

**МОДЕЛЬ "ЭЛЕКТРОННОЙ
МЕРНОЙ РЕЙКИ"
НА БАЗЕ РАСПРЕДЕЛЕННОГО
ТЕРМОПРОФИЛЕМЕРА**

В.А. Гайский, П.В. Гайский

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

Рассматривается модель измерителя границ раздела сред, реализуемого на периодически подогреваемом распределенном термопрофилемере, названного "электронной мерной рейкой".

Постановка задачи. Остается актуальной проблема рационального автоматического измерения уровня жидких и сыпучих сред, уровня природных вод, границ раздела природных сред (воздух – снег – лед – воздух – вода), границ раздела сред в нефтехранилищах (воздух – нефть – вода) и других. В [1] предложено использовать для этих целей "электронные мерные рейки" (ЭМР) из не-

скольких распределенных нагреваемых термопрофилемеров [2 – 4].

Представляет интерес реализация ЭМР на одном распределенном термопрофилемере (РТП), работающим с периодическим подогревом [5, 6].

Описание измерителя. Структурная схема ЭМР представлена на рис. 1.

В состав устройства входит РТП 1 с встроенным в него распределенным нагревателем (РН) 2, совместно с оболочкой образующих измерительный кабель 3.

Датчики РТП через коммутатор (К) 4 и вторичный измерительный преобразователь (ВИП) 5 подключены к первому аналого-цифровому преобразователю (АЦП) 6, выход которого подан на вычислитель (В) 7. Распределенный нагреватель 2 подключен к выходу управляемого генератора тока (УГТ) 8, управляющий вход которого соединен с выходом преобразователя цифра – аналог (ПЦА) 9, вход которого соединен с выходом вычислителя 7. Параллельно нагревателю подключены входы второго АЦП 10.

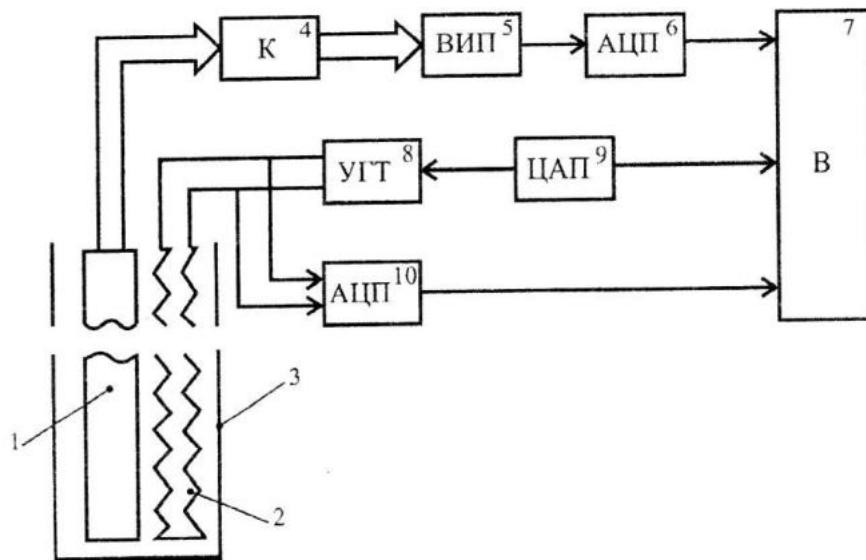


Рис. 1. Структурная схема «электронной мерной рейки»

РТП 1 служит для получения текущего профиля температуры $\theta(z, t)$ измерительного кабеля вдоль траектории укладки, например, вертикально вдоль

оси z . Нагреватель 2 служит для нагрева кабеля распределенной вдоль кабеля мощностью $P(z, t)$, которая вычисляется по известному току $I(t)$ на выходе гене-

ратора тока 8 и падению напряжения $U(t)$ на нагревателе, которое контролируется АЦП 10, т.е.

$$P(z, t) = U(z, t)I(t)z^{-1}. \quad (1)$$

Электронные узлы канала 4 – 6 служат для преобразования сопротивлений резисторных датчиков РТП в цифру.

Вычислитель 7 необходим для генерации заданного закона изменения тока нагрева $I(t)$ и вычисления текущих профилей температуры измерительного кабеля $\theta(z, t)$ и температуры среды $\theta_c(z, t)$, а также текущего потока теплообмена $\alpha_s(z, t)$ кабеля со средой, текущих параметров погонной инерции $m_c(z, t)$ или $d_i(z, t)$ с присоединенной массой, определения по этим профилям границ раздела или уровня сред.

Устройство погружается (устанавливается) через границы раздела сред и определяет их положение по различию: температур, потоков теплообмена с измерительным кабелем, значений параметров инерции (теплоемкости) кабеля с присоединенной массой, динамических характеристик изменчивости этих параметров (дисперсий, спектров, корреляционных функций).

Пространственная разрешающая способность измерителя определяется разрешением РТП, с помощью которого вычисляется текущий профиль температуры измерительного кабеля по формуле

$$\theta(z, t) = \sum_{i=0}^{n-1} a_i(t) p_i(z), \quad (2)$$

$$P(z, t) = [\theta(z, t) - \theta_c(z, t)] \cdot \alpha_s(z, t) + m_c(z, t) \theta^{(1)}(z, t), \quad (4)$$

где $P(z, t)$ – текущая мощность, выделяемая нагревателем в точке z ; $\theta(z, t)$ – текущая среднеобъемная температура измерительного кабеля и ее производная $\theta^{(1)}(z, t)$ по времени в точке z ; $\alpha_s(z, t)$ – текущий поток теплообмена измерительного кабеля со средой в точке z при коэффициенте теплообмена $\alpha(z)$ и удельной площади теплообмена $S(z)$;

где $\varphi_i(z)$ – известные функции из ортогонального базиса, принятые для модуляции погонной термочувствительности распределенного датчика РТП; $a_i(t)$ – текущие коэффициенты разложения $\theta(z, t)$ по этим функциям, вычисляемые по значениям измеренных сопротивлений датчиков [2].

Выбор функций $\varphi_i(z)$ зависит от контрастности границ раздела сред. Для сред со ступенчатыми границами раздела свойств, например, вода – воздух, целесообразно использовать ступенчатые функции Уолша.

Примем далее, что $\varphi_i(z) = had_i(z)$, $i = \overline{0, n-1}$ – функции из базиса Уолша-Адамара, т.е.

$$\theta(z, t) = \sum_{i=0}^{n-1} a_i(t) had_i(z). \quad (3)$$

Нагреватель 2 выполняют из однородной проволоки с малым коэффициентом термочувствительности по сопротивлению, что обеспечивает равномерно распределенную по измерительному кабелю мощности нагрева $P(z, t)$, независимо от локальной температуры.

Модели теплообмена. Если можно считать измерительный кабель тонкой нитью, сосредоточенным в поперечном сечении без оболочки и для точки на профиле принять эквивалентным инерционное звено 1-го порядка, то справедливо уравнение теплообмена [7, 8]

$\theta_c(z, t)$ – текущая температура внешней среды в точке z ; $m_c(z, t)$ – текущая погонная теплоемкость измерительного кабеля с присоединенной массой в точке z .

Обработка данных. В уравнении (4) измеряемо-вычисляемые величины $P(z, t)$, $\theta(z, t)$ и $\theta^{(1)}(z, t)$, текущие значения которых могут быть получены из мгновенных одинаковой фильтрацией с целью подавления аддитивного шума.

Неизвестные величины $\theta_c(z, t)$, $\alpha_s(z, t)$, $m_c(z, t)$, которые требуется определить.

Необходимые для этого дополнительные уравнения могут быть получены при изменении мощности нагрева $P(t)$ и взятии отсчетов измерямо-вычисляемых величин в различные моменты времени. Всегда можно обеспечить такое большое приращение мощности нагрева $P'(z, t)$, при котором дина-

мика изменения температуры измерительного кабеля $\theta^{(1)}(z, t)$ будет определяться в основном сигналом нагрева.

Поэтому можно принять

$$\alpha_s(z, t) = \text{const} \text{ на } t = t_1, t_2,$$

$$\theta_c(z, t) = \text{const} \text{ на } t = t_1, t_2.$$

Дифференцируя уравнение (4), получим для двух моментов времени t_1 и t_2

$$\begin{aligned} P^{(1)}(z, t_1) &= [\theta^{(1)}(z, t_1) \alpha_s(z, t_1, t_2) + m_c(z, t_1, t_2) \theta^{(2)}(z, t_1)] \\ P^{(1)}(z, t_2) &= [\theta^{(1)}(z, t_2) \alpha_s(z, t_1, t_2) + m_c(z, t_1, t_2) \theta^{(2)}(z, t_2)] \end{aligned} \quad (5)$$

Решение системы (5) имеет вид

$$\begin{aligned} \alpha_s(z, t_1, t_2) &= \frac{P^{(1)}(z, t_1) \cdot \theta^{(2)}(z, t_2) - P^{(1)}(z, t_2) \cdot \theta^{(2)}(z, t_1)}{\theta^{(1)}(z, t_1) \theta^{(2)}(z, t_2) - \theta^{(1)}(z, t_2) \theta^{(2)}(z, t_1)} \\ m_c(z, t_1, t_2) &= \frac{P^{(1)}(z, t_2) \cdot \theta^{(1)}(z, t_1) - P^{(1)}(z, t_1) \cdot \theta^{(1)}(z, t_2)}{\theta^{(1)}(z, t_1) \theta^{(2)}(z, t_2) - \theta^{(1)}(z, t_2) \theta^{(2)}(z, t_1)} \end{aligned} \quad (6)$$

Если все же учесть, что измерительный кабель имеет оболочку, то его эквивалентным звеном будет инерционное

звено второго порядка, для которого справедливо уравнение теплообмена [8, 9]

$$P(z, t) = [\theta(z, t) - \theta_c(z, t)] \cdot \alpha_s(z, t) + \sum_{j=1}^2 d_j(z, t) \theta^{(j)}(z, t) \quad (7)$$

где d_j – динамические параметры инерционного звена 2-го порядка.

При принятых выше допущениях выражения для производных получим

$$P^{(1)}(z, t) = \theta^{(1)}(z, t) \alpha_s(z) + \sum_{j=1}^2 d_j(z) \theta^{(j+1)}(z, t) \quad (8)$$

Беря расчеты измерямо-вычисляемых величин для трех моментов времени

t_1, t_2, t_3 и решая систему (8) для неизвестных, получим

$$\alpha_s(z, t_1 t_2 t_3) = \frac{P^{(1)}(z, t_1) [\theta^{(2)}(z, t_2) \theta^{(3)}(z, t_3) - \theta^{(3)}(z, t_2) \theta^{(2)}(z, t_3)] + P^{(1)}(z, t_2) [\theta^{(3)}(z, t_1) \theta^{(2)}(z, t_1) - \theta^{(2)}(z, t_1) \theta^{(3)}(z, t_3)] + P^{(1)}(z, t_3) [\theta^{(2)}(z, t_1) \theta^{(3)}(z, t_2) - \theta^{(3)}(z, t_1) \theta^{(2)}(z, t_2)]}{\Delta} \quad (9)$$

$$d_1(z, t_1 t_2 t_3) = \frac{P^{(1)}(z, t_1) [\theta^{(3)}(z, t_2) \theta^{(1)}(z, t_3) - \theta^{(1)}(z, t_2) \theta^{(3)}(z, t_3)] + P^{(1)}(z, t_2) [\theta^{(1)}(z, t_1) \theta^{(3)}(z, t_3) - \theta^{(3)}(z, t_1) \theta^{(1)}(z, t_3)] + P^{(1)}(z, t_3) [\theta^{(3)}(z, t_1) \theta^{(2)}(z, t_2) - \theta^{(1)}(z, t_1) \theta^{(3)}(z, t_2)]}{\Delta} \quad (10)$$

$$d_2(z, t_1 t_2 t_3) = \frac{P^{(1)}(z, t_1) [\theta^{(1)}(z, t_2) \theta^{(2)}(z, t_1) - \theta^{(2)}(z, t_2) \theta^{(1)}(z, t_3)] + P^{(1)}(z, t_2) [\theta^{(2)}(z, t_1) \theta^{(1)}(z, t_3) - \theta^{(1)}(z, t_1) \theta^{(2)}(z, t_3)] + P^{(1)}(z, t_3) [\theta^{(1)}(z, t_1) \theta^{(2)}(z, t_2) - \theta^{(2)}(z, t_1) \theta^{(1)}(z, t_2)]}{\Delta}, \quad (11)$$

где

$$\Delta = \theta^{(1)}(z, t_1) [\theta^{(2)}(z, t_2) \theta^{(3)}(z, t_3) - \theta^{(3)}(z, t_2) \theta^{(2)}(z, t_3)] + \theta^{(2)}(z, t_1) [\theta^{(3)}(z, t_2) \theta^{(1)}(z, t_3) - \theta^{(1)}(z, t_2) \theta^{(3)}(z, t_3)] + \theta^{(3)}(z, t_1) [\theta^{(1)}(z, t_2) \theta^{(2)}(z, t_3) - \theta^{(2)}(z, t_2) \theta^{(1)}(z, t_3)] \quad (12)$$

$$\theta_c(z, t) = \theta(z, t) + \frac{\sum_{j=1}^2 d_j(z, t) \theta^{(j)}(z, t) - p(z, t)}{\alpha_s(z, t)} \quad (13)$$

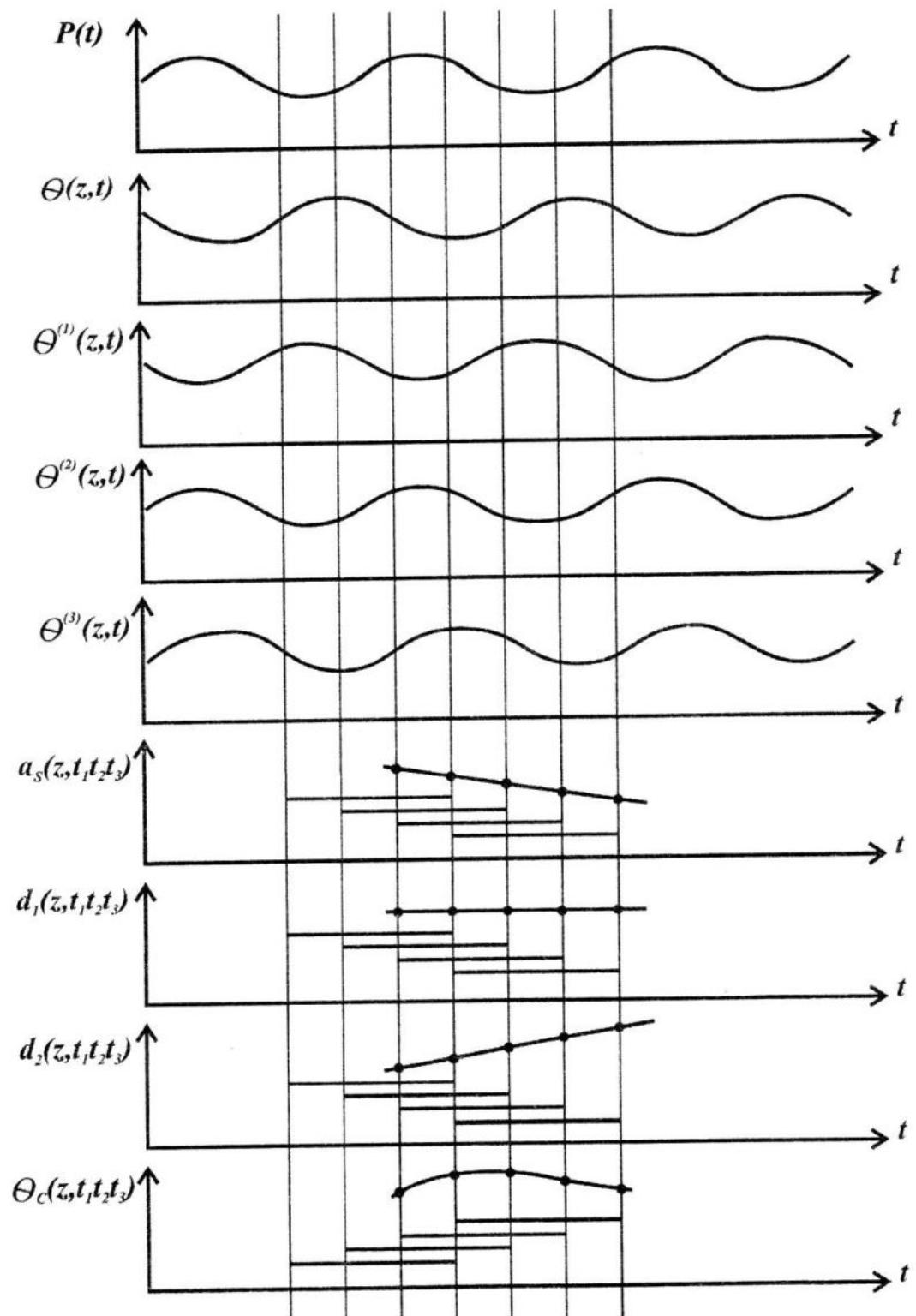
При этом отсчеты измеряемо-вычисляемых величин берутся для скользящих по времени (со сдвигом на 1) троек t_1, t_2, t_3 так, как это показано на рис. 2.

Это означает, что после двух начальных отсчетов для каждого последующего определения неизвестных будут три разных значения, которые целесообразно усреднить.

Восстановление профиля $\theta(z, t)$ осуществляется по формуле (2). Соответственно далее восстанавливаются

профили $\theta^{(1)}(z, t), \theta^{(2)}(z, t), \theta^{(3)}(z, t), \alpha_s(z, t_1 t_2 t_3), d_1(z, t_1 t_2 t_3), d_2(z, t_1 t_2 t_3), \theta_c(z, t_1 t_2 t_3)$. Границы раздела сред лежат на максимальных пространственных градиентах профилей, как это показано на рис. 3 для случая высокой разрешающей способности РТП.

Если датчики РТП модулированы по функциям Уолша-Адамара с малым разрешением, то можно использовать интерполяцию для нахождения границ раздела сред [1].



Р и с. 2. Временные диаграммы измерямо-вычисляемых величин для точки z

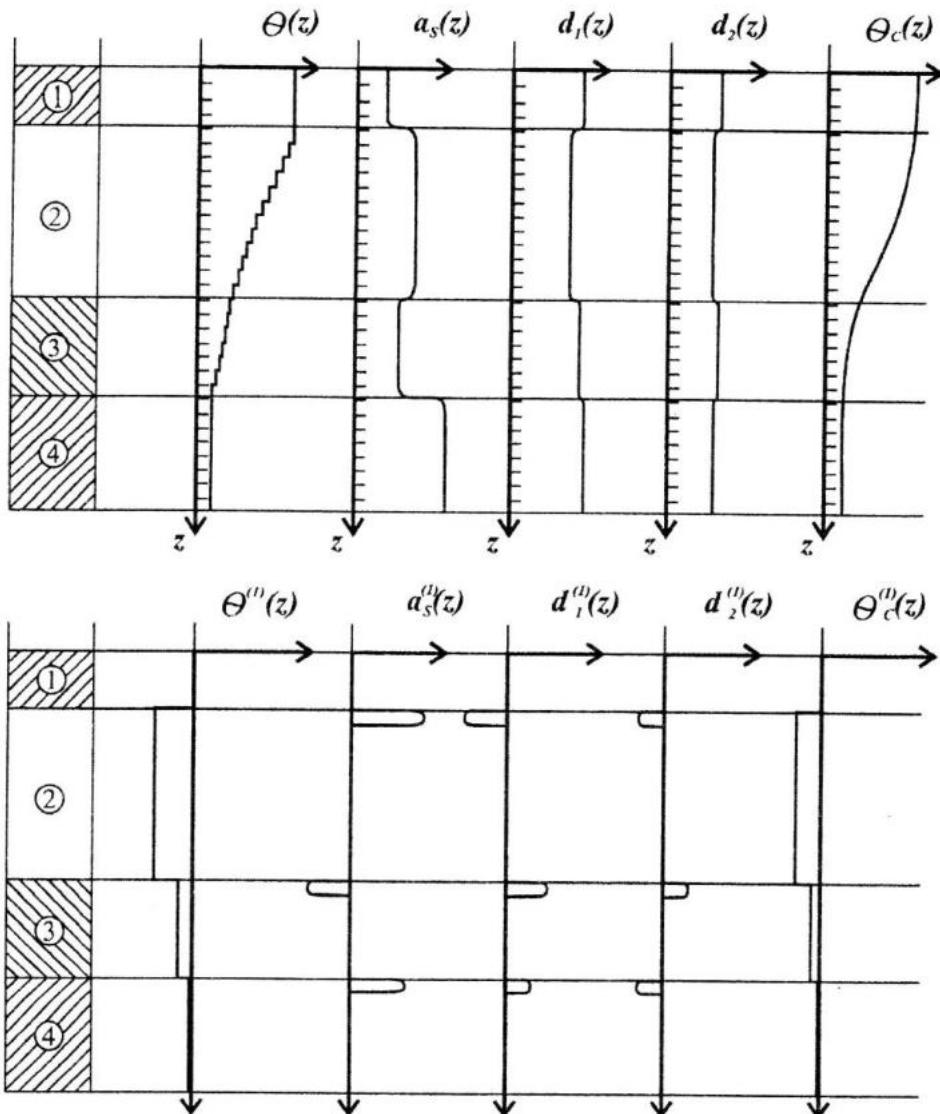


Рис. 3. Схема слоистой среды и вертикальные профили измеряemo-вычисляемых параметров и их пространственных производных

Заключение. Рассмотрены принципы построения, модель теплообмена и методы обработки данных измерителя границ раздела сред на базе распределенного термопрофилемера с периодическим подогревом в представлении датчика сосредоточенным инерционным звеном первого или второго порядка.

Границы сред определяются по различию профилей температур, теплоемкостей, параметров динамической инерции, потоков теплообмена между средами и измерительным кабелем, установленным через границы раздела.

Дальнейшее исследование может быть посвящено анализу быстродействия измерителя при представлении датчика распределенным звеном.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гайский В.А., Гайский П.В. Технологии измерений уровня моря // Морской гидрофизический журнал. – 2010. – № 4. – С. 58 – 73.

2. Гайский В.А., Гайский П.В. Распределенные термопрофилемеры и их возможности в океанографических исследованиях // Морской гидрофизический журнал. – 1999. – № 6. – С. 46 – 76.
3. Патент Украины 67847. Способ визначення положення меж розподілу середовищ. Гайський В.О., Гайський П.В. – Опубл. 15.07.2004 г. Бюл. № 7.
4. Патент Украины 74904. Способ вимірювання параметрів газових і рідинних середовищ. Гайський В.О., Гайський П.В. – Опубл. 15.02.2006 г. Бюл. № 2.
5. Гайский В.А. Анализ динамических режимов работы термоанемометров // Системы контроля окружающей среды / Методические, технические и программные средства. Сб. науч. тр. МГИ НАНУ. – Севастополь. – 2003. – С. 61 – 71.
6. Патент України 76157. Спосіб вимірювання параметрів потоків рідин і газів. Гайський В.О., Гайський П.В. – Опубл. 17.07.2006 г. Бюл. № 7.
7. Коротков П.А., Лондон Т.Е. Динамические контактные измерения тепловых величин. – Л.: Машиностроение, 1974. – 224 с.
8. Азизов А.М., Гордов А.Н. Точность измерительных преобразователей. – Л.: Энергия, 1975. – 256 с.
9. Гайский В.А., Гайский П.В. Анализ способов измерения профиля скорости потока термопрофилемерами // Системы контроля окружающей среды. Сб. науч. тр. МГИ НАНУ. – Севастополь. – 2001. – С. 7 – 22.