

МЕТОД УМЕНЬШЕНИЯ ИНЕРЦИОННОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

П.В. Гайский

Морской гидрофизический институт
НАН Украины
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: gaysky@inbox.ru

В статье предлагается метод уменьшения динамической погрешности измерителя температуры с использованием двух инерционных датчиков и экспериментальной градиуровочной характеристики по реакции на квазиступенчатое воздействие.

Введение. Уменьшение инерционности измерителей температуры является важной задачей термометрии. Основной проблемой при ее решении зачастую является невозможность изменения конструктивных параметров датчиков и необходимость защиты их от внешних механических и коррозионных воздействий в среде измерения.

Основная часть. В процессе разработки и проведения экспериментальных исследований высокоскоростного прецизионного измерительного канала температуры был создан экспериментальный образец прибора на основе двух платиновых датчиков температуры и электрической схемы на 20-разрядном аналого-цифровом преобразователе по разрядному уравновешиванию с частотой выборки 200–400 кГц [1]. Реализация подключения датчиков на базе схемы шестиплечего моста [2] и внутренконтроллерное осреднение позволили достичнуть высокую стабильность и малую амплитуду шумовых характеристик при получении выходного сигнала температуры с частотой более 50 Гц. Это позволило наблюдать с большим временным разрешением переходные процессы при изменчивости температуры в среде измерений. Несмотря на высокую скорость опроса и малую цену единицы младшего разряда, большая инерционность чувствительных элементов датчиков, даже практически при отсутствии защитной оболочки и соединения с корпусом, ос-

тается главным препятствием при создании прецизионного быстродействующего прибора. Стандартные методы динамической коррекции в основном привязаны к определенным параметрам среды (скорость обтекания, вязкость, теплопроводность, плотность и т.д.) через коэффициент теплообмена. При одновременном использовании двух и более датчиков с разными параметрами тепловой инерции или системой нагрева [3,4] используются методы динамической коррекции с расчетом производных, которые в реальных измерениях сами по себе являются достаточно нестабильными характеристиками, сильно зашумлены и вычисляются с большими погрешностями. Активный (нагреваемый) и пассивный датчики необходимо разносить в пространстве, а опыт показывает, что температура даже в сравнительно однородной среде может отличаться на десятую долю градуса при расстоянии в 1–2 см, что делает использование гипотезы о равенстве температуры среды для обоих датчиков в точных расчетах недопустимым.

Был создан измеритель на основе двух пассивных датчиков близких, но отличающихся по своим конструктивным параметрам и сопротивлению. Соответственно отличалась их первичная инерционность. Экспериментальные исследования по резкой изменчивости контролируемой температуры среды позволили выявить ряд повторяющихся стабильных особенностей поведения чувствительных элементов в первые доли секунды. Наиболее информативным параметром при этом являлась разница сопротивлений (в пересчете на искомую величину – разница температур) первого и второго датчиков

$$\Delta\theta_{21}(t) = \theta_2(t) - \theta_1(t), \quad (1)$$

где $\theta_1(t)$ – температура более инерционного датчика; $\theta_2(t)$ – температура менее инерционного датчика.

Для экспериментов использовались два водных термостата ограниченного объема, в которых предварительно устанавливалась разная температура и измеритель быстро (приблизительно в течение 1 секунды) перемещался из одной

емкости в другую. На рис. 1 представлены графики типичной реакции датчиков на ступенчатое изменение температуры.

Анализ рядов численных данных позволил оценить временную задержку появления экстремума $\Delta\theta_{21}(t)$. Она составляла (без учета времени перемещения измерителя из одной емкости в другую) около 1 секунды. Поскольку эксперименты проводились как с перемешиванием среды (приблизительно 0,5 м/с) так и без, было обнаружено практическое отсутствие влияния скорости обтекания на первичную реакцию датчиков как в амплитуде экстремума, так и во временном сдвиге. Можно предположить, что наблюдаемый экстремум есть результат резкого воздействия среды не на весь объем чувствительного элемента, а только на его поверхностную оболочку, которая приобретает практически "мгновенно" внешнюю температуру и почти не зависит (в наших масштабах измерения) от таких параметров среды как течение.

По выделенному оценочному ряду экспериментов был построен график зависимости $\Delta\theta_{CP12}(t) = f(\Delta\theta_{21}(t))$ (рис. 2),

$$\text{где } \Delta\theta_{CP12}(t) = \theta_{CP1}(t) - \theta_{CP2}(t), \quad (2)$$

$\theta_{CP1}(t)$ – истинная температура среды в емкости 1; $\theta_{CP2}(t)$ – истинная температура среды в емкости 2.

По результатам интерполяции полиномом первой степени методом наименьших квадратов получим соотношение, по которому можно задать коэффициент динамической коррекции

$$\Delta\theta_{CP12}(t) = 0,0018 + \Delta\theta_{21}(t) \cdot 11,016 \quad (3)$$

Поскольку значение $\Delta\theta_{21}(t)$ является экстремальным, то при оперативной динамической коррекции во время измерений вполне допустимо пользоваться $K_{дин} \leq 11,016$ как множителем без свободного члена на текущее значение разницы температур двух датчиков

$$\theta_{CP}(t) = \theta_2(t) + \frac{K_{дин}}{2} \cdot \Delta\theta_{21}(t), \quad (4)$$

где $\theta_{CP}(t)$ – истинная температура среды.

Делитель при коэффициенте может быть использован как чувствительность динамической коррекции и должен быть не менее 2 поскольку при суммировании исходного значения температуры самого малоинерционного датчика из двух и корректирующего значения суммарная разница составит $2 \cdot \Delta\theta_{CP12}(t)$.

Формула (4) реализована в алгоритме первичной обработки данных программно. Однако при использовании такой динамической коррекции в реальном времени измерений для корректных показаний измерений температуры должны быть соблюдены условия близкого расположения чувствительных элементов датчиков и их качественной поверки (во избежание естественного расхождения в показаниях температуры). Шумы от электроники могут быть предварительно сглажены скользящим осреднением, хотя это и создаст дополнительную инерционность в первичных данных. На рисунке 3 отображены результаты введения предложенной коррекции для измерительного сигнала. Обратный ход скорректированной температуры связан с влиянием температуры корпуса измерителя на общую температуру в емкости ограниченного размера. Интересно, что общая нескорректированная температура датчиков выходит на пиковое значение коррекции лишь к концу второй минуты измерений.

Для проверки универсальности методики расчет коэффициента динамической коррекции и реализация алгоритма были произведены для измерителя с такими же чувствительными элементами, но на совершенно другой электронной схеме высокоскоростного измерительного преобразователя (ИП) на базе усилителя тока. Полученное значение: $K_{дин} \leq 14,437$. Разница в полученных значениях при использовании различных ИП связана с тем, что данный коэффициент динамической коррекции при идентичной методике регистрации и об-

работке первичной цифровой информации отражает инерционность не только чувствительных элементов, но и инерционность всего первичного преобразователя со схемой включения.

На рис. 4 и 5 показаны результаты динамической коррекции для обоих ва-

риантов прибора при увеличении периода перемещения датчиков из одной емкости в другую. В таблице приведены сравнительные ряды инерционности датчика температуры и реализации алгоритма динамической коррекции.

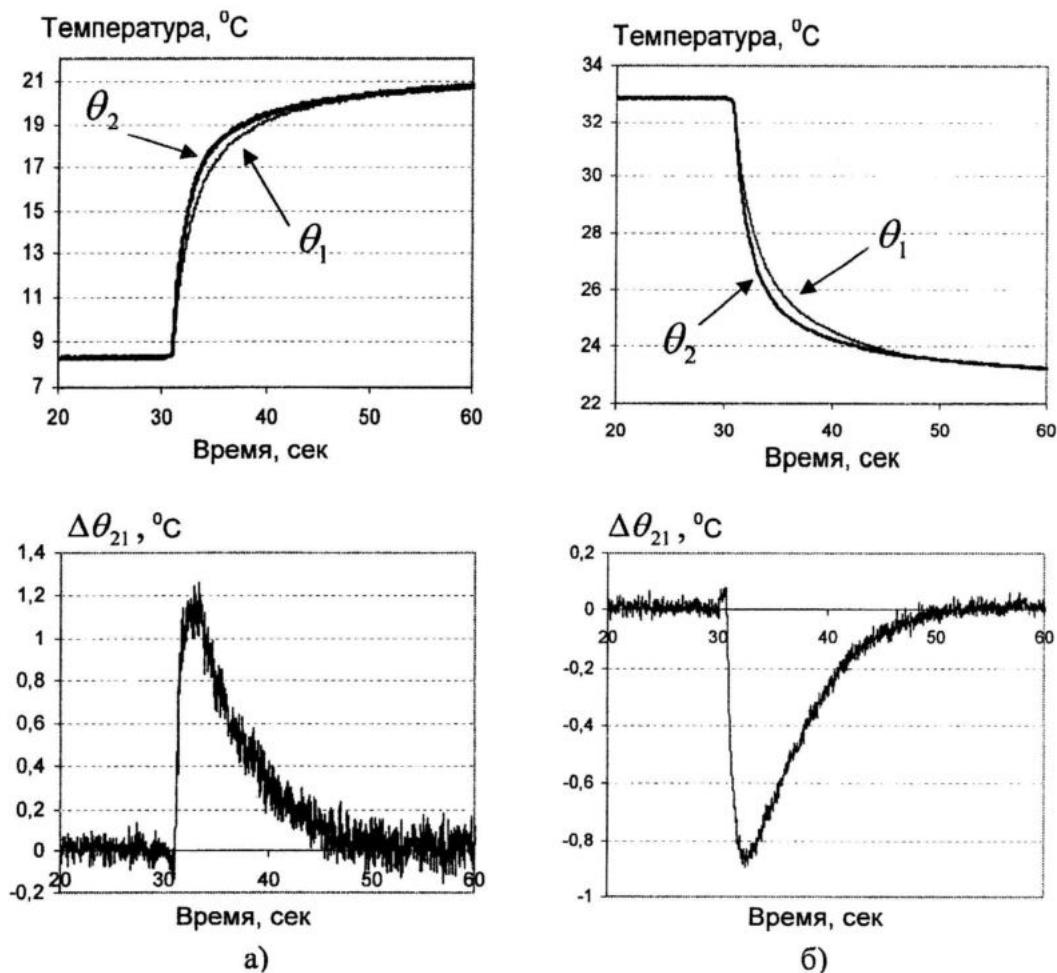


Рис. 1. Типичная реакция датчиков на квазиступенчатое изменение температуры:
а) увеличение; б) уменьшение

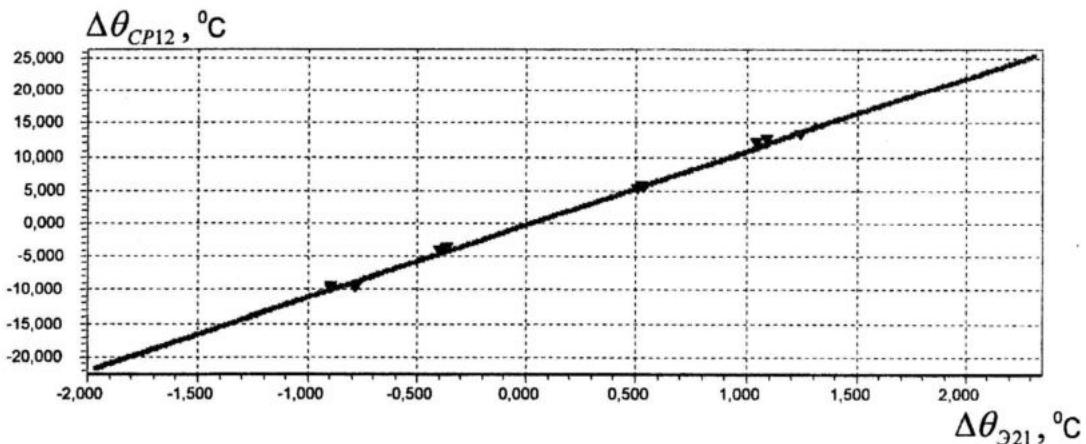
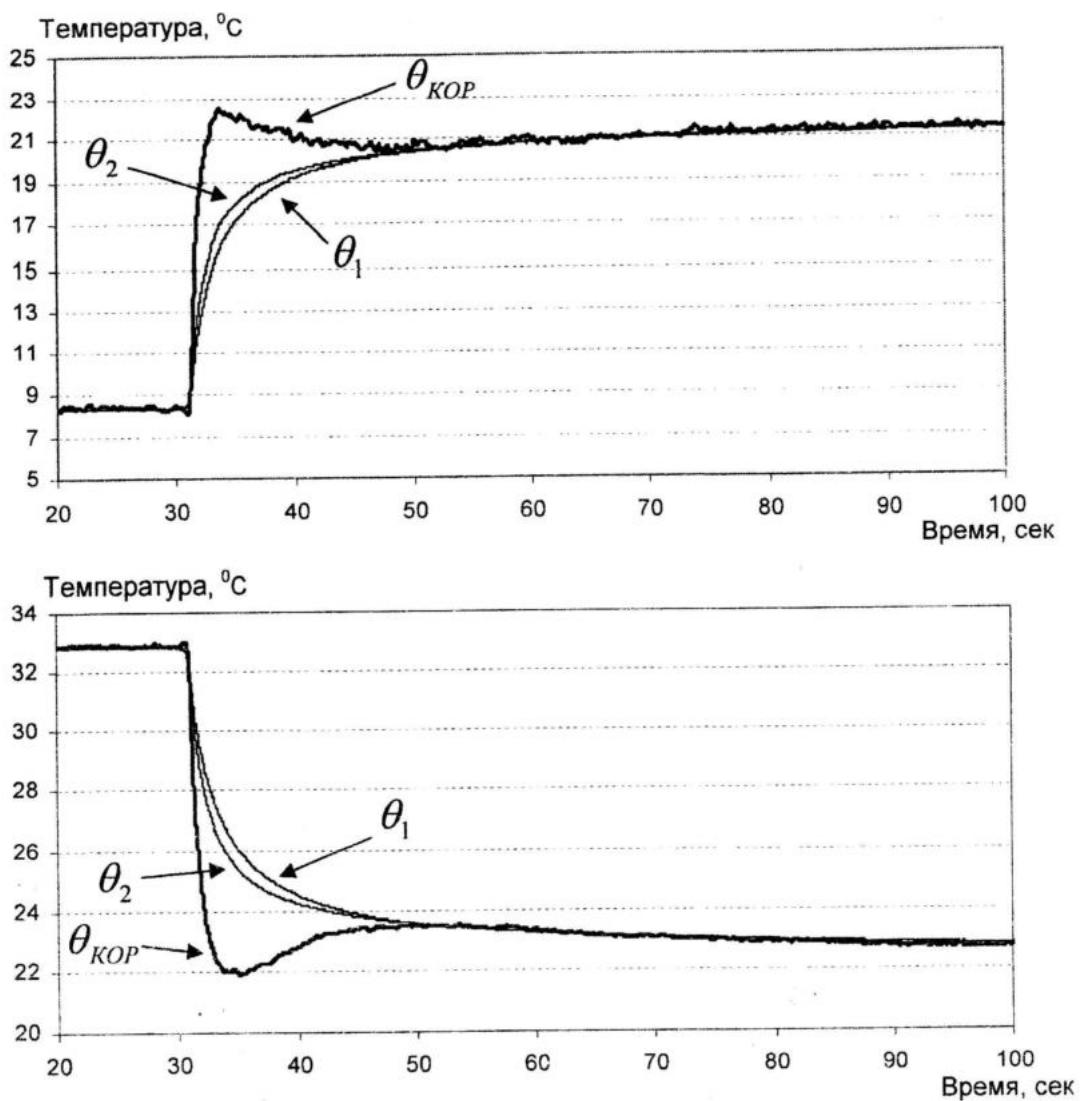
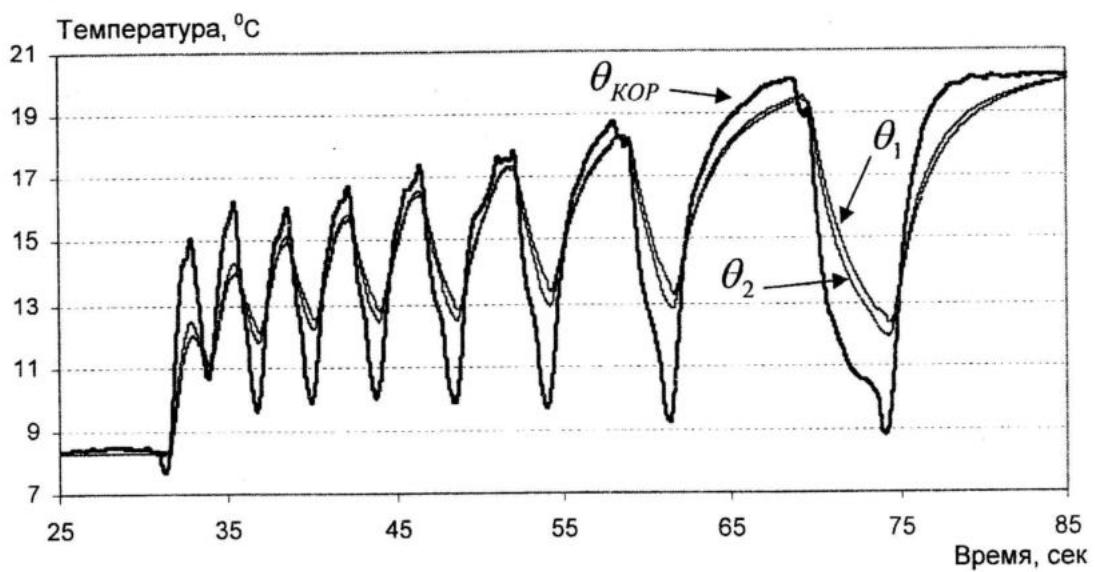


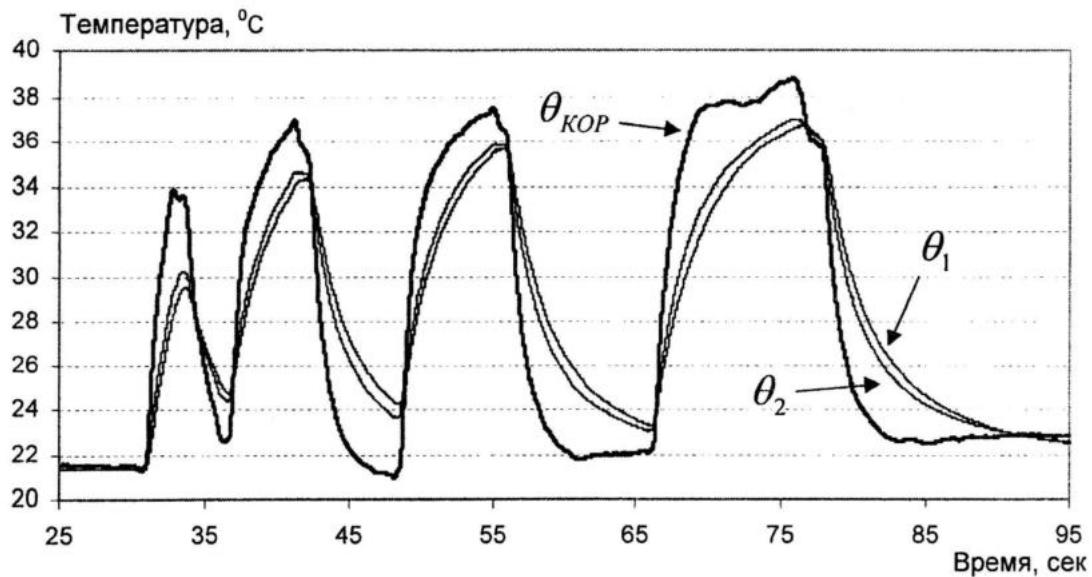
Рис. 2. График зависимости величины экстремума разности температур датчиков и разности температур в емкостях $\Delta\theta_{CPI2}(t) = f(\Delta\theta_{\vartheta 21}(t))$



Р и с. 3. Результаты введения динамической коррекции к данным исходных экспериментов



Р и с. 4. Результаты введения динамической коррекции для экспериментов с изменением периода помещения измерителя из одной температуры в другую для прибора с ИП на базе шестиплечего моста



Р и с. 5. Результаты введения динамической коррекции для экспериментов с изменением периода помещения измерителя из одной температуры в другую для прибора с ИП на базе усилителя тока

Т а б л и ц а
Результаты динамической коррекции по восстановлению температуры среды

$\Delta\theta_{CP12}$, %	Время установления, сек		
	без коррекции, θ_1	без коррекции, θ_2	с коррекцией
40	1,305	0,928	0,377
50	1,972	1,392	0,464
60	2,901	2,088	0,551
65	3,683	2,581	0,638
70	4,669	3,422	0,725
75	6,003	4,553	0,841
80	8,004	6,351	1,015
85	10,93	9,483	1,160
90	16,50	15,37	1,334
95	33,12	32,77	1,595
100	85,47	85,41	1,885

Если рассматривать датчики как инерционные звенья первого порядка, то справедливо для ступенек $\Delta\theta_C$ температуры на входе

$$\theta_1(t) = \Delta\theta_C \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_1}}\right), \quad (5)$$

$$\theta_2(t) = \Delta\theta_C \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_2}}\right), \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \theta_2(t) - \theta_1(t) &= \Delta\theta_{21}(t) = \\ &= \Delta\theta_C \cdot \left(e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}}\right), \end{aligned} \quad (7)$$

где T_1 и T_2 – инерционность датчиков.

Определим время t_M достижения экстремального значения $\Delta\theta_{21}(t)$ от начала подачи ступеньки $\Delta\theta_C(0)$

$$\frac{\Delta\theta_{21}(t)}{dt} = -\Delta\theta_C \cdot \frac{t_M}{T_1} \cdot e^{-\frac{t_M}{T_1}} + \\ + \Delta\theta_C \cdot \frac{t_M}{T_2} \cdot e^{-\frac{t_M}{T_2}} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{t_M}{T_1} \cdot e^{-\frac{t_M}{T_1}} = \frac{t_M}{T_2} \cdot e^{-\frac{t_M}{T_2}}, \quad (9)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = e^{\frac{t_M}{T_1} - \frac{t_M}{T_2}}, \quad (10)$$

$$t_M = \frac{T_1 \cdot T_2}{T_2 - T_1} \cdot \ln \frac{T_2}{T_1}. \quad (11)$$

Следовательно, время наступления максимума (экстремума) t_M разницы температур $\Delta\theta_{21}(t)$ не зависит от $\Delta\theta_C$, а зависит только от параметров инерции звеньев и может быть определено при градуировке.

Динамическая поправка при определении температуры во время измерений будет соответствовать

$$\Delta\theta_C = \frac{\Delta\theta_{21}(t)}{e^{\frac{t}{T_1}} - e^{\frac{t}{T_2}}}. \quad (12)$$

Отсюда

$$K_{дин} = \frac{1}{e^{\frac{t}{T_1}} - e^{\frac{t}{T_2}}}, \quad (13)$$

причем максимальное значение коэффициента динамической коррекции будет соответствовать $t = t_M$. Динамическая точечная коррекция будет состоять в том, что к известной в момент времени $(t - t_M)$ температуре среды

$\theta_{CP}(t - t_M)$ добавляется измеренная в момент времени t разность $\Delta\theta_{21}(t)$, умноженная на $K_{дин}$, т.е.

$$\theta_C(t - t_M) = \theta_{CP}(t - t_M) + \\ + \Delta\theta_C(t - t_M) = \\ = \theta_{CP}(t - t_M) + K_{дин} \cdot \Delta\theta_{21}(t) \quad (14)$$

Это утверждение соответствует формуле (4) при том, что за известное значение температуры среды будет принято текущее значение температуры, измеренное менее инерционным датчиком. Коэффициент $K_{дин}$ определяется при градуировке подачей на вход ступеньки $\Delta\theta_C$ и измерением $\max \Delta\theta_{21}(t_M)$.

Заключение. Разработанный метод оперативной динамической коррекции показаний измерительного канала температуры, построенного на базе двух датчиков различной инерционности и высокоскоростного прецизионного преобразователя, позволяет уменьшить общую инерционность как минимум в 4 раза. Поскольку коэффициент динамической коррекции является величиной постоянной для конкретного измерителя, то он может быть определен в процессе поверки измерительных каналов и далее использоваться как градуировочный.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гайский П.В., Казанцева Т.В. Высокоскоростной измеритель температуры // Системы контроля окружающей среды // Сб. науч. тр., НАН Украины, МГИ. – Севастополь. – 2010. – Выпуск 13. – С. 27–29.
- Гайский В.А., Гайский П.В., Логвинчук А.Н., Клименко А.В. Патент UA №76230, 24.05.2004. Изобретение «Цифровой измеритель температуры» Бюл. № 7, 17.07.2006.
- Гайский В.А., Гайский П.В. Методы измерения температуры и потока теплообмена датчиков со средой, инвариантные к теплоемкостям датчиков // Системы контроля окружающей среды // Сб. науч. тр., НАН Украины, МГИ. – Севастополь. – 2010. – Выпуск 13. – С. 60–64.
- Гайский В.А., Гайский П.В. Программная модель термоанемометров // Системы контроля окружающей среды // Сб. науч. тр., НАН Украины, МГИ. – Севастополь. – 2004. – С. 107–112.