

УДК 535.08; 681.7.08

В.Т. КОНДРАТОВ

Институт кибернетики им. В.М. Глушкова, г. Киев,

А.А. КОРОГОД

Киевский национальный университет технологий и дизайна

ИЗБЫТОЧНАЯ ПИРОМЕТРИЯ: ИЗБЫТОЧНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ РАДИАЦИОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ЛОГАРИФМИЧЕСКОЙ ФУНКЦИИ ПРЕОБРАЗОВАНИИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА

Рассмотрен подход к решению задачи избыточных измерений температуры нагретых тел при логарифмической функции преобразования измерительного канала с фотоприемником. Описана сущность предложенного метода и технического решения цифрового пирометра отношения, его недостатки и достоинства. Показана возможность исключения влияния на результат измерений радиационной температуры постоянной Стефана – Больцмана. Работа представляет интерес для магистров, специалистов и ученых, интересующихся новыми методами измерения радиационной температуры.

Ключевые слова: радиационная пирометрия, методы избыточных измерений, температура, расплав стекломассы, функция преобразования, цифровой пирометр.

V.T. KONDRATOV

V.M.Glushkov Institute of cybernetics of National academy of Science of Ukraine

A.O. KOROGOD

Kiev national university of technologies and design

REDUNDANT PYROMETRY: REDUNDANT MEASUREMENTS OF RADIANT TEMPERATURE AT THE LOGARITHMIC FUNCTION OF TRANSFORMATION OF MEASURING CHANNEL

Abstract — In the paper are noted by advantages of contactless optic-electronic methods of measurement of temperature in comparison with contact and the basic lacks. Importance of contactless temperature measurements on an example of formation processes of glass, glassmakings and manufactures of products from glass and a role of knowledge of dependence of viscosity from temperature in reception of products of high quality is shown. As an example typical dependence of viscosity on temperature is resulted. It is established, that for today there is enough of works and patents of Ukraine, describing methods of redundant measurements of radiating temperature and the technical decisions of radiating pyrometers representing a new scientific direction in fundamental metrology — redundant pyrometer. It is offered for contactless high-precision definition of temperature of the molten glass to use methods of redundant measurements of radiating temperature at logarithmic function of transformation of the measuring channel. Definition of the theory of redundant measurements of radiating temperature, subject of researches and structure is resulted. It is ascertained, that all methods of redundant measurements differ from methods of direct measurements by structure of mathematical model, a kind of the equations of redundant measurements and are described not by one, but system of mathematical models. Their structure and kind depend on a kind of function of transformation of the measuring channel, from number of the chosen numbers of the physical sizes which are subject to measuring transformation, and also from a kind of natural communications between the sizes of input quantities.

The problem of redundant measurements of the radiating temperature, concerning a category of measuring problems with attributed to object of measurements by the mathematical model described, in the considered case, the fundamental Stefan – Boltzmann law is considered. Feature given problems is definition of the actual value of physical quantities (temperature) of not directed action through measuring transformation of physical quantities of the directed action (— streams of optical radiation) thanks to existence of Stefan – Boltzmann law.

It is offered for drawing up of mathematical models and possibility of their decision to use numbers of input quantities, which are connected among themselves under the law of an arithmetic progression. Affirms, that use and other numbers of the input quantities connected among themselves definitely is possible. It is made and for the first time the mathematical model of process of redundant measurements of radiating temperature is described at logarithmic function of transformation of the measuring channel. For the first time the equations of redundant measurements and the equation of numerical values for definition of the actual value of temperature of object of researches and parameters of logarithmic function of transformation of the measuring channel, and also the power of the dark stream of optical radiation are deduced. It is established and shown, that the result of measurements of temperature does not depend on values of parameters of function of transformation of the measuring channel, the power of the dark stream, and also from values of operating ratio of a stream of optical radiation from object and the transmittance of optical radiation stream by a layer of atmosphere from object to radiometer.

Methods of redundant measurements provide increase of accuracy of measurements of radiating temperature and expansion from below and from above a range of measured values of temperatures at the expense of an exception of influence on result of measurements of the parameters characterizing quality of environment and current values of parameters of nonlinear function of transformation. Definition of parameters logarithmic ФП and their deviations from rating values during set calendar time of carrying out of measurements, give the chance to predict metrological reliability of the measuring apparatuses in present situations of time of its operation. Direct methods of measurements do not possess such possibilities.

The function chart of the digital pyrometer realising a method of redundant measurements of radiating temperature is resulted, and its work is described. It is ascertained, that the given technical decision provides high accuracy of measurements and wide functionality both on data processing, and on their representation to the user (operator). It is reached at the expense of use, except the optic-electronic channel and executive mechanisms, the microconverter, the electronic stabilizer of temperature of a photodetector, an operative memory, hours of real time, the multiplexer, digital printer device and the shaper of signals of management. Thanks to introduction of the microconverter and an operative memory there was possible a reduction of hardware expenses at the expense of an exception of external ADC and DAC and performance of great volume of calculations. Work is of interest for masters, experts and scientists, the interested measurements of radiant temperature.

Keywords: pyrometry, methods of redundant measurements, radiant temperature, function of transformation.

Введение

В настоящее время все большее внимание уделяется развитию методов и средств бесконтактного измерения температуры. В их основу положено определение температуры по тепловому излучению объекта исследований.

Преимуществами бесконтактных оптико-электронных методов измерения температуры по сравнению с контактными являются [1]:

1) высокое быстродействие, определяемое типом приемника излучения и алгоритмом обработки электрических сигналов. При использовании фотодиодов и быстродействующих аналогово-цифровых преобразователей (АЦП) постоянная времени может составлять $(10^{-2} - 10^{-6})$ с ;

2) возможность измерения температуры движущихся объектов и элементов оборудования, в том числе находящихся под высоковольтным потенциалом;

3) отсутствие искажения температурного поля объекта исследований, что особенно актуально при измерении температуры материалов с низкой теплопроводностью (дерево, пластик и др.), а также риска повреждения поверхности и формы в случае мягких (пластичных) объектов;

4) возможность измерения высоких температур, при которых применение контактных средств измерения либо невозможно, либо время их работы очень невелико;

5) возможность работы в условиях повышенной радиации и температуры окружающей среды (до 250°C) при размещении приемной головки и самого пирометра с помощью оптоволоконного кабеля;

6) возможность измерения температуры без отключения объекта исследований от техпроцесса;

7) обеспечение безопасности персонала, измерение температуры до 3000°C .

К числу основных недостатков относятся: трудность полного учета связей между термодинамической температурой объекта и регистрируемой пирометром тепловой радиацией, изменение излучательной способности поверхности от длины волны в регистрируемом спектральном диапазоне и от температуры T_x в диапазоне измерений, наличие поглощения излучения в среде между пирометром и объектом исследований, а также геометрические параметры поля зрения.

К числу средств бесконтактного измерения температуры по тепловому излучению объекта относятся пирометры и тепловизоры. Пирометры, например, обеспечивают измерение температуры круговой зоны, ограниченной полем зрения прибора и ее усреднение в пределах данной зоны. При этом зона видимости пирометра зависит от расстояния до объекта и от оптического разрешения пирометра. Варьируя этими двумя параметрами можно с помощью пирометра измерять как температуру тонкой проволоки, так и среднюю температуру поверхности крупногабаритных объектов.

Тепловизоры обеспечивают определение значений температуры и преобразования их в визуальную картину распределения тепловых полей по поверхности объекта исследований. В результате получают обобщенную информацию в виде тепловой картины некоторой области и конкретное значение температуры интересующего объекта, размер которого равен или больше размера элементарной ячейки поля зрения тепловизора [1].

В связи с вышеизложенным, по-прежнему актуальной является задача борьбы с указанными выше недостатками бесконтактных методов измерений температуры и разработка новых методов и пирометров, обеспечивающие высокоточное измерение температуры труднодоступных объектов в широком диапазоне температур.

Объект исследований — процесс бесконтактного измерения температуры нагретых тел оптико-электронными методами.

Предмет исследований — избыточные измерения температуры нагретых тел при логарифмической функции преобразования измерительного канала с фотоприемником.

Целью работы является разработка метода избыточных измерений и оценка его возможностей при логарифмической функции преобразования измерительного канала с фотоприемником.

Результаты исследований

Покажем важность бесконтактных температурных измерений на примере процессов стеклообразования, стекловарения и производства изделий из стекла и роль знания зависимости вязкости от температуры в получении изделий высокого качества.

Основным фактором, определяющим легкость стеклообразования в том или ином расплаве является зависимость вязкости от температуры (рис.1). Как утверждается в [2], легкость стеклообразования обеспечивается в двух случаях: а) если температуре плавления стекломассы в кристаллической фазе соответствует очень большое значение вязкости расплава; б) если при понижении температуры расплава значение вязкости очень быстро растет.

Знание значения вязкости важно также при определении условий плавления шихты, температуры отжига, необходимой для снятия внутренних напряжений, температурного интервала формирования промышленных изделий из стекла. От вязкости зависит верхнее граничное значение температуры эксплуатации стекла и условия, при которых может произойти девитрификация (спонтанная кристаллизация). Большое значение вязкости при температуре перехода шихты в стеклообразное состояние является причиной проявления вязкоупругих свойств и временной зависимости многих свойств расплава.

На рис. 1 приведены реперные точки температурной зависимости вязкости. Дадим им краткую

характеристику в соответствие с данными работы [2]. Точка начала деформации — это значение температуры, при которой напряжение снимается в течении нескольких часов. Она соответствует вязкости $10^{13,5}$ Па·с. После формирования изделия возникшие внутренние напряжения устраняются в процессе отжига. Отжиг изделий осуществляется при температуре, для которой вязкость находится в пределах 10^{12} Па·с – $10^{12,4}$ Па·с, а сами напряжения устраняются в течение нескольких минут. При температуре T_g стекло обладает свойством твердого упругого тела с хрупким разрушением.

Промышленные методы изготовления высококачественных изделий из стекла требуют очень точного контроля значения вязкости во время его формования. Известно [2], что, например, точка размягчения содо-

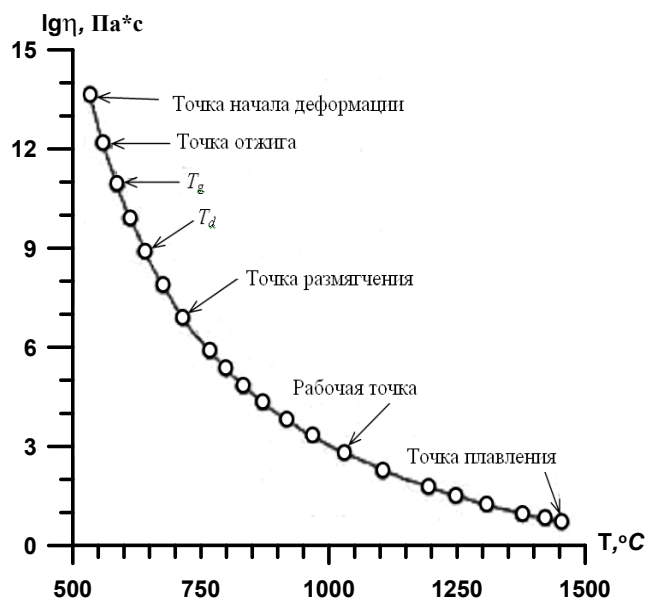


Рис.1. Типичная зависимость вязкости от температуры для содо-известково-силикатного расплава (NIST стандарт №710)

известково-силикатного расплава стекломассы соответствует вязкости $10^{6,6}$ Па·с. Формование изделий машинным способом осуществляется при вязкости 10^3 Па·с, называемой рабочей точкой. Область температур между рабочей точкой и точкой размягчения называется рабочей областью. От ширины и значений температур рабочей области зависят и типы стекол (длинные или короткие стекла, твердые или мягкие), их характеристики.

Практической температурой плавления промышленных стекол называется та температура, для которой вязкость не превышает 10^1 Па·с и при которой за заданное время могут быть проведены процессы осветления и гомогенизации стекломассы. Несиликатные и неоксидные стекла плавятся и при более низких значениях вязкости.

Для определения вязкости стекломассы конкретного вида стекла предлагается использовать типовую температурную характеристику.

В узком диапазоне температур вязкость определяется согласно уравнения величин [3]:

$$\ln \eta_x = S_0 \left(k_1 + \frac{B_{ст}}{S_0 T_x} \right),$$

где S_0 и $B_{ст}$ — некоторые постоянные величины, зависящие от вида стекла, $k_1 = 1$.

Зная S_0 и $B_{ст}$ для конкретного вида стекла, не трудно определить и вязкость расплава стекломассы по значению его температуры.

Для бесконтактного высокоточного определения температуры расплава стекломассы предлагается использовать методы избыточных измерений [4 – 19], которые представляет собой новое научное направление в фундаментальной метрологии — избыточную пирометрию [20].

Следуя [19], можно утверждать, что теория избыточных измерений радиационной температуры — это система частных законов, принципов, методов, математических моделей, положений и условий, характеризующая новую стратегию измерений радиационной температуры при нелинейной и нестабильной функции преобразования сенсора или измерительного канала в целом, предлагающая новые пути линейного и нелинейного измерительного преобразования потоков оптического излучения от нагретых тел и предсказывающая достижимые результаты по точности, чувствительности, быстродействию и метрологической надежности.

Предметом исследований теории избыточных измерений радиационной температуры является: познание собственных законов строения, функционирования и развития; новая стратегия избыточных измерений радиационной температуры, ее приращений, зависимостей и характеристик, а также характеристик метрологической надежности микропроцессорных пирометров с неизвестными, в общем случае, и нестабильными параметрами нелинейной функции преобразования измерительного канала, направленная на получение нового качества измерений и знаний о текущем состоянии измерительного канала, а также на развитие и становление избыточной пирометрии и соответствующей эталонной базы, развитие сенсоров и биосенсоров для определения радиационной температуры.

Сердцевину теории избыточных измерений радиационной температуры составляют входящие в нее частные законы развития. Категории образуют каркас теории. Научные принципы, как основные исходные положения, составляют фундамент теории.

На сегодняшний день существует достаточное количество работ и патентов Украины, описывающие методы избыточных измерений радиационной температуры и технические решения радиационных пирометров [5 – 20].

Ниже рассматривается задача избыточных измерений радиационной температуры, относящаяся к категории измерительных задач с приписываемой объекту измерений математической моделью, описываемой, в данном случае, законом Стефана – Больцмана [21]:

$$\Phi_x = A'\sigma T_x^4, \tag{1}$$

где $A' = A\tau_{\lambda_c}$; A — коэффициент использования потока оптического излучения от объекта; τ_{λ_c} — коэффициент пропускания потока оптического излучения слоем атмосферы на длине волны λ_c ; $\sigma = 5,6696 \cdot 10^{-8} \text{ [Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4]$ — постоянная Стефана – Больцмана; $T_x \text{ [К]}$ — измеряемая температура.

Особенностью данной задач является определение действительного значения физической величины (температуры) ненаправленного действия через измерительное преобразование физических величины направленного действия (— потоков оптического излучения) благодаря существованию фундаментального закона (1).

Бесконтактные измерения температуры нагретых тел с использованием методов избыточных измерений (МИИ) 1-го рода является весьма перспективным, поскольку обеспечивают автоматическое исключение систематических составляющих погрешности результата измерений, вызванных влиянием на него абсолютных значений параметров функции преобразования (ФП) измерительного канала и их отклонения от номинальных значений. При наличии случайных помех и наводок используются методы избыточных измерений II-го и III-го родов [22].

Все МИИ отличаются от методов прямых измерений структурой математической модели и видом уравнений избыточных измерений. МИИ описываются не одной, а системой математических моделей. Как будет показано ниже, их структура и вид зависят от вида ФП измерительного канала, от числа выбранных рядов физических величин, подлежащих измерительному преобразованию, а также от вида закономерных связей между размерами входных величин.

Предположим, что в качестве фотоприемника используется фотодиод ФД 307. Известно, что функция преобразования фотодиода, работающего в фотодиодном режиме, описывается следующим уравнением величин

$$U'_{\text{нх}} = k'_{\text{ус}} \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{S_I \Phi_x}{I_T} + k_1 \right) + \Delta U' = S'_\text{н} \ln \left(\frac{\Phi_x}{\Phi_T} + k_1 \right) + \Delta U', \tag{2}$$

где $U'_{\text{нх}}$ — выходное напряжение измерительного канала; $k'_{\text{ус}}$ — коэффициент усиления усилителя с фото-диодом; $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура (293 К); $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ — заряд электрона; S_I — токовая чувствительность фотодиода; Φ_x — мощность потока оптического излучения, падающего на фотодиод; I_T — темновой ток фотодиода; $k_1 = 1$; $S'_\text{н} = k'_{\text{ус}} kT/q$ — крутизна преобразования, зависящая как от коэффициента усиления усилителя и его отклонения от номинального значения, так и от абсолютной температуры; $S'_\text{н} = S_\text{н}(1 + \gamma_\text{н})$; $\Phi_T = I_T / S_I$ — мощность темнового потока; U' — смещение логарифмической функции преобразования с учетом дрейфа нуля ($U' = U'_{\text{см}} + \Delta_{\text{др}}$).

Для составления математических моделей и возможности их решения предложено использовать следующие ряды входных величин $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4$ и Φ_5 , из которых размеры второй и третьей, четвертой и пятой связаны между собой по закону арифметической прогрессии. При этом имеет место следующие равенства размеров: $\{\Phi_1\} = \{\Delta\Phi_0\}$, $\{\Phi_2\} = \{\Phi_0\}$, $\{\Phi_3\} = \{\Phi_0\} + \{\Delta\Phi_0\}$, $\{\Phi_4\} = \{\Phi_x\}$, $\{\Phi_5\} = \{\Phi_x\} + \{\Delta\Phi_0\}$. Возможно использование рядов входных величин, размеры которых связаны между собой по закону геометрической прогрессии или комбинированного типа.

В данном случае система нелинейных уравнений величин, описывающая состояние измерительного канала в дискретные моменты времени измерительного преобразования мощностей пяти потоков оптического излучения $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4$ и Φ_5 , примет вид:

$$\left. \begin{aligned} U'_{\text{н1}} = S'_\text{н} \ln \left(\frac{\Delta\Phi_0}{\Phi_T} + k_1 \right) + \Delta U', \quad U'_{\text{н3}} = S'_\text{н} \ln \left(\frac{\Phi_0 + \Delta\Phi_0}{\Phi_T} + k_1 \right) + \Delta U', \quad U'_{\text{н5}} = S'_\text{н} \ln \left(\frac{\Phi_x + \Delta\Phi_0}{\Phi_T} + k_1 \right) + \Delta U', \\ U'_{\text{н2}} = S'_\text{н} \ln \left(\frac{\Phi_0}{\Phi_T} + k_1 \right) + \Delta U', \quad U'_{\text{н4}} = S'_\text{н} \ln \left(\frac{\Phi_x}{\Phi_T} + k_1 \right) + \Delta U', \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

где $U'_{\text{нi}}$ — выходное напряжение измерительного канала; Φ_0 и $\Delta\Phi$ — нормированные по значению мощности потоки оптического излучения, [Вт]; $\Delta U' \text{ [В]}$ — смещение ФП с учетом аддитивной составляющей погрешности измерительного преобразования потоков оптического излучения (дрейфа нуля).

Выведем базовое уравнение избыточных измерений мощности потока оптического излучения Φ_x . Для этого вычтем правые и левые равенства для напряжений U_5 и U_4 системы (3):

$$U'_5 - U'_4 = S'_H \ln \frac{\frac{\Phi_x + \Phi_T + \Delta\Phi_0}{\Phi_T}}{\frac{\Phi_x + \Phi_T}{\Phi_T}} = S'_H \ln \left(\frac{\Delta\Phi_0}{\Phi_x + \Phi_T} + k_1 \right), \quad (4)$$

Решая (4) относительно S'_H , получим уравнение избыточных измерений крутизны преобразования через мощности искомого и нормированного по значению потоков оптического излучения Φ_x и $\Delta\Phi_0$ в виде:

$$S'_H = \frac{U'_5 - U'_4}{\ln \left[\frac{\Delta\Phi_0}{\Phi_x + \Phi_T} + k_1 \right]}. \quad (5)$$

Определим разность правых и левых частей равенств для напряжений U_3 и U_2 системы (3):

$$U'_3 - U'_2 = S'_H \ln \frac{\frac{\Phi_0 + \Phi_T + \Delta\Phi_0}{\Phi_T}}{\frac{\Phi_0 + \Phi_T}{\Phi_T}} = S'_H \ln \left[\frac{\Delta\Phi_0}{\Phi_0 + \Phi_T} + k_1 \right]. \quad (6)$$

Из равенства (6) получим уравнение избыточных измерений крутизны преобразования, выраженное через мощности двух нормированных по значению потоков оптического излучения Φ_0 и $\Delta\Phi_0$ в виде:

$$S'_H = \frac{U'_3 - U'_2}{\ln \left[\frac{\Delta\Phi_0}{\Phi_0 + \Phi_T} + k_1 \right]}. \quad (7)$$

Приравняем уравнения избыточных измерений параметра S'_H (5) и (7) и получим базовое уравнение избыточных измерений в неявном виде:

$$\frac{U'_5 - U'_4}{U'_3 - U'_2} = \frac{\ln \left[\frac{\Delta\Phi_0}{\Phi_x + \Phi_T} + k_1 \right]}{\ln \left[\frac{\Delta\Phi_0}{\Phi_0 + \Phi_T} + k_1 \right]}. \quad (8)$$

Поскольку уравнение избыточных измерений (8) получено в неявном виде, то их решение осуществляется путем перебора с заданным шагом всех дискретных значений мощностей искомого потока оптического излучения Φ_x , т.е. методом итераций.

В явном виде уравнение избыточных измерений мощности искомого потока оптического излучения получается более громоздким. Действительно, если осуществить потенцирование аналитического выражения (8) и решить полученное равенство относительно Φ_x , то получим уравнение избыточных измерений в виде:

$$\Phi_x = \frac{\Delta\Phi_0 - \Phi_T \left[\frac{U'_5 - U'_4}{U'_3 - U'_2} \ln \left(\frac{\Delta\Phi_0}{\Phi_0 + \Phi_T} + k_1 \right) - k_1 \right]}{\left[\frac{U'_5 - U'_4}{U'_3 - U'_2} \ln \left(\frac{\Delta\Phi_0}{\Phi_0 + \Phi_T} + k_1 \right) - k_1 \right]}. \quad (9)$$

Для практических расчетов целесообразно использовать уравнение избыточных измерений (8).

В (8) и (9) неизвестной величиной является мощность темнового потока оптического излучения Φ_T . Для ее определения найдем разности левых и правых частей равенств напряжений U_2 и U_1 системы (3):

$$U'_2 - U'_1 = S'_H \left[\ln \frac{\Phi_0 + \Phi_T}{\Delta\Phi_0 + \Phi_T} \right]. \quad (10)$$

С учетом (7), получим уравнение избыточных измерений мощности темнового потока оптического излучения (при известных значениях мощностей потоков оптического излучения Φ_0 и $\Delta\Phi_0$ и результатах измерительного преобразования первых трех физических величин) в виде:

$$\frac{U'_2 - U'_1}{U'_3 - U'_2} = \frac{\ln \frac{\Phi_0 + \Phi_T}{\Delta\Phi_0 + \Phi_T}}{\ln \left(\frac{\Delta\Phi_0}{\Phi_0 + \Phi_T} + k_1 \right)}. \quad (11)$$

Определив значение мощности потока оптического излучения по уравнению избыточных измерений (11), не трудно определить действительное значение мощности искомого потока оптического излучения Φ_x по уравнению избыточных измерений (8) или (9) и значения крутизны преобразования как по уравнению избыточных измерений (7), так и по уравнению избыточных измерений (5).

Поскольку уравнение избыточных измерений мощности темного потока оптического излучения (11) получают только в неявном виде, то его решение проводится методом итерации, т.е. путем перебора с заданным шагом всех возможных дискретных значений мощности темного потока оптического излучения Φ_T .

Из полученных аналитических выражений (8), (9) и (12) видно, что результаты избыточных измерений мощностей искомого и темного потоков оптического излучения не зависят от параметров логарифмической функции преобразования (абсолютной температуры, заряда электрона, постоянной Больцмана, темновото тока и токовой чувствительности, коэффициента усиления усилителя с линейной функцией преобразования и нестабильности ее параметров).

Смещение логарифмической функции преобразования определяется по результатам измерительного преобразования первой и второй физических величин, т.е. при решении, например, первого или второго нелинейных уравнения величин системы (3) относительно $\Delta U'$. В результате, с учетом (7), получаем:

$$\Delta U' = U'_1 - S'_H \ln \left(\frac{\Delta\Phi_0}{\Phi_T} + k_1 \right) = U'_1 - (U'_3 - U'_2) \frac{\ln \left(\frac{\Delta\Phi_0}{\Phi_T} + k_1 \right)}{\ln \left(\frac{\Delta\Phi_0}{\Phi_0 + \Phi_T} + k_1 \right)} \quad (12)$$

или

$$\Delta U' = U'_2 - S'_H \ln \left(\frac{\Phi_0}{\Phi_T} + 1 \right) = U'_2 - (U'_3 - U'_2) \frac{\ln \left(\frac{\Phi_0}{\Phi_T} + 1 \right)}{\ln \left[\frac{\Delta\Phi_0}{\Phi_0 + \Phi_T} + k_1 \right]}. \quad (13)$$

Согласно (1), температура объекта исследований, например, расплава стекломассы может быть определена из закона Стефана – Больцмана как

$$T_x = \sqrt[4]{\frac{\Phi_x}{A'\sigma}}, \quad (14)$$

при условии, что известны коэффициент использования потока оптического излучения от объекта исследований и коэффициент пропускания потока оптического излучения слоем атмосферы от объекта до радиометра. Для исключения влияния этих параметров на результат измерения температуры используют нагретое тело или участок расплава стекломассы, температура T_0 которого известна с наперед заданной точностью. Достижение расплавом температуры T_0 определяется, например, и по реперным точкам температурной кривой вязкости стекломассы при использовании вискозиметра или датчика температуры разового действия.

В момент появления сигнала о достижении температуры расплава значения T_0 , осуществляется измерение мощности потока оптического излучения Φ_{01} описанным методом избыточных измерений. В этом случае система нелинейных уравнений величин примет вид:

$$\left. \begin{aligned} U''_{H1} &= S''_H \ln \left(\frac{\Delta\Phi_0}{\Phi_T} + k_1 \right) + \Delta U'', \quad U''_{H3} = S''_H \ln \left(\frac{\Phi_0 + \Delta\Phi_0}{\Phi_T} + k_1 \right) + \Delta U'', \quad U''_{H5} = S''_H \ln \left(\frac{\Phi_{01} + \Delta\Phi_0}{\Phi_T} + k_1 \right) + \Delta U'', \\ U''_{H2} &= S''_H \ln \left(\frac{\Phi_0}{\Phi_T} + k_1 \right) + \Delta U'', \quad U''_{H4} = S''_H \ln \left(\frac{\Phi_{01}}{\Phi_T} + k_1 \right) + \Delta U'', \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

где U''_{Hi} — выходное напряжение измерительного канала при новых измерительных преобразованиях входных величин; S''_H — измененная по значению крутизна преобразования; $\Delta U''$ — измененное по значению смещение ФП.

В результате решения системы нелинейных уравнений величин (15) получают следующие уравнения избыточных измерений:

$$S''_H = \frac{U''_5 - U''_4}{\ln \left[\frac{\Delta\Phi_0}{\Phi_{01} + \Phi_T} + k_1 \right]}, \quad (16)$$

$$S_H'' = \frac{U_3'' - U_2''}{\ln \left[\frac{\Delta\Phi_0}{\Phi_0 + \Phi_T} + k_1 \right]}, \quad (17)$$

$$\frac{U_5'' - U_4''}{U_3'' - U_2''} = \frac{\ln \left[\frac{\Delta\Phi_0}{\Phi_{01} + \Phi_T} + k_1 \right]}{\ln \left[\frac{\Delta\Phi_0}{\Phi_0 + \Phi_T} + k_1 \right]}, \quad (18)$$

где значение темнового тока определяется согласно уравнению избыточных измерений, полученному в неявном виде:

$$\frac{U_2'' - U_1''}{U_3'' - U_2''} = \frac{\ln \frac{\Phi_0 + \Phi_T}{\Delta\Phi_0 + \Phi_T}}{\ln \left(\frac{\Delta\Phi_0}{\Phi_0 + \Phi_T} + k_1 \right)}. \quad (19)$$

В явном виде уравнение избыточных измерений мощности потока оптического излучения Φ_{01} имеет вид, аналогичный (9):

$$\Phi_{01} = \frac{\Delta\Phi_0 - \Phi_T \left[\frac{U_5'' - U_4''}{U_3'' - U_2''} \ln \left(\frac{\Delta\Phi_0}{\Phi_0 + \Phi_T} + k_1 \right) - k_1 \right]}{\left[\frac{U_5'' - U_4''}{U_3'' - U_2''} \ln \left(\frac{\Delta\Phi_0}{\Phi_0 + \Phi_T} + k_1 \right) - k_1 \right]} \quad (20)$$

Определив мощность потока оптического излучения Φ_{01} , соответствующее известной по значению температуре T_0 , при тех же условиях (значениях коэффициентов) использования потока оптического излучения от объекта и его пропускания слоем атмосферы от объекта до радиометра, окончательно получаем результат избыточных измерений температуры по уравнению измерений

$$T_x = \sqrt[4]{\frac{\Phi_x}{A'\sigma}} = T_{01} \sqrt[4]{\frac{\Phi_x}{\Phi_{01}}}. \quad (21)$$

При необходимости можно определить обобщенный показатель качества (оптической прозрачности) воздушной среды между объектом исследований и пирометром

$$A' = \Phi_{01} / \sigma T_0^4. \quad (22)$$

На основании полученных уравнений избыточных измерений, можно констатировать, что методы избыточных измерений обеспечивают повышение точности измерений радиационной температуры и расширение снизу и сверху диапазона измеряемых значений температур за счет исключения влияния на результат измерения параметров, характеризующих качество окружающей среды, и текущих значений параметров нелинейной функции преобразования. Определение параметров логарифмической ФП и отклонений их от номинальных значений в течение заданного календарного времени проведения измерений, дают возможность прогнозировать метрологическую надежность средств измерений, реализующих МИИ, в текущие моменты времени его эксплуатации [23 – 25]. Прямые методы измерений такими возможностями не обладают.

Таким образом, описанный метод избыточных измерений обеспечивает высокоточное определение не только действительного значения температуры, но и значений параметров логарифмической функции преобразования фотоприемника, а также обобщенный показатель оптической прозрачности воздушной среды между объектом исследований и пирометром согласно приведенным уравнениям измерений.

Рассмотрим один из вариантов технической реализации описанного метода избыточных измерений на примере функциональной схемы цифрового пирометра, приведенной на рис. 2.

На рис. 2 приведена функциональная схема цифрового пирометра спектрального отношения, где введены следующие условные обозначения: СО1 и СО2 — первый и второй стеклянные объективы, ФЗ — фотозатвор, прерывающий поток оптического излучения, ППП — полупрозрачная пластина, ЗПД — зеркальная полевая диафрагма, ОЗ — отражательное зеркало, ПС — поглощающее стекло с визиром, ОД — obtюраторный диск, МДв — микродвигатель, АД — апертурная диафрагма, СП — сеточный поглотитель из нейтрального стекла, ФЛ — фокусирующая линза, СФ — составной светофильтр с заданными граничными длинами волн полос пропускания: $\Delta\lambda_1 = \lambda_2 - \lambda_1$ и $\Delta\lambda_2 = \lambda_4 - \lambda_3$; ФП — фотоприемник, ЭСТ — электронный стабилизатор температуры фотоприемника, ИИ — источник излучения, СИД — светоизлучающий диод, ФФС — фотоприемник-формирователь синхроимпульсов, СД — синхронный детектор, МК — микроконвертор с клавиатурой, ЖКИ — жидкокристаллический индикатор, УМ — усилитель мощности; ЦАП — цифроаналоговый преобразователь, РЧ — регистр числа, ИМИ — источник монохроматического излучения, ПКП1 и ПКП2 — первый и второй преобразователи «код-перемещение», ОШ — общая шина.

Работа цифрового пирометра, функциональная схема которого приведена на рис. 2, состоит в следующем. В память МК записывается программа выполнения заданной последовательности операций.

Эта программа обеспечивает функционирование цифрового пирометра как единого программно-технического средства измерения, а также обработку результатов промежуточных измерений по априори установленным уравнениям числовых значений.

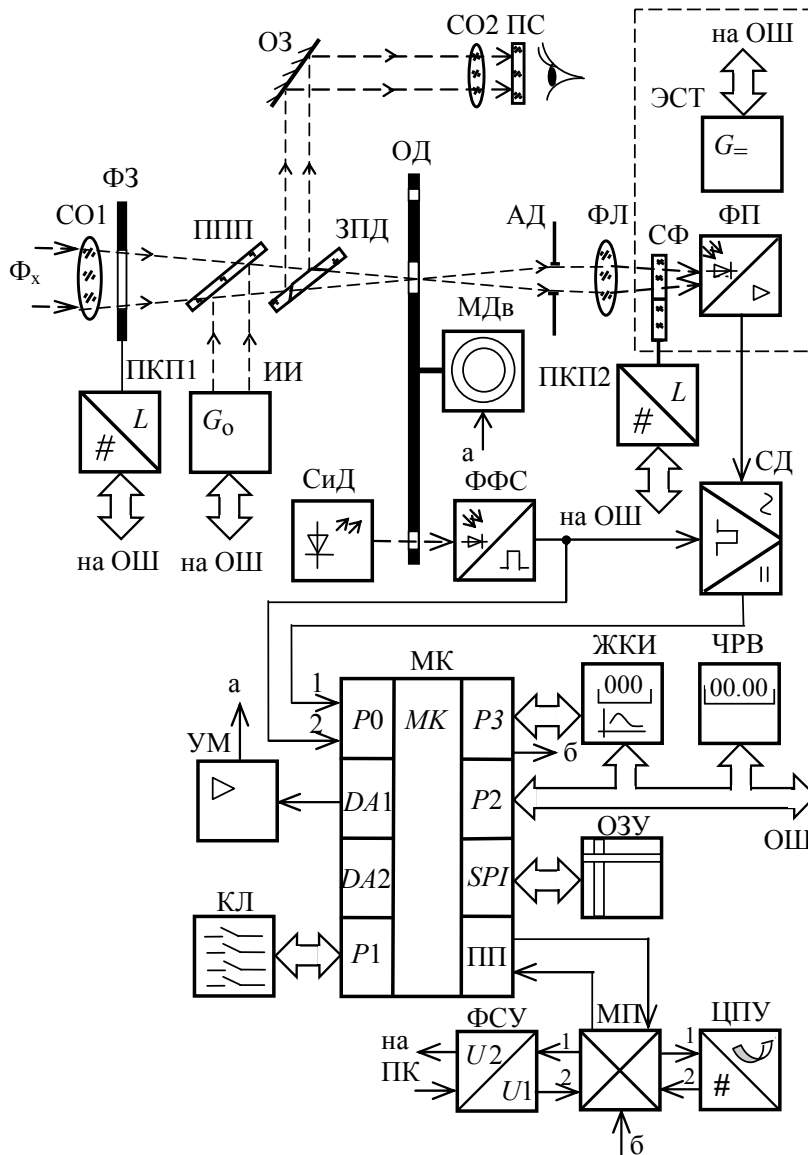


Рис. 2. Функциональная схема цифрового пирометра

После включения питания цифрового пирометра по команде с микроконвертора МК все функциональные блоки устанавливаются в исходное состояние. На экране ЖКИ какие-либо данные отсутствуют. Фотозатвор ФЗ находится в закрытом или открытом состоянии, при котором модулированные по амплитуде потоки оптического излучения $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4$ и Φ_5 поочередно поступают через оптический канал на вход фотоприемника ФП.

Необходимо отметить, что модуляция потока оптического излучения осуществляется с помощью обтюраторного диска ОД, вращаемого микродвигателем МДв постоянного тока. Управление микродвигателем МДв выполняется путем подачи на его управляющий вход постоянного напряжения с выхода порта DA1, усиленного с помощью усилителя мощности УМ. Отметим, что выхода порта DA1 является выходом встроенного в МК цифроаналогового преобразователя. Модулированный поток оптического излучения с помощью фотоприемника ФП преобразуется в переменное напряжение низкой частоты (1 – 10 кГц). Последняя поддерживается стабильной во времени благодаря наличию сигнала обратной связи с выхода фотоприемника-формирователя синхроимпульсов ФФС на второй вход порта P0 МК. Этот сигнал получают путем подачи на ФФС потока оптического излучения с выхода светоизлучающего диода СИД и формирования последовательности нормированных по амплитуде и длительности импульсов, которые и представляют собой сигнал обратной связи. В случае изменения частоты вращения, выходное напряжение порта DA1 изменяется таким образом, чтобы установить заданное номинальное значение частоты вращения обтюраторного диска. Стабилизация частоты вращения обтюраторного диска обеспечивает повышение точности формирования и аналого-цифрового преобразования выходного сигнала синхронного детектора СД.

Выходной сигнал ФФС одновременно является и сигналом управления работой синхронного детектора СД.

Перед началом измерения с помощью объективов СО1 и СО2 цифровой пирометр направляется на нагретый объект исследования. По команде с микроконвертора МК на первый преобразователь «код-перемещение» ПКП1 через ОШ подается цифровой код, при котором фотозатвор ФЗ открывается. Поток оптического излучения от исследуемого объекта через первый стеклянный объектив СО1, фотозатвор ФЗ, полупрозрачную пластину ППП попадает на зеркальную полевую диафрагму ЗПД. Отбившись от нее, указанный поток через отражательное зеркало ОЗ, второй стеклянный объектив СО2 и поглощающее стекло ПС с визиром поступает в глаза наблюдателя. После наведения на исследуемый объект, цифровой пирометр готов к измерению.

После нажатия кнопки «Пуск» на клавиатуре Кл, на МК поступает сигнал начала измерений. По команде с МК, поступающей через общую шину ОШ на вход второго преобразователя «код-перемещение» ПКП2, составной светофильтр СФ устанавливается в положение, указанное на рис. 2, при котором выделяется спектр оптического сигнала в области длин волн $\Delta\lambda_1 = \lambda_2 - \lambda_1$.

Весь процесс определения действительного значения температуры состоит из нескольких тактов измерительного преобразования разных по значению мощности потоков оптического излучения и тактов обработки полученных результатов.

В первом такте по команде с микроконвертора МК фотозатвор ФЗ закрывается, тем самым запрещается прохождение потока оптического излучения Φ_x от объекта исследований на фотоприемник ФП.

На управляющий вход источника излучения ИИ поступает цифровой сигнал, при котором на выходе ИИ устанавливается нормированный по значению мощности поток оптического излучения Φ_1 с заданными параметрами.

Отражаясь от полупрозрачной пластины ППП, поток оптического излучения Φ_1 ($\{\Phi_1\} = \{\Delta\Phi_0\}$) проходит через зеркальную полевую диафрагму ЗПД, отверстия обтюраторного диска АД, апертурную диафрагму АД, фокусирующую линзу ФЛ, светофильтр СФ и поступает на вход фотоприемника ФП в виде амплитудно-модулированного потока. С помощью фотоприемника ФП формируется переменный сигнал малого уровня, который усиливается в заданное число раз и детектируется с помощью синхронного детектора СД. На выходе последнего формируется напряжение $U'_{н1}$ (3).

Полученное постоянное напряжение $U'_{н1}$ поступает на вход «1» порта РО микроконвертора МК, который является входом встроенного в МК аналого-цифрового преобразователя (см. рис. 2). В результате осуществляется аналого-цифровое преобразование постоянного напряжения $U'_{н1}$ в код числа $N_1 = S_0 U'_{н1}$, где S_0 — крутизна встроенного аналого-цифрового преобразователя. Затем код числа N_1 записывается в память оперативного запоминающего устройства ОЗУ.

Во втором такте на управляющий вход источника оптического излучения ИИ поступает цифровой сигнал, при котором на выходе ИИ устанавливается нормированный по значению мощности поток оптического излучения Φ_2 ($\{\Phi_2\} = \{\Phi_0\}$) с заданными параметрами. Отражаясь от полупрозрачной пластины ППП, поток оптического излучения Φ_2 также проходит через зеркальную полевую диафрагму ЗПД, отверстия обтюраторного диска АД, апертурную диафрагму АД, фокусирующую линзу ФЛ, светофильтр СФ и поступает на вход фотоприемника ФП в виде амплитудно-модулированного потока. Выходной сигнал переменного тока с выхода фотоприемника ФП поступает на вход синхронного детектора СД и детектируется. На выходе синхронного детектора СД формируется напряжение $U'_{н2}$ (3).

Полученное постоянное напряжение $U'_{н2}$ поступает на вход «1» порта РО МК. В результате осуществляется аналого-цифровое преобразование напряжения $U'_{н2}$ в код числа $N_2 = S_0 U'_{н2}$, который записывается в память оперативного запоминающего устройства ОЗУ.

В третьем такте на управляющий вход источника излучения ИИ поступает цифровой сигнал, при котором на выходе ИИ устанавливается нормированный по значению мощности поток оптического излучения Φ_3 ($\{\Phi_3\} = \{\Phi_0\} + \{\Delta\Phi_0\}$) с заданными параметрами. Отражаясь от полупрозрачной пластины ППП, поток оптического излучения Φ_2 проходит через зеркальную полевую диафрагму ЗПД, отверстия обтюраторного диска АД, апертурную диафрагму АД, фокусирующую линзу ФЛ, светофильтр СФ и поступает на вход фотоприемника ФП в виде амплитудно-модулированного потока. С помощью фотоприемника ФП переменный сигнал усиливается, а затем детектируется с помощью синхронного детектора СД. На выходе последнего формируется напряжение $U'_{н3}$ (3).

Полученное постоянное напряжение $U'_{н3}$ поступает на вход «1» порта РО МК и преобразуется в код числа $N_3 = S_0 U'_{н3}$. Последний записывается в память оперативного запоминающего устройства ОЗУ.

В четвертом такте по команде с микроконвертора МК фотозатвор ФЗ открывается. Этим самым разрешается прохождение потока оптического излучения Φ_x от объекта исследований на фотоприемник ФП.

На управляющий вход источника излучения ИИ поступает цифровой сигнал, при котором на выходе ИИ поток оптического излучения отсутствует. Отражаясь от полупрозрачной пластины ППП, поток

оптического излучения Φ_4 ($\{\Phi_4\} = \{\Phi_x\}$) от объекта исследований проходит через стеклянный объектив СО1, фотозатвор ФЗ, полупрозрачную пластину ППП, зеркальную полевую диафрагму ЗПД, отверстия обтураторного диска АД, апертурную диафрагму ФД, фокусирующую линзу ФЛ, светофильтр СФ и поступает на вход фотоприемника ФП в виде амплитудно-модулированного потока. С помощью фотоприемника ФП данный поток преобразуется в переменное напряжение, усиливается и детектируется с помощью синхронного детектора СД. На выходе СД формируется напряжение $U'_{н4}$ (3), которое поступает на вход «1» порта РО МК. В результате аналого-цифрового преобразования постоянного напряжения $U'_{н4}$ в код числа $N_4 = S_0 U'_{н4}$. Код числа N_4 записывается в память оперативного запоминающего устройства ОЗУ.

В пятом такте по команде с микроконвертора МК на фотозатвор ФЗ поступает тот же сигнал, что и в предыдущем такте, т.е. ФЗ остается открытым. На управляющий вход источника излучения ИИ поступает цифровой сигнал, при котором на выходе ИИ устанавливается нормированный по значению мощности поток оптического излучения Φ_1 ($\{\Phi_1\} = \{\Delta\Phi_0\}$). Последний, отражаясь от полупрозрачной пластины ППП, одновременно с потоком оптического излучения Φ_x от объекта исследований поступает на зеркальную полевую диафрагму ЗПД, где потоки суммируются. Суммарный поток оптического излучения Φ_5 ($\{\Phi_5\} = \{\Phi_x\} + \{\Delta\Phi_0\}$) проходит через зеркальную полевую диафрагму ЗПД, отверстия обтураторного диска АД, апертурную диафрагму ФД, фокусирующую линзу ФЛ, светофильтр СФ и также поступает на вход фотоприемника ФП в виде амплитудно-модулированного потока. Выходной сигнал фотоприемника ФП детектируется с помощью синхронного детектора СД. На выходе последнего формируется напряжение $U'_{н5}$ (3).

Полученное постоянное напряжение $U'_{н5}$ поступает на вход «1» порта РО МК. В результате постоянное напряжение $U'_{н5}$ преобразуется в код числа $N_5 = S_0 U'_{н5}$, который записывается в память оперативного запоминающего устройства ОЗУ.

По полученным данным определяется крутизна преобразования по уравнению числовых значений

$$N_{S'н} = \frac{N_3 - N_2}{\ln \left[\frac{\{\Delta\Phi_0\}}{\{\Phi_0\} + \{\Phi_T\}} + 1 \right]}, \quad (23)$$

действительное значение мощности потока оптического излучения от объекта исследований —

$$N_{\Phi_x} = \frac{\{\Delta\Phi_0\} - \{\Phi_T\} \left[\frac{N_5 - N_4}{N_3 - N_2} \ln \left(\frac{\{\Delta\Phi_0\}}{\{\Phi_0\} + \{\Phi_T\}} + 1 \right) - 1 \right]}{\left[\frac{N_5 - N_4}{N_3 - N_2} \ln \left(\frac{\{\Delta\Phi_0\}}{\{\Phi_0\} + \{\Phi_T\}} + 1 \right) - 1 \right]}. \quad (24)$$

действительное значение смещения функции преобразования по уравнениям числовых значений:

$$\Delta N = N_1 - (N_3 - N_2) \frac{\ln \left(\frac{\{\Delta\Phi_0\}}{\{\Phi_T\}} + 1 \right)}{\ln \left(\frac{\{\Delta\Phi_0\}}{\{\Phi_0\} + \{\Phi_T\}} + 1 \right)} \quad (25)$$

или

$$\Delta N = N_2 - (N_3 - N_2) \frac{\ln \left(\frac{\{\Phi_0\}}{\{\Phi_T\}} + 1 \right)}{\ln \left[\frac{\{\Delta\Phi_0\}}{\{\Phi_0\} + \{\Phi_T\}} + 1 \right]}, \quad (26)$$

где мощность $\{\Phi_T\}$ темнового потока оптического излучения определяется по уравнению числовых значений, полученному в неявном виде:

$$\frac{N_2 - N_1}{N_3 - N_2} = \frac{\ln \frac{\{\Phi_0\} + \{\Phi_T\}}{\{\Delta\Phi_0\} + \{\Phi_T\}}}{\ln \left(\frac{\{\Delta\Phi_0\}}{\{\Phi_0\} + \{\Phi_T\}} + 1 \right)}. \quad (27)$$

С некоторой погрешностью температуру объекта исследований можно определить из закона Стефана – Больцмана как $N_{Tx} = \sqrt[4]{N_{\Phi_x} / A' \sigma}$, если известны коэффициент использования потока оптического излучения от объекта и коэффициент пропускания потока оптического излучения слоем атмосферы от объекта до радиометра.

В противном случае аналогичным образом проводятся избыточные измерения нормированной по значению температуры T_0 , заданной с наперед заданной точностью. Практически на объекте исследований или в непосредственной близости от него всегда может быть найдена область с температурой $T_0 = \text{const}$ в

спектральном диапазоне длин волн $\Delta\lambda_2 = \lambda_4 - \lambda_3$. В качестве нормированной по значению температуры T_0 может быть использована и реперная точка кривой вязкости стекломассы, определяемая с помощью, например, вискозиметра или датчика температуры разового действия, сигнал от которого разрешает в этот момент времени измерительное преобразование температуры T_0 в код числа N_0 .

Во втором цикле измерений вместо пяти тактов измерительного преобразования мощности потоков оптического излучения $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi'_4 (\{\Phi'_4\} = \{\Phi_{01}\})$ и $\Phi'_5 (\{\Phi'_5\} = (\{\Phi_{01}\} + \{\Delta\Phi_0\}))$, где Φ_{01} — поток оптического излучения от объекта исследований или его части, соответствующий температуре T_0 , проводятся только такты измерительного преобразования потоков оптического излучения Φ'_4 и Φ'_5 в напряжения. При этом, по команде с МК, поступающей на вход ПКП2, составной светофильтр СФ устанавливается в положение, противоположное указанному на рис. 2, при котором на вход фотоприемника поступает оптический сигнал в спектральном диапазоне длин волн $\Delta\lambda_2 = \lambda_4 - \lambda_3$. В результате измерительного преобразования потоков оптического излучения Φ'_4 и Φ'_5 два напряжения — U''_{H4} и U''_{H5} , а затем и соответствующие им коды чисел:

$$N''_4 = S_0 U''_{H4} = S_0 \left[S'_H \ln \left(\frac{\Phi_{01}}{\Phi_T} + k_1 \right) + \Delta U' \right] \quad (28)$$

и

$$N''_5 = S_0 U''_{H5} = S_0 \left[S'_H \ln \left(\frac{\Phi_{01} + \Delta\Phi_0}{\Phi_T} + k_1 \right) + \Delta U' \right]. \quad (29)$$

По окончании этих тактов осуществляется обработка полученных результатов измерительного преобразования согласно уравнению числовых значений:

$$N_{\Phi_{01}} = \frac{\{\Delta\Phi_0\} - \{\Phi_T\} \left[\frac{N''_5 - N''_4}{N_3 - N_2} \ln \left(\frac{\{\Delta\Phi_0\}}{\{\Phi_{01}\} + \{\Phi_T\}} + 1 \right) - k_1 \right]}{\left[\frac{N''_5 - N''_4}{N_3 - N_2} \ln \left(\frac{\{\Delta\Phi_0\}}{\{\Phi_{01}\} + \{\Phi_T\}} + 1 \right) - 1 \right]}, \quad (30)$$

где действительное значение мощности $\{\Phi_T\}$ темнового потока определяется по уравнению числовых значений (27).

Из аналитического выражения закона Стефана – Больцмана определим постоянную $A' = N_{\Phi_{01}} / \sigma N_{Tx}^4$, где действительное значение $N_{\Phi_{01}}$ (31) мощности потока оптического излучения, соответствующая температуре T_0 , получено при дополнительном проведении двух тактов измерительного преобразования входных величин Φ'_4 и Φ'_5 . Зная коэффициент использования потока оптического излучения от объекта и коэффициент пропускания потока оптического излучения слоем атмосферы от объекта до радиометра, окончательно получим, что действительное значение температуры объекта исследований равно:

$$N_{Tx} = N_{T01} \sqrt[4]{\frac{\Phi_x}{\Phi_{01}}} = \sqrt[4]{\frac{\{\Delta\Phi_0\} - \{\Phi_T\} \left[\frac{N_5 - N_4}{N_3 - N_2} \ln \left(\frac{\{\Delta\Phi_0\}}{\{\Phi_0\} + \{\Phi_T\}} + 1 \right) - 1 \right]}{\left[\frac{N_5 - N_4}{N_3 - N_2} \ln \left(\frac{\{\Delta\Phi_0\}}{\{\Phi_0\} + \{\Phi_T\}} + 1 \right) - 1 \right]} \bigg/ \frac{\{\Delta\Phi_0\} - \{\Phi_T\} \left[\frac{N''_5 - N''_4}{N_3 - N_2} \ln \left(\frac{\{\Delta\Phi_0\}}{\{\Phi_{01}\} + \{\Phi_T\}} + 1 \right) - 1 \right]}{\left[\frac{N''_5 - N''_4}{N_3 - N_2} \ln \left(\frac{\{\Delta\Phi_0\}}{\{\Phi_{01}\} + \{\Phi_T\}} + 1 \right) - 1 \right]}}}. \quad (32)$$

Если нет необходимости определять значения смещения логарифмической функции преобразования, то, как видно из (32), действительное значение температуры объекта исследований определяется за шесть тактов измерительного преобразования потоков оптического излучения и одного такта обработки полученных результатов.

Полученные результаты избыточных измерений температуры и параметров логарифмической функции преобразования измерительного канала цифрового пирометра заносятся в ОЗУ. По команде с микроконвертора МК они отображаются на жидкокристаллической индикаторе ЖКИ в виде структурированных числовых данных или в виде графика изменения температуры во времени, распечатываются в виде карты знаний с помощью ЦПУ и, по необходимости, передаются в центральный компьютер с помощью формирователя сигналов управления ФСУ (см. рис. 2). Последний подключен через мультиплексор МП к последовательному порту ПП микроконвертора МК. Отображение результатов измерения температуры в виде графика изменения температуры во времени стало возможным благодаря использованию часов реального времени ЧРВ (см. рис. 2). Включение и выключение цифрового пирометра и ручной ввод-вывод данных осуществляется с помощью клавиатуры Кл.

Если изменить программу таким образом, чтобы в первом такте осуществлялось измерительное преобразование потока оптического излучения нулевой мощности (при закрытом фотозатворе и выключенном источнике оптического излучения), то реализуется метод избыточных измерений, описанный в патенте Украины № 79192 [17].

Таким образом, описанный цифровой пирометр, реализующий метод избыточных измерений радиационной температуры, не сложен в реализации, обеспечивает высокую точность измерений и имеет

широкие функциональные возможности как по обработке полученных данных, так и по их представлению пользователю (оператору). Это достигается за счет использования, кроме оптико-электронного канала и исполнительных механизмов, микро-конвертора, электронного стабилизатора температуры фотоприемника, оперативного запоминающего устройства, часов реального времени, мультиплексора, цифрового печатающего устройства и формирователя сигналов управления.

Благодаря введению микроконвертора и оперативного запоминающего устройства стало возможным выполнение большого объема вычислений и уменьшение аппаратных затрат за счет исключения внешних аналого-цифрового и цифроаналогового преобразователей.

Выводы

Отмечены преимуществами и основные недостатки бесконтактных оптико-электронных методов измерения температуры по сравнению с контактными.

Показана важность бесконтактных температурных измерений на примере процессов стеклообразования, стекловарения и производства изделий из стекла и роль знания зависимости вязкости от температуры в получении изделий высокого качества. В качестве примера приведена типичная зависимость вязкости от температуры для содо-известково-силикатного расплава (NIST стандарт №710).

Установлено, что на сегодняшний день существует достаточное количество работ и патентов Украины, описывающих методы избыточных измерений радиационной температуры и технические решения радиационных пирометров, и представляющих собой новое научное направление в фундаментальной метрологии — избыточную пирометрию.

Предлагается для бесконтактного высокоточного определения температуры расплава стекломассы в широком динамическом диапазоне использовать методы избыточных измерений радиационной температуры при логарифмической функции преобразования измерительного канала.

Приведено определение понятия теории избыточных измерений радиационной температуры, предмет исследований и структура.

Констатируется, что все методы избыточных измерений отличаются от методов прямых измерений структурой математической модели, видом уравнений избыточных измерений и описываются не одной, а системой математических моделей. Их структура и вид зависят от вида функции преобразования измерительного канала, от числа выбранных рядов физических величин, подлежащих измерительному преобразованию, а также от вида закономерных связей между размерами входных величин.

Рассмотрена задача избыточных измерений радиационной температуры, относящаяся к категории измерительных задач с приписываемой объекту измерений математической моделью, описываемой, в рассматриваемом случае, фундаментальным законом Стефана – Больцмана. Особенностью данной задачи является определение действительного значения физической величины (температуры) ненаправленного действия через измерительное преобразование физических величины направленного действия (— поток оптического излучения) благодаря использованию закона Стефана – Больцмана.

Предложено для составления математических моделей и возможности их решения использовать ряды входных величин $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4$ и Φ_5 , которые связаны между собой по закону арифметической прогрессии. При этом $\{\Phi_1\} = \{\Delta\Phi_0\}$, $\{\Phi_2\} = \{\Phi_0\}$, $\{\Phi_3\} = \{\Phi_0\} + \{\Delta\Phi_0\}$, $\{\Phi_4\} = \{\Phi_x\}$, $\{\Phi_5\} = \{\Phi_x\} + \{\Delta\Phi_0\}$. Утверждается, что возможно использование и иных рядов входных величин, размеры которых связанных между собой определенным образом.

Составлена и впервые описана математическая модель процесса избыточных измерений радиационной температуры при использовании рядов входных величин $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4$ и Φ_5 при логарифмической функции преобразования измерительного канала.

Впервые выведены уравнения избыточных измерений и уравнения числовых значений для определения действительного значения температуры объекта исследований и параметров логарифмической функции преобразования измерительного канала, а также мощности темного потока оптического излучения.

Установлено и показано, что результат измерений температуры не зависит от значений параметров функции преобразования измерительного канала, мощности темного потока, а также от значений коэффициента использования потока оптического излучения от объекта и коэффициента пропускания потока оптического излучения слоем атмосферы от объекта до радиометра.

Методы избыточных измерений обеспечивают повышение точности измерений радиационной температуры и расширение снизу и сверху диапазона измеряемых значений температур за счет исключения влияния на результат измерений параметров, характеризующих качество окружающей среды и текущих значений параметров нелинейной функции преобразования. Определение параметров логарифмической ФП и отклонений их от номинальных значений в течение заданного календарного времени проведения измерений, дают возможность прогнозировать метрологическую надежность средств измерений, реализующих МИИ, в текущие моменты времени их эксплуатации. Прямые методы измерений такими возможностями не обладают.

Приведена функциональная схема цифрового радиационного пирометра отношения, реализующего метод избыточных измерений радиационной температуры, описана его работа.

Констатируется, что данное техническое решение обеспечивает высокую точность измерений и широкие функциональные возможности как по обработке полученных данных, так и по их представлению пользователю (оператору). Это достигается за счет использования, кроме оптико-электронного канала и

исполнительных механизмов, микроконвертора, электронного стабилизатора температуры фотоприемника, оперативного запоминающего устройства, часов реального времени, мультиплексора, цифрорпечатающего устройства и формирователя сигналов управления. Благодаря введению микроконвертора и оперативного запоминающего устройства стало возможным уменьшение аппаратных затрат за счет исключения внешних аналого-цифрового и цифро-аналогового преобразователей и выполнение большого объема вычислений.

Литература

1. Неделько А.Ю. Преимущества и недостатки бесконтактного измерения температуры [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://lityo.com.ua/%D1%81%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D0%B8/1949-preimushchestva-i-nedostatki-beskontaktnogo-izmereniya-temperatury>.
2. Бородулина Е. Структура, свойства и технология стекла. Вязкость [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://lenaborodulina.livejournal.com/13759.html>.
3. Технология производства и свойства кварцевых оптических волокон [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://pstu.ru/files/file/FPMM/of/tehnologiya_proizvodstva_opticheskikh_volokon.pdf.
4. Кондратов В.Т. Теория избыточных измерений / В.Т. Кондратов // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах . – 2005. – № 1. – С. 7-24.
5. Кондратов В.Т. Проблемы измерения температуры объектов экосистемы /В.Т. Кондратов, А.А. Зарницина // Материалы международной научно-практической конференции «Экологические проблемы промышленных мегаполисов», Донецк – Авдеевка, 01-04 июня 2004. – Донецк. ДонНТУ. – С. 499-505.
6. Кондратов В.Т. О создании пирометров отношения с автоматической коррекцией погрешностей / В.Т. Кондратов, А.А. Зарницина // Праці Луганського відділення міжнародної академії інформатизації. Луганськ. – 2005. – С. 123-127.
7. Kondratov V.T., Zarnitsyna A.A., Serdyuk N.M. Digital optical pyrometer with automatic correction of systematic errors. Journal of Automation and Information Sciences. 2003. Pp. 137 – 142 (Scopus search results: 15122747200).
8. Деклараци́нный патент 56614 А. Україна, МПК G01R7/00. Спосіб визначення дійсного значення температури / В.Т. Кондратов, Г.О. Зарницина, Н.М. Сердюк. – № 2002076364 ; заявл. 30.07.2002 ; опубл. 15.05.2003, – Бюл. № 5. – 14 с.
9. Деклараци́нный патент 66299 А. Україна. МПК G01J5/00, G01J5/10. Оптико-електронний спосіб надлишкових вимірювань температури / В.Т. Кондратов, Г.О. Зарницина, О.П. Рябов. – № 2003109797 ; заявлено 31.10.2003, опубл. 15.04.2004. Бюл. № 4. – 16 с.
10. Деклараци́нный патент 55947, Україна. МПК G01J5/08, G01K7/00. Оптичний пірометр / В.Т. Кондратов, Г.О. Зарницина. – № 2002076365 ; заявл. 30.07.2002 ; опубл. 15.05.2003 ; № Бюл. № 4. – 7 с.
11. Деклараци́нный патент № 68026 А, Україна. МПК G01J1/10, G01K7/00. Спосіб надлишкових вимірювань температури / В.Т. Кондратов, А.А. Зарницина, Н.М. Сердюк. – № 2003088013 ; заявл. 27.08.2003 ; опубл. 15.07.2004 ; Бюл. №7. – 9 с.
12. Деклараци́нный патент № 66084 А, Україна. МПК G01J5/20. Радіаційний пірометр / В.Т. Кондратов, Г.О. Зарницина, Н.М. Сердюк. – № 2003076909 ; заявл. 22.07.2003 ; опубл. 15.04.2004 ; Бюл. №4. – 6 с.
13. Пат. 73426. Україна. МПК G01J5/08. Пірометр спектрального відношення / В.Т. Кондратов, Г.О. Зарницина. – № 20031212097 ; заявл. 23.12.2003 ; опубл. 15.07.2005 ; Бюл. № 7. – 10 с.
14. Пат. 77840. Україна. МПК G01J5/08, G01K7/00. Цифровий пірометр відношення / В.Т. Кондратов, Г.О. Зарницина. – № a200501402 ; заявл. 15.02.2005 ; опубл. 15.01.2007 ; Бюл. №1. – 11 с.
15. Пат. 78064. Україна. МПК G01J5/00, G01J5/10. Спосіб надлишкових вимірювань дійсного значення температури / В.Т. Кондратов, Г.О. Зарницина. – № a200500301 ; заявл. 13.01.2005 ; Опубл. 15.02.2007 ; Бюл. №2. – 10 с.
16. Пат. 78428 С2. Україна. МПК G01J5/08. Оптичний пірометр / В.Т. Кондратов, Г.О. Зарницина. – № a200507705 ; заявл. 02.08.2005 ; опубл. 15.03.2007 ; Бюл. №3. – 6 с.
17. Пат. 79162. Україна. МПК G01J5/10, G01J5/00, G01K7/00. Оптико-електронний спосіб надлишкових вимірювань температури нагрітого об'єкту за спектральним відношенням / В.Т. Кондратов, Г.О. Зарницина. – № a200504466 ; заявл.13.05.2005 ; опубл.25.05.2007 ; Бюл. №7. – 8 с.
18. Пат. 79192. Україна. МПК G01J5/00, G01J5/10,G01K7/00. Оптико-електронний спосіб надлишко-вих вимірювань температури / В.Т. Кондратов, Г.О. Зарницина. – № a200507703 ; заявл. 02.08.2005 ; опубл. 25.05.2007 ; Бюл. №7. – 10 с.
19. Избыточная термометрия [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://kondratov.com.ua/index.php/fundamentalnaya-metrologiya/teoriya-izbytochnykh-izmerenij/nauchnye-napravlenija/izbytochnaja-termometrija>.
20. Избыточная пирометрия [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://kondratov.com.ua/index.php/fundamentalnaya-metrologiya/teoriya-izbytochnykh-izmerenij/nauchnye-napravlenija/izbytochnaja-pirometrija>.
21. Карташова А.Н. Технологические измерения и приборы в текстильной и легкой

промышленности : учебник для вузов / А.Н. Карташова, И.В. Дунин – Барковский. – М. : Легкая и пищевая промышленность, 1984. – 312 с.

22. Кондратов В.Т. Математические модели избыточных измерений I-го, II-го и III-го родов / В.Т. Кондратов // Научные труды X-й Юбилейной Междунар. науч.-техн. конф. «Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики и экономики». Книга «Приборостроение». – М. : МГУ ПИ, 2007. – С. 134–143.

23. Кондратов В.Т. Теория метрологической надежности: функция распределения Кондратова – Вейбулла / В.Т. Кондратов // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2008. – № 3. – С. 101–113.

24. Кондратов В.Т. Новая эра развития теории метрологической надежности – функция распределения Кондратова – Вейбулла, ее разновидности, свойства и функциональные возможности / В.Т. Кондратов // Законодательная и прикладная метрология. – 2009. – № 2. – С. 21–22.

25. Кондратов В.Т. Новая эра развития теории метрологической надежности – функция распределения Кондратова – Вейбулла, ее разновидности, свойства и функциональные возможности / В.Т. Кондратов // Законодательная и прикладная метрология. – 2009. – № 3. – С. 15–27.

References

1. Nedelko A.YU. "Preimushhestva i nedostatki beskontaktnogo izmereniya temperatury". URL: <http://lityo.com.ua/%D1%81%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D0%B8/1949-preimushchestva-i-nedostatki-beskontaktnogo-izmereniya-temperatury>.
2. Borodulina E. "Struktura, svojstva i tehnologiya stekla. Vyazkost". URL: <http://lenaborodulina.livejournal.com/13759.html>.
3. Tehnologiya proizvodstva i svojstva kvartsevykh opticheskikh volokon". URL: http://pstu.ru/files/file/FPMM/of/tehnologiya_proizvodstva_opticheskikh_volokon.pdf.
4. Kondratov V.T. Teoriya izbytochnykh izmerenij / V.T.Kondratov. – Vymiriuvalna ta obchyslyuvalna tekhnika v tehnologichnykh protsesakh. – 2005. – № 1. – s. 7–24.
5. Kondratov V.T., Zarnitsyna G.O. Problemy izmereniya temperatury ob'ektov ekosistemy/ V.T. Kondratov, G.O.Zarnitsyna. – Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Ekologicheskie problemy industrialnykh megalopolisov», Doneczk – Avdeevka, 01-04 iyunja 2004. – Doneczk. DonNTU. – s. 499-505.
6. Kondratov V.T., Zarnitsyna G.O. O sozdanii pirometrov otnosheniya s avtomaticheskoy korektsiej pogreshnostej / Pratsi Luganskogo viddilennia mizhnarodnoi akademii informatyzatsii. Lugansk. – 2005. – s. 123–127.
7. Kondratov V.T., Zarnitsyna A.A., Serdyuk N.M. Digital optical pyrometer with automatic correction of systematic errors/ Jomal of Automation and Information Sciences. – 2003. – Pp. 137–142 (Scopus search results: 15122747200/)
8. Deklaratsiynij patent 56614 A, Ukraina. MPK G01K7/00. Sposib vyznachennja dijsnogo znachennja temperatury/ V.T. Kondratov, G.O.Zarnitsyna, N.M.Serdiuk (Ukraina). – №2002076364; zajavl. 30.07.2002; opubl. 15.05.2003. Byul. № 5. – 14 c.
9. Deklaratsiynij patent 66299 A Ukraina. MPK G01J5/00, G01J5/10. Optiko-elektronnyj sposib nad-lyshkovykh vymiryuvan temperatury/ V.T.Kondratov, G.O.Zarnitsyna, O.P.Riabov (Ukraina). – №2003109797; zajavl. 31.10.2003, opubl. 15.04.2004. Byul. №4. –16s.
10. Deklaratsiynij patent 55947 A, Ukraina. MPK G01J5/08, G01K7/00. Optychnyj pirometr / V.T.Kondratov, G.O.Zarnitsyna (Ukraina). – №2002076365; zajavl. 30.07.2002; opubl. 15.05.2003, Byul. № 4. – 7 c.
11. Deklaratsiynij patent № 68026 A, Ukraina. MPK G01J1/10, G01K7/00. Sposib nadlyshkovykh vymiryuvan temperatury/ V.T.Kondratov, G.O.Zarnitsyna N.M.Serdiuk (Ukraina). – № 2003088013; zaiavl. 27.08.2003; opubl. 15.07.2004. Byul. – № 7. – 9 s.
12. Deklaratsiynij patent № 66084 A, Ukraina. MPK G01J5/20. Radiatsiynyj pirometr / V.T.Kondratov, G.O.Zarnitsyna, N.M.Serdiuk (Ukraina). – №2003076909; zajavl. 22.07.2003; opubl. 15.04.2004, Byul. № 4. – 6 s.
13. Pat. № 73426. Ukraina. MPK G01J5/08. Pirometr spektralnogo vidnoshennia / V.T.Kondratov, G.O.Zarnitsyna (Ukraina). – №20031212097; zaiavl. 23.12.2003; opubl. 15.07.2005, Byul. № 7. – 10 s.
14. Pat. № 77840. Ukraina. MPK G01J5/08, G01K7/00. Tsyfrovij pirometr vidnoshennia / V.T.Kondratov, G.O.Zarnitsyna (Ukraina). – №a200501402; zaiavl.15.02.2005; opubl.15.01.2007, Byul. № 1. – 11 s.
15. Pat. № 78064. Ukraina. MPK G01J5/00, G01J5/10. Sposib nadlyshkovykh vymiryuvan dijsnogo znachennja temperatury / V.T.Kondratov, G.O.Zarnitsyna (Ukraina). – № a200500301; zajavl. 13.01.2005; opubl. 15.02.2007. Byul. № 2. – 10 s.
16. Pat. № 78428 C2. Ukraina. MPK G01J5/08. Optychnyj pirometr / V.T.Kondratov, G.O.Zarnitsyna (Ukraina). – №a200507705; zajavl.02.08.2005; opubl.15.03.2007. Byul. № 3. – 6 s.
17. Pat.№ 79162. Ukraina. MPK G01J5/10, G01J5/00, G01K7/00. Optiko-elektronnyj sposib nadlyshkovykh vymiryuvan temperatury nagritogo ob'ekta za spektralnym vidnoshennjam / V.T.Kondratov, G.O.Zarnitsyna (Ukraina). – № a200504466; zajavl. 13.05.2005; opubl. 25.05.2007, Byul. № 7. – 8 s.
18. Pat.№ 79192. Ukraina. MPK G01J5/00, G01J5/10,G01K7/00. Optiko-elektronnyj sposib nadlyshkovykh vymiryuvan temperatury / V.T.Kondratov, G.O.Zarnitsyna (Ukraina). – № a200507703; zajavl. 02.08.2005; opubl. 25.05.2007, Byul. № 7. – 10 s.
19. Izbytochnaja termometrija. URL: <http://kondratov.com.ua/index.php/fundamentalnaya-metrologiya/teoriya-izbytochnykh-izmerenij/nauchnye-napravlenija/izbytochnaja-termometrija>.
20. Izbytochnaja pirometrija. URL: – <http://kondratov.com.ua/index.php/fundamentalnaya-metrologiya/teoriya-izbytochnykh-izmerenij/nauchnye-napravlenija/izbytochnaja-pirometrija>.
21. Kartashova A.N., Dunin-Barovskij I.V. Teknologicheskie izmereniya i pribory v tekstilnoj i lyogkoj promyshlennosti: Uchebnik dlya vuzov. – M.: Lyogkaya i pischevaja prom-st, 1984. – 312s.
22. Kondratov V.T. Matematicheskie modeli izbytochnykh izmerenij I-go, II-go i III-go rodov / V.T.Kondratov. – Nauchnye trudy X-j Yubilejnoj Mezhdunarodnoj nauchno-texnicheskoy konferencii «Fundamentalnye i prikladnye problemy priborostroeniya, imformatiki i ekonomiki». – M.: MGU PI, 2007. – s. 134-143.
23. Kondratov V.T. Teoriya metrologicheskoy nadozhnosti: funkczija raspredelenija Kondratova – Wejbullla/ V.T.Kondratov. – Herald of Khmelnytsky National University. Technical sciences. – 2008. – № 3. – s. 101-113.
24. Kondratov V.T. Novaya era razvitija teorii metrologicheskoy nadozhnosti: funktsija raspredelenija Kondratova – Wejbullla, eyo raznovidnosti, svojstva i funktsionalnye vozmozhnosti / V.T.Kondratov. Zakonodatelnaya i prikladnaya metrologiya. – 2009. – №2. – s. 21–22.
25. Kondratov V.T. Novaya era razvitija teorii metrologicheskoy nadozhnosti – funktsiya raspredelenija Kondratova – Wejbullla, eyo raznovidnosti, svojstva i funktsionalnye vozmozhnosti /V.T.Kondratov. Zakonodatelnaya i prikladnaya metrologiya. – 2009. – №3. – s. 15–27.

Рецензія/Peer review: 10.12.2014 р.

Надрукована/Printed: 19.1.2015 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Троцишин І.В.