# ИССЛЕДОВАНИЕ ИНФРАКРАСНОГО ТЕРМОХИМИЧЕСКОГО ДЕТЕКТОРА ГАЗОВ И ПАРОВ

Л.В. ИЛЯСОВ, д-р техн. наук

Тверской государственный технический университет, 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: lvi450714@mail.ru

© Илясов Л.В., 2020

Показана методика оценки решений при проектировании. Приводятся результаты экспериментальных исследований инфракрасного термохимического детектора газов и паров (ИКТХД), принцип действия которого основан на измерении интенсивности инфракрасного излучения, возникающего при каталитическом сгорании горючих газов и паров на поверхности пеллистора. Описывается схема ИКТХД, который содержит измерительную и сравнительную ячейки с размещенными в них пеллисторами и инфракрасными фотодиодами, работающими в фотогальваническом режиме и включенными встречно, что обеспечивает формирование разности их сигналов, которая после усиления регистрируются потенциометром. В результате экспериментальных исследований, выполненных с использованием импульсного метода ввода пробы анализируемых газов, были определены зависимости сигнала ИКТХД от наиболее важных режимных параметров, а именно зависимости сигнала: от концентрации анализируемого газа в потоке газа-носителя (воздуха), напряжения питания пеллисторов, расстояния между пеллистором и окном инфракрасного фотодиода и расхода газа-носителя. Установлена возможность использования ИКТХД в составе сигнализаторов и анализаторов микроконцентраций горючих газов и паров в воздухе. Экспериментально получена зависимость сигнала детектора от объемной концентрации водорода, метана и пропана в воздухе. Продемонстрирована возможность использования ИТХД в газовой хроматографии путем анализа калибровочной газовоздушной смеси. Определены основные метрологические характеристики ИКТХД и получены их следующие значения: порог чувствительности 4 · 10<sup>-5</sup> % об.: максимальная концентрация в пределах линейности статической характеристики – 0,4 % об.; линейный динамический диапазон – 1 · 10<sup>4</sup>; дрейф условного нулевого сигнала – 0,6 мВ/ч; постоянная времени – 0,3...1 с (зависит от расхода газа носителя). Объем камер измерительной и сравнительной ячеек составляет 0.3 мл.

*Ключевые слова:* автоматизация технологических процессов, детектор газов, термохимический детектор, инфракрасный детектор, эксперимент, установка, концентрация.

### DOI: 10.46573/2658-5030-2020-3-96-107

### введение

Совершенствование технологий переработки угля, нефти и природного газа требует расширения арсенала технических средств контроля качества сырья и продуктов этих технологий, что, в свою очередь, определяет необходимость расширения спектров физических эффектов, используемых для получения измерительной информации.

На кафедре «Автоматизация технологических процессов» Тверского государственного технического университета в течение двух десятков лет проводятся

исследования, целью которых является создание новых средств контроля физикохимических свойств и концентраций жидкостей и газов. Одно из разрабатываемых в настоящее время направлений – совершенствование термохимического контроля газовых сред. При этом огромное внимание уделяется эффектам, сопровождающим реакцию каталитического горения горючих газов. В результате уже созданы термохимический детектор [1], базирующийся на измерении температуры продуктов каталитического сгорания, термохимический детектор [2], названный мультипеллисторным (позволяет измерять плотность газов), а также установлена возможность измерения концентрации горючих газов при их каталитическом сгорании по значению ионного тока, возникающего между пеллистором и коллектором [3].

По итогам экспериментальных исследований, выполненных в 2018–2019 годах, была обнаружена возможность использования для получения измерительной информации эффекта возникновения инфракрасного излучения при каталитическом сгорании горючих газов и паров на поверхности пеллистора [4]. Поскольку в настоящее время отсутствует математическая модель этого эффекта, то было признано целесообразным проведение экспериментальных исследований детектора газов и паров, в которых применяется названный эффект.

## РЕЗУЛЬТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ научно-технической литературы, посвященной средствам контроля физико-химических свойств и концентраций газовых сред [5-8], позволил установить, что в настоящее время термохимические детекторы и газоанализаторы являются наиболее распространенными средствами контроля газовых сред, содержащих горючие газы и пары. Теория работы этих средств измерения достаточно полно разработана [9], а различные фирмы выпускают многочисленные средства термохимического контроля газов. Чаще всего встречаются термохимические детекторы с одним или несколькими пеллисторами, включенными в схему неравновесного моста [10, 11], и газоанализаторы с насыпным катализатором [12, 13]. Известны также термохимические сигнализаторы взрывоопасных концентраций горючих газов и паров, в которых используется измерение инфракрасного излучения, возникающего при горении газов [14], и термохимические газоанализаторы, в которых инфракрасное излучение пеллисторов применяется для балансировки неуравновешенных электрических мостов [15]. В этих устройствах для измерения инфракрасного излучения предназначены фоторезисторы. Этим фактом обусловлен параметрический сигнал таких средств термохимического контроля. В разработанном автором термохимическом детекторе газов и паров [4] для измерения инфракрасного излучения пеллисторов используются инфракрасные фотодиоды, работающие фотогальваническом (вентильном) В режиме. чем определяется генераторный сигнал детектора, что упрощает конструкцию детектора и обработку его сигнала. Этот детектор был назван инфракрасным термохимическим детектором (ИКТХД).

Для экспериментальных исследований ИКТХД была собрана лабораторная установка, обеспечивающая измерение сигнала названного детектора при различных значениях режимных параметров (рис. 1). Все исследования проводились с использованием пеллисторов типа ТТЧЭ-24ХЛ4 и инфракрасных фотодиодов типа ФД-265 А. ускорения экспериментальных исследований упрошения и применялся Лля импульсный метод ввода проб анализируемых газов в поток газа-носителя (воздуха) позволяющий минимизировать расход чистых анализируемых [16], газов. Экспериментальная установка содержала ИКТХД, стабилизированный источник напряжения типа Б5-47, электронный усилитель типа ИМТ-05, электронный потенциометр типа КСП-4, стабилизатор давления газа-носителя, осушитель газаносителя, переменные дроссели для установки значения расхода газа-носителя, устройство ввода проб анализируемых газов и колонка, которая представляла собой пластмассовую трубку с внутренним диаметром 3 мм и длиной 2 м.



Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования ИКТХД: 1 и 18 – инфракрасные фотодиоды; 2 и 17 – отверстия в крышках;
3 и 15 – крышки ячеек; 4 и 16 – измерительный и сравнительный пеллисторы; 5 и 14 – обоймы пеллисторов; 6 – основание ячеек; 7 – колонка;
8 – устройство ввода проб газа; 9 – стабилизатор давления газа-носителя; 10 – осушитель газа-носителя; 11 и 12 – переменные дроссели; 13 – стабилизированный источник электропитания;
19 – электронный усилитель; 20 – электронный потенциометр; 21 – экран; 22 и 23 – сравнительная и измерительная ячейки детектора соответствено; *R*<sub>1</sub> и *R*<sub>2</sub> – переменные резисторы сопротивлением 2,5 мОм

Инфракрасный термохимический детектор был собран по дифференциальной схеме и состоял из измерительной и сравнительной ячеек, в каждой из которых размещались измерительный и сравнительный пеллисторы соответственно. В процессе исследований с помощью переменных дросселей устанавливались постоянные и равные друг другу расходы газа-носителя в измерительную и сравнительную ячейки. При этом в сравнительную ячейку газ-носитель поступал непосредственно, а в измерительную – через устройство ввода пробы и колонку. Пеллисторы включались последовательно и подключались к стабилизированному источнику напряжения. Инфракрасные фотодиоды размещались в крышках ячеек и имели оптический контакт с пеллисторами через отверстия в этих крышках. Фотодиоды включались встречно, а в их внешние цепи включались переменные резисторы сопротивлением 2,5 мОм.

После включения установки в работу измерения начинались через 20...30 мин. В соответствии с используемым импульсным методом ввода проб в поток газа-носителя, поступающего в измерительную ячейку, вводилась постоянная по объему проба анализируемого газа, которая подхватывалась потоком газа-носителя и через колонку транспортировалась в измерительную ячейку ИКТХД. При сгорании горючего анализируемого газа на измерительном пеллисторе возрастала его температура, что вызвало увеличение поток инфракрасного излучения и, как следствие, сигнала измерительного фотодиода. При этом температура сравнительного пеллистора не изменяется, поэтому поток инфракрасного излучения от него оставался постоянным. Поскольку измерительный и сравнительный фотодиоды включались встречно, то ток, протекающий через входную цепь электронного усилителя, увеличивался. Сигнал усилителя и змерялся и регистрировался потенциометром. Этот сигнал имел форму импульса, а в качестве информативных параметров сигнала применялись амплитуда h, мм, и площадь S, мм<sup>2</sup>, на диаграммной ленте потенциометра.

Отправным моментом в экспериментальных исследованиях ИКТХД явился тот факт, что используемые для экспериментов пеллисторы имеют ограничения по значению рабочего тока. Этот ток не должен превосходить 180 мА, что определяет значение напряжения, подаваемого к двум последовательно включенным пеллисторам (не должно превышать 3,6 В). Поэтому статическая характеристика ИКТХД определялась при напряжении, близком к напряжению питания и равном 3,5 В. Определение статической характеристики ИКТХД осуществлялось при следующих значениях режимных параметров: расход газа-носителя (воздуха) в каждую ячейку детектора – 2 л/ч; расстояние между пеллистором и окном фотодиода – 5 мм; объем проб анализируемых газов – 10...50 мкл; температура детектора – 20 °С (при этой температуре были выполнены все описанные ниже исследования); скорость диаграммной ленты потенциометра – 1800 мм/ ч. В опытах использовались следующие газы: водород, метан и пропан. Выбор этих газов обусловлен тем, что водород – наиболее легко каталитически окисляемый газ, метан обладает наибольшей стойкостью к каталитическому окислению, а пропан – типичной стойкостью к этому окислению.

Определение статической характеристики ИКТХД осуществлялось следующим образом. В поток газа-носителя, поступающего в измерительную ячейку детектора, последовательно вводились пробы калиброванным шприцом анализируемых газов объемом 10, 20, 30, 40, 50 мкл, причем пробы объемом 10...40 мкл разбавлялись воздухом до объема 50 мкл. Введенная проба транспортировалась по колонке, а затем поступала в измерительную ячейку детектора. Горючее вещество пробы частично сгорало на пеллисторе. При этом увеличивался поток инфракрасного излучения от пеллистора, что вызывало сигнал инфракрасного фотодиода, а это приводило к изменению сигнала детектора.

На рис. 2а и б показаны зависимости амплитуды h и площади S импульсного сигнала детектора от объемной концентрации горючих газов  $\alpha$  в потоке газа носителя. Объемная концентрация рассчитывалась по известному расходу газа-носителя и объему пробы газа по формуле [16]

$$\alpha = 2 \cdot \frac{V_{\Pi}}{Q_{\Gamma-H} \cdot \tau},$$

где  $\alpha$  – объемная концентрация компонента, вызывающая максимальную амплитуду сигнала;  $V_{\Pi}$  – объем пробы анализируемого газа;  $\tau$  – длительность импульсного сигнала;  $Q_{\Gamma-H}$  – объемный расход газа-носителя.

Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». № 3 (7), 2020 На графиках, приведенных на рис. 2 (как и на всех последующих), значение для каждой точки устанавливалось по результатам трех измерений и последующего усреднения.

Как видно из рис. 2, полученная зависимость является нелинейной. В тоже время на приведенных кривых имеется участок, расположенный между объемными концентрациями от 0 до 0,4 % об., где наблюдается пропорциональная зависимость сигнала детектора (как по амплитуде, так и по площади) от объемной концентрации компонентов в газе-носителе.



Рис. 2. Зависимости амплитуды (а) и площади (б) сигнала ИКТХД от концентрации горючих газов в потоке газа-носителя

Поскольку описанные выше исследования проводились при максимальном значении напряжении питания пеллисторов, равном 3,5 В, было признано целесообразным изучить зависимости сигнала детектора от напряжения питания при различных его значениях, что было сделано при следующих условиях: объем пробы анализируемого газа – 20 мкл (соответствует объемной концентрации α, при которой сохраняется линейность статической характеристики детектора); диапазон измерений выходного сигнала детектора – 0...50 мВ.

На рис. 3 показана зависимость амплитуды сигнала детектора, вызванного анализируемыми газами от значения напряжения питания пеллисторов. Из рис. 3 видно, что эта зависимость является нелинейной, а напряжение питания существенно влияет на сигнал ИКТХД, что обусловило необходимость его стабилизации. Видно также, что водород способен вызвать сигнал детектора даже при очень малых значениях напряжения питания, при которых как метан, так и пропан вызывает сигналы, близкие к нулевому значению.

Ввиду того, что сигнал ИКТХД формируется за счет измерения инфракрасного излучения пеллистора, представлялось естественным определение зависимости этого сигнала от расстояния между пеллистором и окном инфракрасного фотодиода. Эти исследования были выполнены при следующих условиях: расход газа-носителя (в каждую ячейку) – 2 л/ч; напряжение питания пеллисторов – 3,5 В; объем пробы анализируемого газа (пропан) – 20 мкл; диапазон измерений выходного сигнала – 0...50 мВ. Из-за конструктивных возможностей детектора расстояние между пеллистором и окном инфракрасного диода не могло быть меньше чем 3 мм.

Полученная зависимость амплитуды сигнала ИКТХД от расстояния б приведена на рис. 4. Как видно из этого рисунка, сигнал детектора существенно уменьшается с увеличением этого расстояния.



Рис. 3. Зависимости амплитуды сигнала ИКТХД от напряжения питания пеллисторов  $U_{\text{пит}}$  для водорода метана и пропана

В силу того, что ИКТХД можно будет использовать в составе газоанализаторов различных горючих газов и сигнализаторов, работа которых может осуществляться при постоянных расходах анализируемых газовоздушных смесей, а также в составе хроматографов, в которых расход газа-носителя зависит от условий разделения многокомпонентных газовых смесей, необходимо определение зависимости сигнала ИКТХД от расхода газа-носителя. Исследование этой зависимости осуществлялось при следующих условиях: объемы проб анализируемых газов – 20 мкл; напряжение питания пеллисторов – 3,5 В; диапазон измерений выходного сигнала детектора – 0...50 мВ; значение расхода газа-носителя – 1, 2 и 3 л/ч; скорость диаграммы ленты потенциометра – 1 800 мм/ч.



Рис. 4. Зависимость амплитуды сигнала ИКТХД от расстояния δ между пеллистором и окном инфракрасного фотодиода

Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». № 3 (7), 2020

В опытах исследовались зависимости амплитуды h и площади S сигнала детектора от расхода газа-носителя (воздух). На рис. 5 приведены эти зависимости. Как видно из рис. 5, с увеличением расхода газа-носителя амплитуда h и площадь S сигнала для метана и пропана увеличиваются, а для водорода – несколько уменьшаются, что, по-видимому, связано с тем, что коэффициент диффузии водорода в воздух существенно превышает коэффициенты диффузии метана и пропана в этот газ.

Для установления возможности использования ИТХД в составе газоанализаторов микроконцентраций горючих газов в воздухе были выполнены опыты, в которых в импульсном режиме работы детектора в него вводились пробы водорода, метана и пропана с различными концентрациями этих компонентов в воздухе. Объемы проб составляли 20 мкл, расход газа-носителя принимался равным 2 л/ч, а напряжение питания было равно 3,5 В; диапазон измерений выходного сигнала составлял 0...50 мВ. В этих опытах в качестве информационного сигнала использовалась амплитуда. Результаты этих измерений представлены на рис. 6. Из этого рисунка следует, что для всех газов найденные зависимости являются пропорциональными. При этом максимальная концентрация C анализируемых газов в газе-носителе не превышает значения 0,4 % об., что определяется линейным участком диапазона статической характеристики ИКТХД, приведенной выше.

Известно, что наиболее жесткие требования к детекторам газов предъявляются при использовании их в газовой хроматографии. Были определены, в соответствии с действующими нормативными документами на газовые хроматографы, основные метрологические характеристики ИКТХД. При этом были получены следующие значения: порог чувствительности –  $4 \cdot 10^{-5}$  % об.; максимальная концентрация в пределах линейности статической характеристики – 0,4 % об.; линейный динамический диапазон –  $1 \cdot 10^4$ ; дрейф условного нулевого сигнала – 0,6 мВ/ч; постоянная времени – 0,3...1 с (зависит от расхода газа-носителя). Объем камер измерительной и сравнительной ячеек детектора – 0,3 мл.



Рис. 5. Зависимости амплитуды (а) и площади (б) сигнала ИКТХД от расхода газа-носителя

Для проверки возможности использования ИКТХД в составе газоанализаторов и газосигнализаторов микроконцентраций паров жидких горючих веществ в воздухе в детектор в импульсном режиме вводились паровоздушные смеси следующих жидких веществ: гексана, гептана, октана, нонана, бензола, толуола, ксилола, ацетона, этанола,

Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». № 3 (7), 2020 циклогексана, бензина и др. В этих опытах объем пробы паров в воздухе составлял 0,21 мл. Пробы отбирались из паровой фазы сосудов с названными веществами. При этом обеспечивалась регистрация их сигналов ИКТХД для всех указанных веществ. Последнее определяется тем, что концентрация паров этих веществ на несколько порядков больше, чем чувствительность данного детектора.



Рис. 6. Зависимости амплитуды сигнала ИКТХД от концентрации горючих газов в анализируемых газовоздушных смесях

Для демонстрации возможности использования ИТХД в газовой хроматографии этот детектор размещался в газовом хроматографе и в него посылалась смесь газов, разделенных на хроматографической колонке длиной 400 мм с внутренним диаметром 3 мм, заполненной силикагелем. Анализ осуществлялся при температуре 20 °С, расходе газа-носителя 1 л/ч, диапазоне измерений выходного сигнала детектора 0...50 мВ, объеме пробы 1 мл. На рис. 7 показана хроматограмма калибровочной газовой смеси, состоящей из метана, этана, пропана и бутана с концентрациями, равными 2,78, 0,14, 0,16, 0,09 % об. соответственно.



Рис. 7. Хроматограмма газовоздушной калибровочной смеси

Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». № 3 (7), 2020

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанный в статье детектор является новым техническим средством и может найти широкое применение в аналитической технике, так как характеризуется простотой, высокой чувствительностью и малой инерционностью. Детектор может быть реализован на основе выпускаемых промышленностью пеллисторов и инфракрасных фотодиодов. Приводимые в статье результаты экспериментальных исследований, по-видимому, следует рассматривать как предварительные. Для выявления всех возможностей ИКТХД необходимо разработать математическую модель его сигнала; исследовать зависимости сигнала детектора от температуры; разработать конструкции детектора, обеспечивающие возможность применения батареи инфракрасных фотодиодов для измерения инфракрасного излучения пеллистора.

## ЛИТЕРАТУРА

1 Патент РФ 184021. *Термохимический детектор газов* / Давыденков А.К., Илясов Л.В. Заявл. 31.08.2018. Опубл. 11.10.2018, Бюл. № 29.

2. Патент РФ 127470 *Термохимический газоанализатор* / Илясов Л.В., Аль-Дахми Абдулгани М.С. Заявл. 26.11.2012. Опубл. 27.04.2013, Бюл. № 12.

3. Патент РФ 102261 на полезную модель. *Термохимический детектор* / Илясов Л.В., Аль-Дахми Абдулгани М.С., Денисова Д.А. Заявл. 20.10.2010. Опубл. 20.02.2011, Бюл. № 5.

4. Патент РФ 196305 на полезную модель. *Термохимический газоанализатор* / Илясов Л.В., Ефремов А.А. Заявл. 19.12.2019. Опубл. 25.02.2020, Бюл. № 6.

5. Тхоржевский В.П. Автоматический анализ газов и жидкостей на химических предприятиях. М.: Химия, 1976. 272 с.

6. Кулаков М.В. Технологические измерения и приборы для химических производств. М.: Машиностроение, 1983. 424 с.

7. Автоматизация и средства контроля производственных процессов в нефтехимической и химической промышленности: справочник. Т. 4. М.: Недра, 1973. 624 с.

8. Фарзане Н.Г., Илясов Л.В., Азим-заде А.Ю. Автоматические детекторы газов и жидкостей. М.: Энергоатомиздат, 1983. 96 с.

9. Тарасевич В.Н. Металлические терморезисторные преобразователи горючих газов. Киев: Наукова думка, 1988. 284 с.

10. Бражников В.В. Детекторы для хроматографии. М.: Машиностроение. 1992. 320 с.

11. Аль-Дахми Абдулгани. М.С. Разработка термохимического детектора теплоты сгорания газов: дис. ... канд. техн. наук. Тамбов, 2015. 153 с.

12. Тхоржевский В.П. Автоматический анализ химического состава газов. М.: Химия, 1969. 323 с.

13. Авторское свидетельство СССР 430226 Сигнализатор взрывоопасных концентраций горючих газов в воздухе Бурцев Е.Ф. Заявл. 06.07.1967. Опубл. 30.05.1974, Бюл. № 20.

14. Авторское свидетельство СССР 1257493 *Термохимический газоанализатор* Алексейченков В.Л. Заявл. 13.04.1984. Опубл. 15.09.1986, Бюл. № 34.

15. Авторское свидетельство СССР 1453294 Способ балансировки мостовой схемы термохимического газоанализатора // Танклевский Л.Т., Алексейченков В.Л. Заявл. 17.02.1987. Опубл. 23.01.1989, Бюл. № 4.

16. Фарзане Н.Г., Илясов Л.В. Импульсный ввод анализируемого газа в автоматических газоанализаторах // Измерительная техника. 1971. № 4. С. 34–38.

Для цитирования: Илясов Л.В. Исследование инфракрасного термохимического детектора газов и паров // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2020. № 3 (7). С. 96–106.

# INFRARED THERMOCHEMICAL GAS AND VAPOR DETECTOR STUDY

# L.V. ILIYASOV, Dr. Sc.

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver, Russian Federation, e-mail: lvi450714@mail.ru

The results of experimental study of the thermochemical gas and vapor detector (ITCGVD) are given. Functional principle of this detector is based on the measurement of infrared radiation intensity formed during catalytic combustion of flammable gases and vapors on the pellistor surface. The ITCGVD scheme is described. It contains the measuring and the comparing cells equipped with pellistors and infrared diodes working in photogalvanic mode and a counter connected ensuring their signal difference formation, which is registered after amplification by a potentiometer. The dependences of ITCGVD signal on most important parameters were determined as a result of experimental study with use of impulse method of analyzing gases input. These parameters are as follows: analyzing gas concentration in carrier gas (air) flow, a pellistor supply voltage, a distance of a pellistor from infrared photodiode window, carrier gas flow rate. The possibility of ITCGVD use in alerters and analyzers of flammable gasses and vapors micro concentration in air was determined. Experimental correlation of detector signal to hydrogen, methane and propane volume concentration in air was developed. Possibility of ITCGVD application in gas chromatography by using the analysis of calibration gas-air mixture is shown. Basic metrological characteristics of ITCGVD were determined. They are as follows: sensitivity threshold 4.10<sup>-5</sup> volume percent, maximum concentration within a linear statistical characteristic -0.4 volume percent; linear dynamic range 1  $10^4$ ; the drift of apparent zero signal - 0.6 mV/h; time constant 0.3...1 s (depends on carrier gas flow). Measuring and comparing cell volume was 0.3 ml.

*Keywords:* automation of technological processes, gas detector, thermochemical detector, infrared detector, experiment, installation, concentration.

#### REFERENCES

1. Patent RF 184021 *Termohimicheskij detector gazov* [Thermochemical gas detector] / Davidenkov A.K, Ilyasov L.V. Declared 31.08.2018. Published 11.10.2018, Bulletin No. 29.

2. Patent RF 127470 *Termohemicheskij gazoanalizator* [Thermochemical gas analyzer]. Ilyasov L.V., Al-Dahmi Abdulgani M.S Declared 26.11.2012. Published 27.04.2013, Bulletin No. 12.

3. Patent RF 102261. *Termohemicheskij detektor* [Thermo-chemical detector] Ilyasov L.V., Al-Dahmi Abdulgani M.S, Denisova D.A. Declared 20.10.2010. Published 20.02.2011. Bulletin No. 5.

4. Patent RF 196305. *Termohemicheskij gazoanalizator* [Thermochemical gas analyzer]. Ilyasov L.V., Efremov A.A., Declared 19.12.2019. Published 25.02.2020, Bulletin No. 6.

5. Tkhorczhevskij V.P. Avtomaticheskij analiz gazov I zhidkostej na khimicheskikh predpriyatiyakh [Automated analysis of gases and liquids in chemical plants]. Moscow: Chimiya, 1976. 272 p.

Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». № 3 (7), 2020 6. Kylakov M.V. Avtomaticheskie izmereniya i pribori dlya khimicheskikh proizvodstv [Technological measurements and devices for chemical production]. Moscow: Mashinostroenie, 1983. 424 p.

7. Avtomatizaciya I sredstva kontrolya proizvodstvennikh processov v neftekhimicheskoi i khimicheskoj promishlennosti [Automation and means of control of production processes in the petrochemical and chemical industries]: directory. V. 4. Moscow: Nedra, 1973. 624 p.

8. Farzane N.G., Ilyasov L.V., Azim-zade A.Yu. Automatic detectors of gases and liquids [Avtomaticheskie detektori dlya gazov i zhidkostej]. Moscow: Energoatomizdat, 1983. 96 p.

9. Tarasevich V.N. Metallicheskie termorezistornie preobrazovateli goruchih gazov [Metal thermosistor converters of combustible gases]. Kiev: Naukova dumka, 1988. 284 p.

10. Brazhnikov V.V. Detektori dlya hromatografii [Detectors for chromatography]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1992. 320 p.

11. Al-Dahmi Abdulgani M.S Development of a thermochemical gas heat detector: cand. diss. (Engineering). Tambov, 2015. 153 p. (In Russian).

12. Tchorzhevskij V.P. Avtomaticheskij analiz himicheskogo sostava gazov [Automatic analysis of the chemical composition of gases]. Moscow: Khimiya, 1969. 323 p.

13. Avtorskoe svidetelstvo SSSR 430226 *Signalizator vzrivoopasnih koncentracij goruchih gazov v vozduhe* [Indicator of explosive concentrations of flammable gases in the air] Burcev E.V. Declared 06.07.1967. Published 30.05.1974, Bulletin No. 20.

14. Avtorskoe svidetelstvo SSSR 1257493 *Termohemicheskij gazoanalizator* [Thermochemical gas analyzer] Alejsejchenkov V.L. Declared 13.04.1984. Published 15.09.1986, Bulletin No. 34.

15. Avtorskoe svidetelstvo SSSR 1453294 *Sposob balansirovki mostovoj shemi termohimicheskogo gazoanalizatora* [Method for balancing the bridge circuit of a thermochemical gas analyzer]. Tanklevskij L.T., Alejsejchenkov V.L. Declared 17.02.1987. Published 23.01.1989, Bulletin No. 4.

16. Farzane N.G., Ilyasov L.V. Pulse input of the analyzed gas in automatic gas analyzers. *Izmeritilnaya tehnika*. 1971. № 4, pp. 34–38. (In Russian).

Поступила в редакцию/received: 30.04.2020; после рецензирования/revised: 06.07.2020; принята/accepted 03.08.2020