектроники и алгоритмической коррекции температурной погрешности возможно создание измерителей давления с погрешностью (0,03 – 0,05) % в диапазоне температур от 0 до 35 °С при паспортной температурной погрешности датчиков 0,4 % / 10 °С.

Введение. В гидрофизических зондирующих измерительных комплексах глубина погружения прибора определяется по гидростатическому давлению и плотности воды. Плотность воды в свою очередь измеряется косвенно по температуре, солености и давлению, в связи с чем к точности измерения давления предъявляются высокие требования. Эти требования ужесточаются тем, что диапазон изменчивости окружающей температуры лежит в пределах от минус 2 до 35 °С, а скорость изменения температуры при зондировании (например, в Черном море) при вертикальном градиенте температуры (3÷5) °С/м и скорости зондирования 1м/с составляет (3÷5) °С/с. Уменьшение дополнительной как статической, так и динамической температурной погрешности путем пассивного или активного термостатирования чувствительного элемента датчика давления приводит к увеличению габаритов конструкции зонда или к повышению энергопотребления, что нежелательно для малогабаритных (и особенно с автономным питанием) устройств.

В связи с этим наиболее широкое применение для измерения давления в гидрофизических зондирующих приборах получили термостабильные, но достаточно до-

рогие кварцевые (частотные) датчики давления с классом точности $0,01 \pm 0,06$ и сравнительно недорогие тензометрические датчики типа "кремний на сапфире" (КНС). Достоинство последних заключается в возможности непосредственного измерения температуры тензочувствительного элемента в любой момент времени. Именно этот факт позволяет алгоритмически скомпенсировать влияние температуры на метрологические характеристики измерителя давления, а современная микроэлектроника на базе контроллеров, процессоров и многоканальных аналого-цифровых преобразователей позволяет реализовать недорогое и малогабаритное параметрически инвариантное устройство для измерения гидростатического давления с неисключенной приведенной погрешностью не более 0,1 %.

В литературе достаточно много уделено внимания повышению точности измерения давления с помощью типовых тензометрических преобразователей типа КНС-структуры "САПФИР" (см., например, [1–3]).

В работе [3] представлен один из возможных вариантов построения схемы измерителя давления и априорный обобщенный алгоритм обработки информации без проведения экспериментальных исследований и оценки неисключенной погрешности измерения давления с учетом коррекции дополнительной температурной погрешности. Приведенный материал дает общее представление о подходе к коррекции дополнительной погрешности, но не дает возможности разработчикам выявить тонкости отдельных моментов как при создании схемы измерения, так и при разработке алгоритма обработки информации.

В настоящей работе более подробно рассматриваются процессы в элементах тензопреобразователей давления на основе КНС-структур, приводятся экспериментальные данные, а также несколько вариантов полного алгоритма коррекции температурной погрешности измерительного канала гидростатического давления.

Принцип действия тензометрических преобразователей давления типа КНС-структуры. На рисунке 1 показана упрощенная функционально-электрическая схема тензопреобразователя.

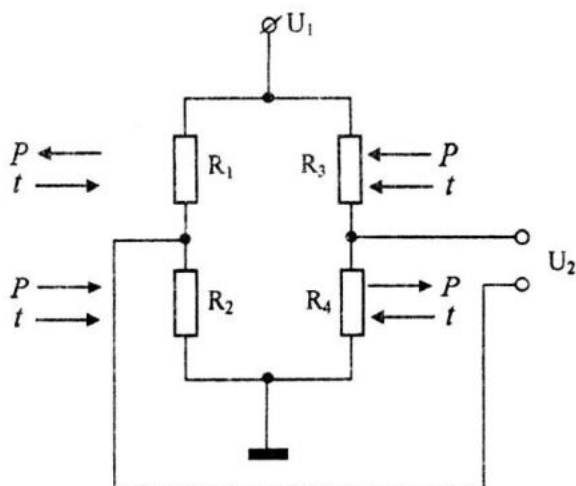


Рисунок 1 – Функционально-электрическая схема тензопреобразователя

Кремниевые резисторы R_2 и R_3 напылены на сапфировой пластине со стороны воздействия изгибающей силы и под воздействием этой силы сжимаются (утолщается поперечное сечение резистивной пленки), уменьшая свое сопротивление, а резисторы R_1 , R_4 напылены с противоположной стороны сапфировой пластины и растягиваются под силой давления, увеличивая свое начальное сопротивление. При этом можно записать:

$$R_1 = (R_1)_{oo} \cdot (1 + \beta_1 \cdot P)(1 + \alpha_1 \cdot \Delta t), \quad (1a)$$

$$R_2 = (R_2)_{oo} \cdot (1 - \beta_2 \cdot P)(1 + \alpha_2 \cdot \Delta t), \quad (1б)$$

$$R_3 = (R_3)_{oo} \cdot (1 - \beta_3 \cdot P)(1 + \alpha_3 \cdot \Delta t), \quad (1в)$$

$$R_4 = (R_4)_{oo} \cdot (1 + \beta_4 \cdot P)(1 + \alpha_4 \cdot \Delta t), \quad (1г)$$

где $(R_1)_{oo}$, $(R_2)_{oo}$, $(R_3)_{oo}$, $(R_4)_{oo}$ – сопротивления плеч резисторов тензомоста при температуре t_o и гидростатическом давлении $P = 0$;

β_1 , β_2 , β_3 , β_4 – модули коэффициента изменчивости сопротивлений от давления;

α_1 , α_2 , α_3 , α_4 – температурный коэффициент сопротивлений резисторов тензомоста;

P – гидростатическое давление;

$\Delta t = t - t_o$;

t – текущее значение температуры резисторов.

Выходное напряжение тензомоста равно

$$U_2 = U_1 \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right), \quad (2)$$

а сопротивление диагонали питания моста равно

$$R_{num.} = \frac{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4}. \quad (3)$$

Если все элементы тензомоста выполнены идеально точно, а именно:

$$(R_1)_{oo} = (R_2)_{oo} = (R_3)_{oo} = (R_4)_{oo} = R_{oo}, \quad (4a)$$

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = \alpha, \quad (4б)$$

$$\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = \beta, \quad (4в)$$

$$(\Delta t)_1 = (\Delta t)_2 = (\Delta t)_3 = (\Delta t)_4 = \Delta t, \quad (4г)$$

то выражение (2) примет вид:

$$\frac{U_2}{U_1} = \beta \cdot P, \quad (5)$$

а сопротивление тензомоста по диагонали питания будет равно

$$R_{num.} = R_{oo} (1 + \alpha \cdot \Delta t). \quad (6)$$

Как видно из выражений (5), (6) для идеального тензопреобразователя отношение $\frac{U_2}{U_1}$ зависит только от β и давления и не зависит от температуры, а сопротивление питающей диагонали моста зависит от R_{oo} , α и температуры Δt и не зависит от давления.

Измеряемое давление P и температура тензорезисторов t вычисляются по следующим формулам

$$P = \frac{U_2}{U_1} \cdot \frac{1}{\beta}, \quad (7)$$

$$t = \left(\frac{R_{mm}}{R_{oo}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{\alpha} + t_o. \quad (8)$$

Если бы коэффициенты α и β оставались постоянными, то идеальный тензопреобразователь мог бы служить вечно, не меняя своих метрологических показателей, однако из-за старения сапфировой подложки, металлической мембраны датчика и резисторов коэффициенты α и β изменяются от времени и от числа циклов перепадов гидростатического давления и температуры. Более того, отклонения в технологических процессах производства, измен-

чивость метрологических показателей используемой при производстве образцовой электроизмерительной аппаратуры, приводят к нарушению условий (4а) – (4г). Это в свою очередь приводит к тому, что погрешность измерения давления будет сложной функцией от погрешности измерений напряжения питания ΔU_1 , выходного напряжения ΔU_2 , от значений температуры тензорезисторов, от величины давления, вариации (гистерезиса функции преобразования при возрастании и убывании давления) и т. п.

В свою очередь на погрешность измерения температуры по сопротивлению питающей диагонали тензомоста будет оказывать влияние давление из-за отличий в практических значениях $(R_1)_{oo}$, $(R_2)_{oo}$, $(R_3)_{oo}$, $(R_4)_{oo}$ и β_1 , β_2 , β_3 , β_4 .

Структурная схема измерителя давления. На рисунке 2 показана упрощенная структурная схема измерительного канала давления. Добавочное термостабильное сопротивление R_5 поставлено для измерения

тока I_{mm} питающей диагонали моста с целью измерения сопротивления этой диагонали и последующего определения температуры тензорезисторов.

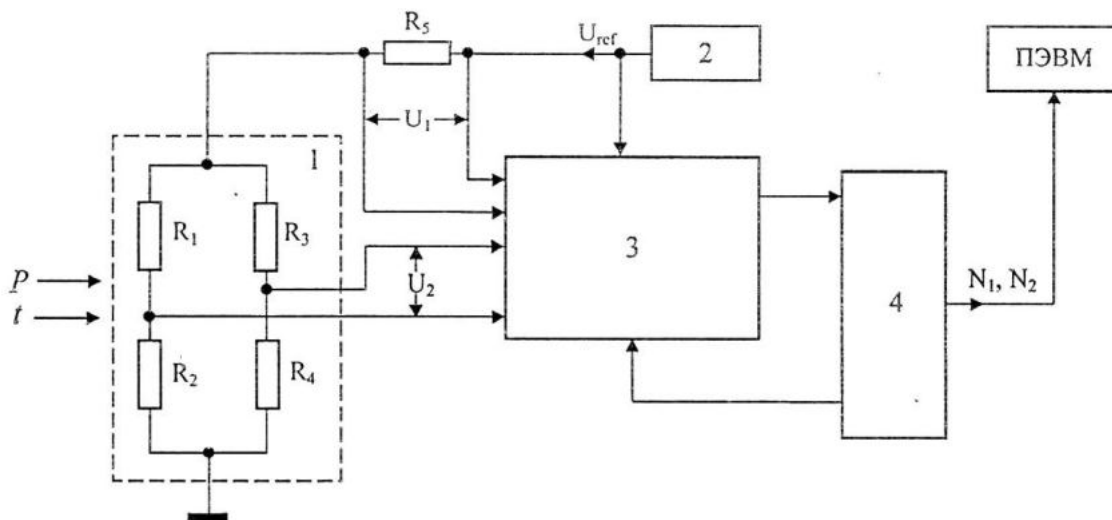


Рисунок 2 – Упрощенная структурная схема измерительного канала гидростатического давления
1 – тензопреобразователь (Д-16); 2 – источник опорного напряжения (ADR-421);
3 – АЦП (AD7794); 4 – процессор (ATmega16)

Для питания тензомоста и АЦП по входу U_{ref} используется единый источник опорного напряжения $U_{ref} = 2,5В$, что позволяет избежать необходимости контролировать нестабильность напряжения источника питания моста или U_{ref} . В качестве АЦП использована микросхема AD7794 с одним $\Sigma - \Delta$ АЦП с коммутатором на шесть дифференциальных входов и одним предварительным усилителем с программируемым коэффициентом усиления. Выбор единых АЦП и предварительного усилителя продиктован необходимостью исключения дополнительных погрешностей, вызванных интегральными и дифференциальными погрешностями разных АЦП.

Напряжение U_1 выбрано равным максимальному напряжению с выхода тензомоста U_2 , что позволило получить одинаковую разрешающую способность по обоим каналам без изменения коэффициента усиления предварительного усилителя АЦП. Процессор управляет работой АЦП и выдает информацию в линию связи и ПЭВМ с частотой 30 Гц.

Испытательное оборудование и методика испытаний. Структурная схема испытательного стенда представлена на рисунке 3.

Герметизированный тензопреобразователь помещается в водяной термостат и соединяется трубкой с задатчиком давления. Электрический выход тензопреобразователя соединяется четырехпроводной экранированной линией со входом электронной части измерительного канала гидростатического давления. Первоначально в термостат заливается вода с температурой, близкой к $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. В течение 20 – 30 минут тензопреобразователь выдерживается при этой температуре, стабильность и значение температуры в термостате контролируется образцовым кварцевым термометром с погрешностью не более $\pm 0,02\text{ }^{\circ}\text{C}$. Равномерность температуры в термостате обеспечивается перемешиванием с помощью мешалки. Момент, когда температура тензопреобразователя становится равной температуре окружающей воды в термостате, устанавливается по коду N_1 , зависящему от сопротивления питающей диагонали (т.е. температуры) тензопреобразователя при гидростатическом давлении $P = 0$.

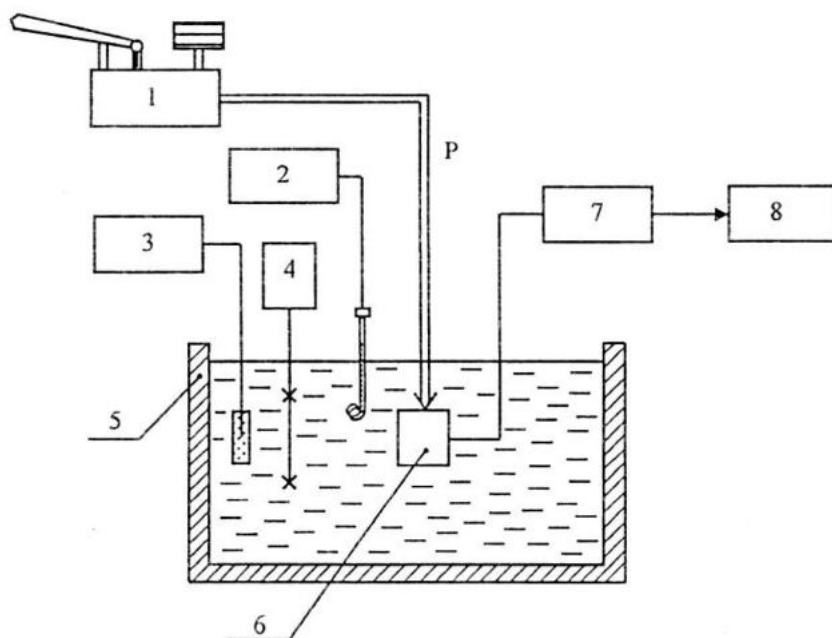


Рисунок 3 – Испытательный стенд

- 1 – задатчик давления МП-600, кл. 0,02 %; 2 – электронагреватель воды; 3 – кварцевый термометр образцовый; 4 – мешалка; 5 – водяной термостат; 6 – тензопреобразователь Д-16; 7 – электронная часть измерительного канала гидростатического давления; 8 – ПЭВМ

После того, как N_1 перестает изменяться на уровне шумов АЦП, на вход тензопреобразователя последовательно подается давление 0, 3, 6, 9, 12, 15 и 18 МПа и после установления показаний кодов N_1 и N_2 на каждой ступени давления производится считывание кодов N_1 и N_2 .

Результаты исследований. В таблице 1 приведены все результаты измерений в

диапазоне изменения окружающей температуры от 0 до 35 °С и гидростатического давления от 0 до 18 МПа. При этом цифровые эквиваленты N_1 напряжения U_1 на сопротивлении R_3 и N_2 напряжения U_2 на выходе тензомоста изменялись в пределах от 14762 до 14497 единиц и от 8392 до 16549 соответственно.

Таблица 1 – Результаты испытаний тензопреобразователя

Давление об-разцовое, МПа	Температура в термостате, t									
	t = 0,003 °С		t = 8,58 °С		t = 17,79 °С		t = 26,56 °С		t = 34,80 °С	
	N_1	N_2	N_1	N_2	N_1	N_2	N_1	N_2	N_1	N_2
0	14762	8392	14700	8391	14633	8389	14570	8387	14510	8386,5
2,94198	14764	9760,2	14702	9740,2	14635	9718	14572	9698	14512	9680
5,88396	14764	11124,5	14702	11086	14635,2	11044,5	14572	11005,5	14512	10970
8,82594	14762	12486,7	14700	12430	14634	12368,5	14570	12311	14510	12258
11,76792	14758	13845	14697	13770,7	14630	13689,5	14567	13614	14507,5	13543
14,70990	14752	15199,5	14691	15107	14625	15007	14562	14912	14503	14825
17,65188	14744	16549	14684	16438	14618	16319	14556	16206,5	14497	16102

При давлении $P = 0$ и при изменении температуры тензопреобразователя от 0 до 35 °С сопротивление питающей диагонали возрастало, а ток $I_{пит.}$ и напряжение на сопротивлении R_3 падало. На рисунке 4 показан характер зависимости кода N_1 (напряжения U_1) от температуры Θ_0 тензопреобразователя при $P = 0$, по которой можно определить температуру тензопреобразователя Θ_0 по уравнению регрессии вида

$$\Theta_0 = -0,13792[(N_1)_{\Theta,0} - (N_1)_{0,0}], \quad (9)$$

где $(N_1)_{\Theta,0}$ – код N_1 при любой температуре Θ и давлении $P = 0$;

$(N_1)_{0,0}$ – код N_1 при температуре $\Theta_0 = t = 0$ и давлении $P = 0$.

Максимальное расхождение между вычисленной по уравнению (9) температурой Θ_0 тензопреобразователя и температурой в термостате t не превышает $\pm 0,14$ °С в диапазоне изменения t от 0 до 35 °С.

При возрастании давления от 0 до 5 МПа сопротивление питающей диагонали тензомоста снижается, а затем начинает возрастать даже при постоянстве температуры в термостате. Это приводит, как видно из рисунка 4, к кажущемуся изменению вычисленной по формуле (9) температуры Θ_0 от минус 0,35 до 2,5 °С в зависимости от температуры в термостате.

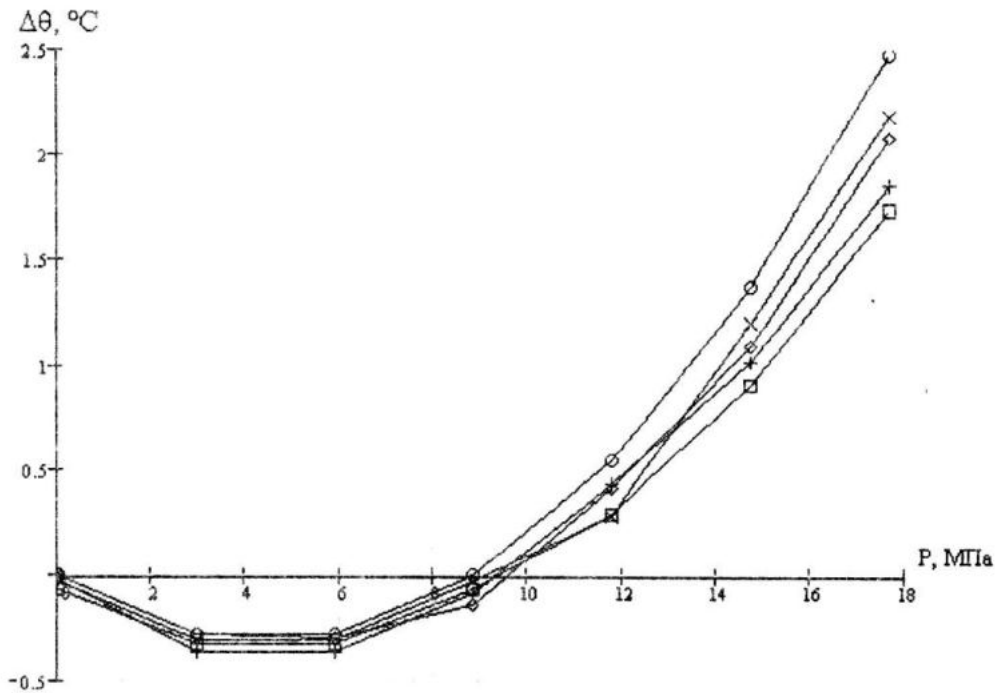


Рисунок 4 – Изменчивость кажущейся температуры тензопреобразователя в зависимости от давления при стабильной температуре термостата: ○○○ – при $t = 0.003^\circ\text{C}$; ××× – при $t = 8.58^\circ\text{C}$; ◇◇◇ – при $t = 17.79^\circ\text{C}$; +++ – при $t = 26.56^\circ\text{C}$; □□□ – при $t = 34.81^\circ\text{C}$

Для определения истинной температуры тензопреобразователя Θ при одновременном изменении окружающей температуры и давления необходимо в "грубую" вычислен-

ную температуру Θ_0 внести поправку $\Delta\Theta$ с учетом реальных значений температуры в термостате t и давления P

$$\Theta = \Theta_0 + \Delta\Theta = \Theta_0 \left[0,3 - (1,672 \cdot 10^{-2} - 1,377 \cdot 10^{-4} \cdot \Theta_0) (P_{\text{одр.}} - 5)^2 \right]. \quad (10)$$

Погрешность вычисления температуры элементов тензомоста по выражению (10) не превышает $\pm 0,13^\circ\text{C}$.

В результате анализа эксперименталь-

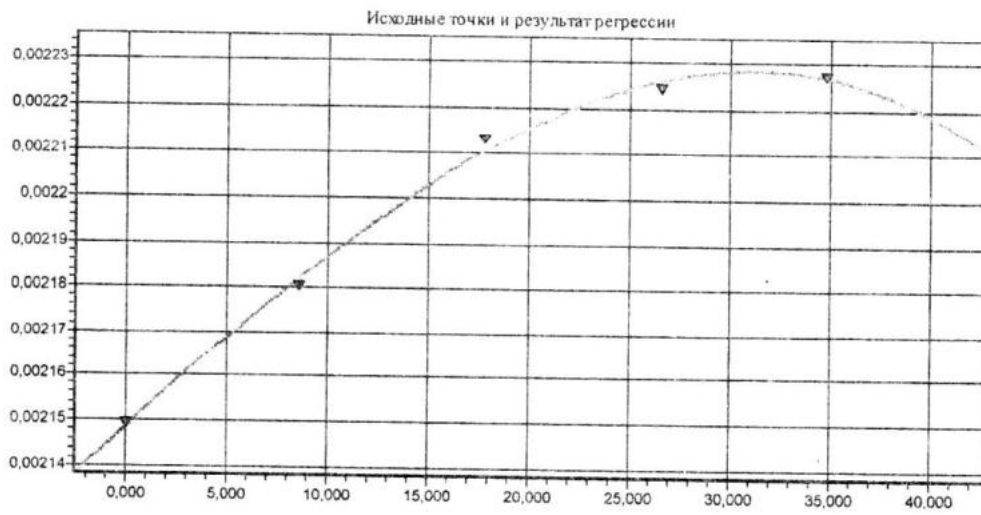
ных данных, представленных в таблице 1, получены индивидуальные градуировочные характеристики в следующем виде

$$P = a_0 + a_1(N_2 - N_{20}) + a_2(N_2 - N_{20})^2 + a_3(N_2 - N_{20})^3. \quad (11)$$

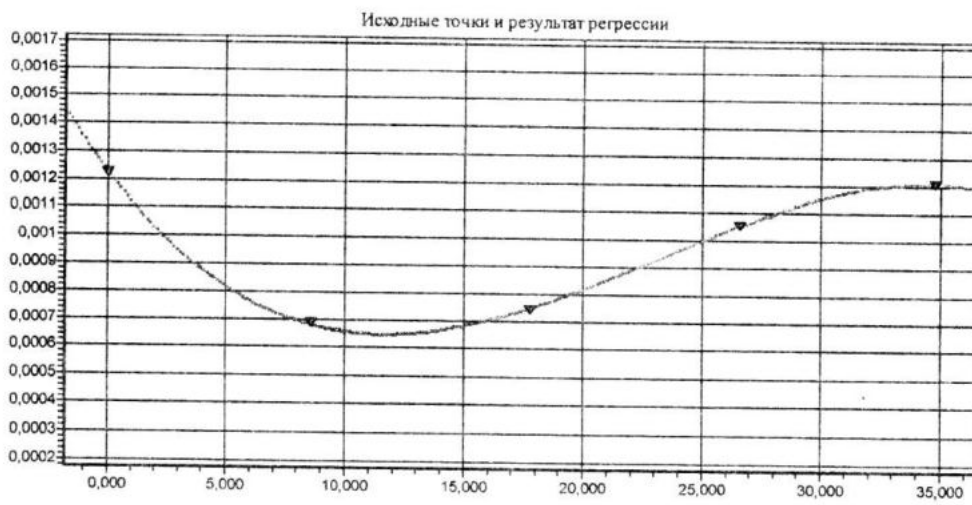
Значения a_0 , a_1 , a_2 , a_3 и N_{20} (значение кода N_2 при давлении $P = 0$ и температуре в термостате), а также среднее квадратическое отклонение (СКО) абсолютной $\sigma(\Delta_p)$ и приведенной σ_p погрешности аппроксимации для разных значений температуры в термостате показаны в таблице 2.

Как видно из таблицы 2, все коэффициенты и начальные параметры зависят от

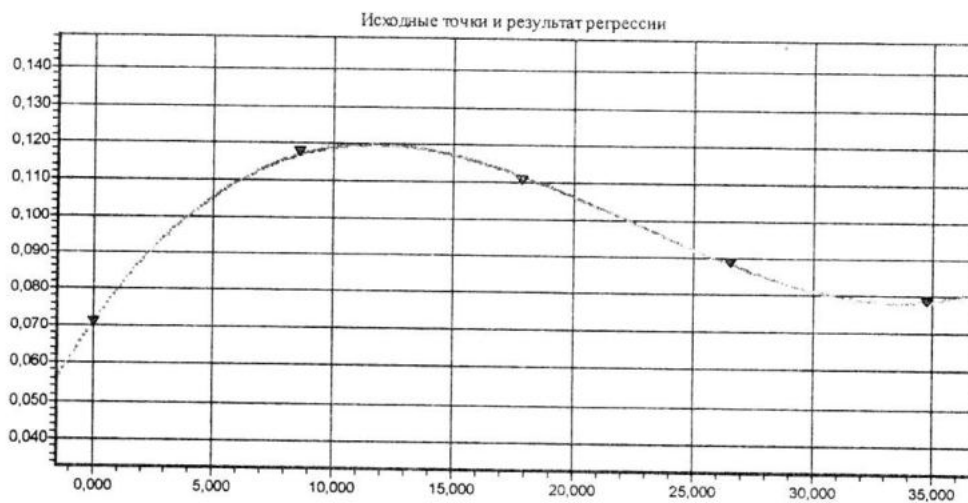
температуры в термостате (от температуры тензопреобразователя). Чтобы получить по показаниям датчика конкретное значение воздействующего давления при любой температуре датчика, необходимо знать зависимость коэффициентов $a_0 \div a_3$ и N_{20} от температуры с высокой точностью. На рисунке 5 показан характер изменчивости этих параметров.



а)



б)



в)

Рисунок 5 – Изменчивость коэффициентов a_1 , a_2 , a_3 градуировочной характеристики датчика давления в зависимости от температуры тензопреобразователя: а) – a_1 ; б) – a_2 ; в) – a_3

Таблица 2 – Градуировочные коэффициенты, начальный код N_{20} , СКО абсолютной $\sigma(\Delta_p)$ и приведенной σ_p погрешности аппроксимации

Температура в термостате, $t, ^\circ\text{C}$	N_{20}	a_0	a_1	a_2	a_3	$\sigma(\Delta_p)$, МПа	σ_p , %
0,003	8392	$-3,0145 \cdot 10^{-4}$	$2,14931 \cdot 10^{-3}$	$1,22571 \cdot 10^{-9}$	$7,09867 \cdot 10^{-14}$	$4,76 \cdot 10^{-4}$	$2,7 \cdot 10^{-3}$
8,554 – 8,610	8391	$-3,8654 \cdot 10^{-4}$	$2,180485 \cdot 10^{-3}$	$6,85528 \cdot 10^{-10}$	$1,17632 \cdot 10^{-13}$	$5,65 \cdot 10^{-4}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$
17,790 – 17,789	8389	$-2,4375 \cdot 10^{-4}$	$2,213089 \cdot 10^{-3}$	$7,431129 \cdot 10^{-10}$	$1,108802 \cdot 10^{-13}$	$4,41 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$
26,590 – 26,532	8387	$-3,2561 \cdot 10^{-4}$	$2,224348 \cdot 10^{-3}$	$1,059155 \cdot 10^{-9}$	$8,898725 \cdot 10^{-14}$	$6,53 \cdot 10^{-4}$	$3,7 \cdot 10^{-3}$
34,872 – 34,761	8386,5	$-4,0939 \cdot 10^{-4}$	$2,227386 \cdot 10^{-3}$	$1,206938 \cdot 10^{-9}$	$7,853137 \cdot 10^{-14}$	$6,34 \cdot 10^{-4}$	$3,6 \cdot 10^{-3}$

В результате нахождения аппроксимирующих полиномов по методу наименьших квадратов были получены следующие выражения для градуировочных коэффициентов

$$a_0 = -3,33 \cdot 10^{-4}, \quad (12a)$$

$$a_1 = 2,14886 \cdot 10^{-3} + 4,1054 \cdot 10^{-6} \cdot t - 1,7438 \cdot 10^{-8} \cdot t^2 - 1,0380 \cdot 10^{-9} \cdot t^3, \quad (12б)$$

$$a_2 = 1,22726 \cdot 10^{-9} - 1,1228 \cdot 10^{-10} \cdot t + 6,4685 \cdot 10^{-12} \cdot t^2 - 9,361 \cdot 10^{-14} \cdot t^3, \quad (12в)$$

$$a_3 = 7,11310 \cdot 10^{-14} + 9,4063 \cdot 10^{-15} \cdot t - 5,4208 \cdot 10^{-16} \cdot t^2 + 7,990 \cdot 10^{-18} \cdot t^3. \quad (12г)$$

Погрешность вычисления давления по формулам (12а) – (12г) во всем диапазоне температур и давлений не превышает $\pm 0,012$ МПа (0,07 %).

Как видно из формул (9) – (12) общее количество необходимых коэффициентов и операций вычислений достигает 20 и 31 соответственно.

Для микропроцессора это может оказаться большим объемом вычислений, особенно в реальном времени и с высокой частотой выдачи информации.

В связи с этим были опробованы два варианта алгоритма обработки информации.

Первый вариант представляет собой алгоритм, в котором вычисление давления ведется методом последовательных приближений.

Первоначально вычисляется приближенное давление P^* по формуле (11) с коэффициентами a_0, a_1, a_2, a_3 , указанными в таблице 2 в строке $t = 0,003$ °С,

$$P^* = -3,0145 \cdot 10^{-4} + (N_2 - 8392) \times \left\{ \left[2,14931 \cdot 10^{-3} + (N_2 - 8392) \right] \times \left[1,22571 \cdot 10^{-9} + 7,09867 \cdot 10^{-14} \cdot (N_2 - 8392) \right] \right\} \quad (13)$$

Затем вычисляется приближенное значение температуры Θ^* тензочувствительного элемента

$$\Theta^* = -0,13792[(N_1)_{\Theta, P} - 14762], \quad (14)$$

где $(N_1)_{\Theta, P}$ – цифровой отсчет при любых значениях температуры Θ^* и гидростатического давления P^* .

После этого вычисляется второе приближение температуры Θ

$$\Theta = \Theta^* - \left[-3,312 \cdot 10^{-2} - 1,39264 \cdot 10^{-1} \cdot P^* + (1,54627 \cdot 10^{-2} - 2,745156 \cdot 10^{-5} \cdot \Theta^*) \cdot (P^*)^2 \right]. \quad (15)$$

Окончательное ("точное") значение давления вычисляется по следующей формуле

$$P = (0,999184 + 1,719565 \cdot 10^{-2} \cdot \Theta) \cdot P^*. \quad (16)$$

Максимальные расхождения между вычисленными измеренными значениями температуры Θ и $t_{обр.}$ и давлениями P и $P_{обр.}$ лежат в пределах от минус 0,13 до 0,18 °С по температуре и от минус 0,055 % до 0,033 % от верхнего предела измерений по давлению.

Количество коэффициентов и операций в этом варианте составляет 13 и 18 соответственно.

Второй вариант алгоритма разработан Г.П. Дудниковым, а программная часть реализована А.П. Алексеевым.

Алгоритм разработан на базе многопараметрической регрессии (в данном случае по двум параметрам – по температуре и давлению). При этом температура тензопреобразователя может использоваться как в единицах физической величины (°С), так и в коде АЦП N_1 (напряжении U_1 на сопротивлении R_1 на рисунке 2).

Исходная группа градуировочных формул для вычисления давления при конкретной температуре тензопреобразователя имеет следующий вид

$$P = c_0 + N_{pi} [c_1 + N_{pi} (c_2 + N_{pi} \cdot c_3)], \quad (17)$$

$$\text{где } N_{pi} = N_{0\Theta} / [1 + D \cdot (N_{1i} - N_{10})]; \quad (18)$$

N_{1i} – текущий код N_1 ;

N_{10} – код N_1 при температуре градуировки $t_{град.} \approx 20 \pm 5$ °С;

$$N_{0\Theta} = N_{2i} - N_{20} - \{A_0 + (N_{1i} - N_{10}) \cdot [A_1 + (N_{1i} - N_{10}) \cdot A_2]\}; \quad (19)$$

N_{2i} – текущий код N_2 ;

N_{20} – код N_2 при $t = t_{град.}$

Коэффициенты каждой формулы находятся по методу наименьших квадратов

и для нашего случая имеют следующие значения:

$$c_0 = -3,26969 \cdot 10^{-4};$$

$$A_0 = -1,5471782 \cdot 10^{-1};$$

$$c_1 = 2,214264 \cdot 10^{-3};$$

$$A_1 = 2,3512026 \cdot 10^{-2};$$

$$c_2 = 1,97392 \cdot 10^{-9};$$

$$A_2 = 1,406924 \cdot 10^{-5};$$

$$c_3 = -1,538225 \cdot 10^{-13};$$

$$D = 2,2376842 \cdot 10^{-4};$$

$$N_{10} = 14630;$$

$$N_{20} = 8389.$$

Этот вариант алгоритма нахождения градуировочной характеристики и вычисления измеренного значения давления наиболее оптимален по числу коэффициентов (10), операций (16) и по точности (максимальная погрешность аппроксимации, приведенная к верхнему пределу измерений, не превышает 0,025 %).

Заключение. В результате проведенных исследований установлено, что при использовании датчиков давления типа "САПФИР" с непрерывным измерением температуры тензочувствительного элемента по сопротивлению питающей диагонали тензомоста при использовании современной микроэлектроники (многоканальные АЦП, микропроцессоры), а также образцовой аппаратуры (грузопоршневые прессы класса точности 0,02, термостаты с нестабильностью температуры не более $\pm 0,02$ °С) возможно создание измерительных каналов гидростатического давления для гидрофизических зондирующих комплексов с неисключенной суммарной при-

веденной погрешностью не более (0,03 – 0,05) % в диапазоне рабочих температур от нуля до 35°С при паспортной температурной погрешности датчиков 0,4 % / 10 °С.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю.В. Немировский, В.В. Холкин, Ю.И. Шаповалов. Цифровой тензометрический преобразователь. АС СССР № 1270545. БИ № 42 от 15.11.86.
2. А.И. Королев. К вопросу термокомпенсации интегральных тензопреобразователей давления "КНС-структуры". – Москва: Метрологические проблемы гидрофизических и гидроакустических измерений. 1990. – С. 90 – 94.
3. В.И. Бабий, М.В. Бабий. Измеритель гидростатического давления с алгоритмической термокомпенсацией. – Севастополь: Сб. тр. МНТС "Морское и экологическое приборостроение", 1995. – С. 18.