

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ, МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

УДК 535.3:53.087.92

БЕЗДИСПЕРСИОННЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ГАЗА С ВРЕМЕННЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ ОПОРНОГО И ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО СИГНАЛОВ

© 2023 г. А. И. Конюхов^{а,*}

^аСаратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
Россия, 410012, Саратов, ул. Астраханская, 83

*e-mail: KonukhovAI@sgu.ru

Поступила в редакцию 23.06.2022 г.

После доработки 18.07.2022 г.

Принята к публикации 24.09.2022 г.

Описана конструкция бездисперсионного оптического инфракрасного датчика газа с двумя источниками инфракрасного излучения и одним приемником. Демонстрируется работа устройства с временным разделением измерительного и опорного сигналов. Для контроля старения источников излучения используется фототранзистор. Датчик предназначен для определения концентрации метана в воздушно-газовой смеси с объемной долей метана не более 2.2%. Предложенная конструкция позволяет определять концентрацию с точностью $\pm 0.1\%$ объемной доли метана в диапазоне температур от -20 до $+50^\circ\text{C}$ при скорости изменения температуры не более $2^\circ\text{C}/\text{мин}$.

DOI: 10.31857/S0032816223010184, EDN: PVRJUC

ВВЕДЕНИЕ

Бездисперсионные оптические датчики широко используются для измерения концентрации газов [1, 2]. При взаимодействии инфракрасного (ИК) излучения с молекулами газа инфракрасный свет поглощается на определенной длине волны. По уменьшению интенсивности ИК-излучения можно определить концентрацию газа. Наиболее распространенными являются оптические датчики углекислого газа CO_2 , угарного газа CO и метана CH_4 .

Оптические датчики обладают высокой селективностью по отношению к конкретному газу. Другая особенность этих датчиков заключается в том, что воздействие газа высокой концентрации не приводит к необратимому дрейфу их чувствительности, тогда как электрохимические и термокаталитические сенсоры подвержены старению [3]. Выходной сигнал ИК-сенсора не зависит от скорости потока контролируемого воздуха, но на результат измерения могут влиять давление и температура. У таких сенсоров большой срок службы при условии отсутствия коррозии, загрязнения или механического повреждения. Основными недостатками инфракрасных сенсоров являются сложность корректировки нуля при резком изменении температуры и высокая стоимость.

Бездисперсионный датчик газа состоит из источника инфракрасного излучения, детектора, оптического фильтра, газовой ячейки и электроники для обработки сигнала. Существует не-

сколько оптических схем для таких датчиков [4]. Среди них выделим наиболее распространенную — схему с двумя длинами волн с одним источником излучения [5–7]. Такой датчик имеет два детектора, у каждого из которых есть оптический фильтр. Оптические фильтры различаются полосой пропускания. Измерительный канал формируется путем детектирования интенсивности света, прошедшего через фильтр с полосой пропускания, совпадающей с полосой поглощения целевого газа. Опорный канал формируется путем измерения интенсивности в полосе частот за пределами линии поглощения газа. Разница между интенсивностью прошедшего света в этих двух полосах частот преобразуется в концентрацию газа.

Датчик с двумя длинами волн обеспечивает автоматическую компенсацию эффекта старения источника инфракрасного излучения, поскольку при отсутствии газа отношение интенсивностей в измерительном и опорном каналах в первом приближении остается неизменным. Однако при изменении температуры полоса пропускания интерференционных фильтров смещается [8]. Это приводит к нелинейной зависимости опорного и измерительного сигналов от температуры и затруднению температурной коррекции показаний. Кроме того, каждому чувствительному сенсору требуется отдельный усилитель [9], что приводит к различию передаточных характеристик в измерительном и опорном каналах.

Для устранения эффекта, связанного с различием характеристик опорного и измерительного светофильтров, было предложено использовать один источник ИК-излучения и два идентичных приемника. При этом измерительный и опорный каналы формируются путем применения двух кювет разной длины [7, 10]. В другом варианте схемы с одним источником ИК-излучения и двумя идентичными приемниками опорный сигнал формируется приемником, перед которым установлена дополнительная кювета, наполненная целевым газом [11]. Однако такой подход [7, 10, 11] не устраняет проблемы, связанные с различным температурным дрейфом усилителей опорного и измерительного каналов.

В работе [12] для минимизации температурного дрейфа и увеличения чувствительности предложено использовать модуляцию давления. В такой схеме можно использовать один источник ИК-излучения и один приемник. Однако механическое воздействие за счет волны давления может привести к повышенным шумам и к снижению точности измерений. В работе [13] для определения концентрации используется нелинейность отклика сенсоров в опорном и измерительном каналах. Такой метод применим только для определения высоких концентраций.

Альтернативой схеме с одним источником ИК-излучения и двумя приемниками является схема с двумя источниками и одним приемником [14]. Для поддержания постоянного соотношения между опорным и измерительным сигналами газоанализатор содержит устройство балансировки амплитуды и фазы сигналов, модулирующих поток ИК-излучения. Недостатком датчика [14] является отсутствие контроля неравномерного старения излучателей. Дисбаланс, вызванный уменьшением светимости первого излучателя относительно второго, может интерпретироваться как появление газа. Кроме того, изменение сигнала при резком изменении температуры имеет нелинейный характер. При наличии нелинейности корректировка тока или напряжения, питающего ИК-излучатели, может привести к неправильным показаниям датчика.

В работе [15] предложена другая конструкция датчика — с двумя источниками ИК-излучения и одним ИК-детектором. Первый источник работает постоянно и используется для формирования измерительного канала, а второй — только для периодической перекалибровки датчика. При таком подходе достаточно сложно скомпенсировать дрейф показаний из-за быстрого изменения внешней температуры.

В данной работе рассмотрена конструкция, состоящая из двух источников ИК-излучения и одного сенсора. Источники ИК-излучения питаются стабилизированным током. Сенсор имеет

оптический фильтр, полоса пропускания которого соответствует полосе поглощения метана. Использование одного сенсора с одним усилителем минимизирует различие передаточных характеристик измерительного и опорного каналов. В первом разделе данной статьи подробно рассмотрена конструкция датчика. Во втором разделе представлены результаты измерений концентрации метана и результаты тестирования на температурную устойчивость показаний датчика. В выводах обсуждаются преимущества и недостатки предложенной конструкции датчика.

КОНСТРУКЦИЯ ДАТЧИКА

Датчик представляет собой измерительную кювету в форме цилиндрической трубки с отражающими внутренними стенками (рис. 1). С одной торцевой стороны измерительной кюветы установлена миниатюрная лампа накаливания L_1 с параболическим отражателем. С другой торцевой стороны измерительной кюветы установлен приемник Т ИК-излучения с узкополосным интерференционным светофильтром. Рядом с приемником ИК-излучения расположена дополнительная лампа накаливания L_2 , свет от которой падает под углом к поверхности приемника Т. Длина кюветы 70 мм. Расстояние от центра лампы L_2 до приемника Т равно 3 мм.

В боковой стенке измерительной кюветы размещен фототранзистор с максимумом чувствительности на длине волны 940 нм. Данная длина волны находится за пределом линии поглощения исследуемого газа. Сигнал фототранзистора используется для оценки интегральной светимости ламп и корректировки изменения показаний, вызванного их старением. Цилиндрическая трубка и сферический отражатель изготовлены из нержавеющей стали. В качестве приемника ИК-излучения использовалась одноканальная термopара HTS-A21 с оптическим фильтром F3.375-190 (Heimann Sensor GmbH). Центральная длина волны спектра пропускания фильтра — 3.375 мкм, полуширина спектра — 190 нм. HTS-A21 имеет встроенный терморезистор, который используется для измерения внутренней температуры приемника инфракрасного излучения.

Сигнал с фототранзистора, термopары HTS-A21 и встроенного в нее терморезистора усиливался, оцифровывался и обрабатывался микропроцессором. Согласно стандарту [16], индикация концентрации горючего газа может осуществляться в процентах объемной доли (об.%) или млн^{-1} (ppm). Микропроцессор обеспечивал передачу на внешние цифровые устройства значения концентрации, рассчитанной в процентах. Также на аналоговых выходах формировались следующие сигналы: 1) достижение concentra-

ции метана от 0.44 об.% до 0.88 об.%; 2) достижение концентрации метана, равной или превышающей 0.88 об.%; 3) аварийное состояние датчика; 4) превышение скоростью изменения температуры величины $1^\circ\text{C}/\text{мин}$.

В качестве источников ИК-излучения использовались миниатюрные лампы накаливания L_1 , L_2 (см. рис. 1). Для бездисперсионного газоанализа существуют специализированные лампы, например, HSL 5-60 (Heimann Sensor GmbH) с заявленным сроком службы 100000 ч. Однако стоимость такой лампы сопоставима со стоимостью термпарного приемника. Поэтому использовались обычные лампы формата T1-1/4 (H39) с номинальным напряжением питания 5 В и током 60 мА. Перед установкой в датчик лампы работали при номинальном напряжении в течение 48 ч, после чего подбирались пары с одинаковым током потребления.

Лампы эксплуатировались при пониженном токе питания 45 мА, что обеспечивало увеличение их срока службы. В холодном состоянии нить лампы накаливания имеет небольшое сопротивление, порядка 5 Ом. Поэтому сразу после включения через лампу протекает большой ток, что негативно сказывается на сроке службы лампы и на уровне электрических помех.

Для ограничения силы тока использовался стабилизатор I (см. рис. 1). Последовательно с лампой накаливания включен полевой транзистор (depletion mode MOSFET) [17]. Сила тока определяется резистором, включенным между стоком и затвором транзистора. На рис. 2 показаны осциллограммы силы тока при различных значениях сопротивления резистора r . Согласно осциллограммам, при $r = 10$ Ом включение лампы вызывает резкое возрастание тока потребления, при увеличении сопротивления до 24 Ом выброс тока исчезает, однако сила тока не стабилизирована. При $r = 33$ Ом сила тока стабилизируется на уровне 45 мА.

Использование стабилизации тока приводит к снижению скорости разогрева нити накаливания. Поэтому приходится использовать длинные управляющие импульсы включения/выключения лампы. Кроме того, при пониженной интенсивности ИК-излучения возрастает влияние электронных шумов. Однако эти недостатки компенсируются снижением себестоимости изделия и повышением температурной стабильности показаний датчика. Следует отметить, что стабилизатор является общим для ламп L_1 и L_2 (см. рис. 1). Поэтому наличие стабилизатора тока не вносит дополнительного дисбаланса между измерительным и опорным сигналами.

Лампы L_1 и L_2 подключаются к источнику тока попеременно. На рис. 3а показано временное распределение управляющих сигналов, подаваемых с микропроцессора. Длительность импульса,

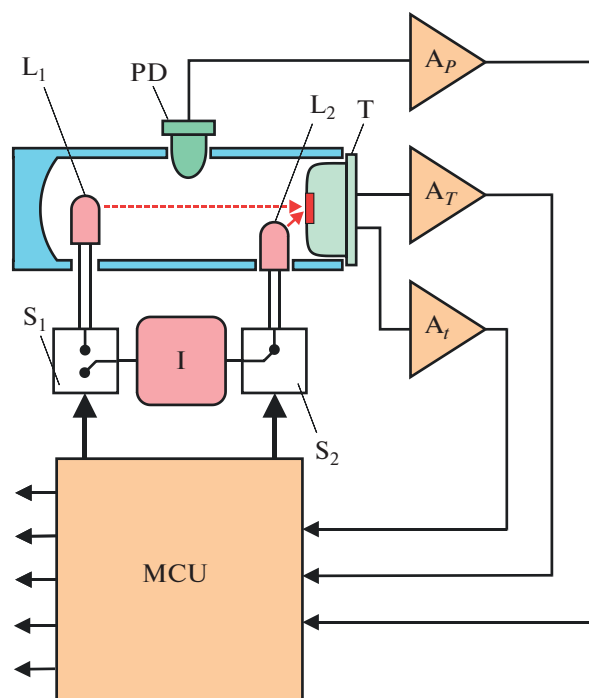


Рис. 1. Схема датчика. L_1 — лампа накаливания измерительного канала; L_2 — лампа накаливания опорного канала; Т — приемник инфракрасного излучения с интерференционным светофильтром и внутренним терморезистором; PD — ИК-фототранзистор; A_p — усилитель для фототранзистора; A_T — усилитель для терморезистора; MCU — микропроцессор; I — источник тока; S_1 , S_2 — ключи, управляемые микропроцессором.

подаваемого на лампу, равна $\Delta t = 0.34$ с. После импульса следует промежуток времени Δt , когда обе лампы выключены. Затем включается вторая лампа на время Δt . Далее процесс включения/выключения повторяется.

Сигналы измерительного и опорного каналов разделены во времени (рис. 3б, 3в). Для того чтобы определить амплитуду сигнала, микропроцессором выполнялось вычисление амплитуды основной гармоники по алгоритму Герцеля [18]. Сигнал в измерительном канале формируется парой “лампа L_1 —приемник Т”. Сигнал в опорном канале формируется парой “лампа L_2 —приемник Т”. Сигналы разделены во времени, поэтому амплитуду измерительного сигнала A и амплитуду опорного сигнала R можно вычислить по отдельности.

При прохождении через целевой газ ИК-излучение поглощается. Связь между интенсивностью света I , прошедшего через измеряемый газ, и концентрацией газа C выражается законом Ламберта—Бера [19]:

$$I = I_0 \exp(-KCz), \quad (1)$$

где I_0 — начальная интенсивность света, испускаемого источником; K — коэффициент поглощения

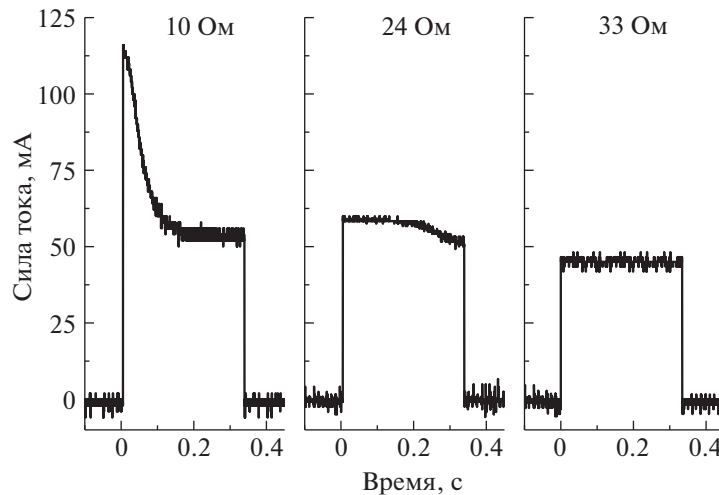


Рис. 2. Осциллограммы силы тока, проходящего через лампу, при различных значениях сопротивления резистора, включенного между стоком и затвором токостабилизирующего транзистора.

на заданной длине волны; z — длина светового пути. При небольших величинах KCz можно считать, что

$$C = (Kz)^{-1}(1 - I/I_0). \quad (2)$$

Определим интенсивность ИК-излучения, используя амплитуду измерительного и опорного сигналов:

$$I = A/R, \quad I_0 = A_0/R_0, \quad (3)$$

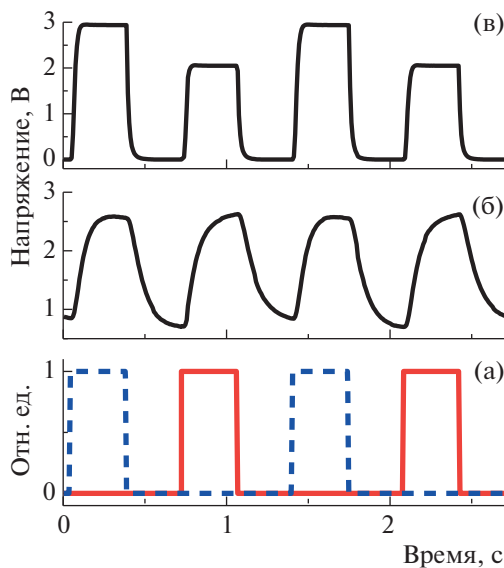


Рис. 3. Временные распределения: а — управляющих сигналов, подаваемых на ключ S_1 лампы L_1 (сплошная линия) и на ключ S_2 лампы L_2 (штриховая линия), “1” соответствует включенному состоянию лампы, “0” — выключенному; б — сигналов термопары после усилителя A_7 ; в — сигнала фототранзистора после усилителя A_9 .

где A_0 , R_0 — амплитуды сигналов, определяемые по калибровке датчика при нулевой концентрации газа ($C = 0$). При подстановке выражений (3) в формулу (2) получим, что концентрация определяется величиной

$$ABS = 1 - (A/R)(A_0/R_0)^{-1}. \quad (4)$$

Расстояние от дополнительного источника ИК-излучения L_2 до приемника ИК-излучения Т много меньше z . Кроме того, излучение падает на интерференционный светофильтр термопары под углом, в результате чего полоса пропускания интерференционного светофильтра смещается в сторону от полосы поглощения газа. Поэтому амплитуда опорного сигнала R практически не зависит от наличия исследуемого газа и определяется температурой окружающей среды. Поскольку для измерительного и опорного сигналов используются один и тот же приемник и один и тот же усилитель, величины A и R изменяются синхронно при изменении температуры. Использование отношения A/R в формуле (4) уменьшает зависимость показаний датчика от температуры.

Закон Ламберта—Бера (1) является точным только для монохроматического излучения, тогда как датчик Т регистрирует интегральную интенсивность в некотором диапазоне длин волн. Поэтому для расчета концентрации можно использовать аппроксимацию

$$C = D \cdot ABS^p, \quad (5)$$

где D и p определяются калибровочными данными. Коэффициент поглощения ИК-излучения определяется количеством молекул газа, находящихся в заданном объеме. Считая, что газ является идеальным, введем в формулу (5) поправочный множитель (T/T_{cal}) :

$$C = (T/T_{\text{cal}})D \cdot ABS^p, \quad (6)$$

где T , К — текущая температура; T_{cal} , К — температура, используемая при калибровке по концентрации метана.

Калибровка датчика проводится следующим образом. После включения датчик прогревается не менее 30 мин. Затем подается воздух без исследуемого газа. Микроконтроллер фиксирует температуру T_{cal} , определяются амплитуды измерительного A_0 и опорного R_0 сигналов. Затем подается газозодушная смесь с заданной концентрацией газа и определяется величина ABS . Процесс повторяется для нескольких концентраций газа.

На рис. 4 показаны калибровочные данные для метана. При концентрациях метана больше 2.2 об.% начинает проявляться поглощение ИК-излучения в опорном канале. При концентрации более 4.4 об.% (100% от нижнего концентрационного предела распространения пламени (НКПР)) метод с двумя источниками ИК-излучения становится неэффективным, так как если амплитуда опорного сигнала зависит от концентрации газа, то достаточно сложно определить, чем вызвано уменьшение амплитуды: появлением газа или старением ламп, изменением температуры, загрязнением оптических элементов.

Для расширения диапазона измерений необходимо увеличить расстояние между лампой L_1 и приемником T (см. рис. 1). Однако при большой длине кюветы изменение внешней температуры может по-разному влиять на температуру ламп L_1 и L_2 , что, в свою очередь, приводит к ухудшению температурной стабильности.

Точность показаний датчика в первую очередь зависит от корректности определения отношения A_0/R_0 в формуле (4). Для учета температурного изменения A_0/R_0 проводилась температурная калибровка датчика. В память микропроцессора записывались отношения A_0/R_0 при пяти значениях температуры, равномерно распределенных в диапазоне от -20 до $+50^\circ\text{C}$. При эксплуатации датчика величина A_0/R_0 определялась с использованием кусочно-линейной аппроксимации по четырем точкам, записанным в долговременной памяти микропроцессора. При температуре менее -20° и более $+50^\circ$ использовалась линейная экстраполяция.

Для компенсации старения ламп использовались амплитуды опорного и измерительного сигналов, зарегистрированных при помощи фототранзистора PD (см. рис. 1). Амплитуды сигналов и величина C (6) усреднялись за 24 ч. Усреднение проводилось при расчетной концентрации $|C| < 0.1$ об.% и стабилизации температуры ($|dT/dt| < 0.05^\circ\text{C}/\text{мин}$). При отклонении средней величины C более чем на 0.1 об.%, амплитуды сигналов,

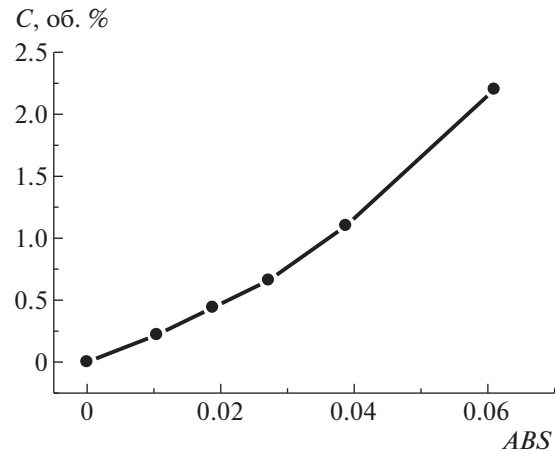


Рис. 4. Калибровочный график — зависимость объемной доли метана в воздухе (об.%) от величины поглощения ABS (4).

полученные при помощи фототранзистора, сравнивались со значениями, записанными в память микропроцессора. Если обнаруживалось, что изменение показаний датчика связано с уменьшением амплитуд опорного/измерительного сигналов, то датчик перекалибровывался с использованием новых значений A_0 и R_0 в формуле (4). За 720 ч работы изменение амплитуд опорного/измерительного сигналов за счет старения ламп составило менее 0.5% от первоначального значения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Важной характеристикой оптического датчика является стабильность его показаний при изменении внешней температуры. В соответствии со стандартом [16] устойчивость датчика к быстрым температурным изменениям не регламентирована. Проверка устойчивости к изменению температуры проводится в стационарных условиях. Однако в реальной ситуации быстрое изменение температуры может привести либо к ложному срабатыванию датчика, либо к отсутствию аварийного сигнала при наличии газа.

Ошибку в показаниях датчика при смене температуры можно отследить при нахождении датчика в чистой атмосфере. В идеальном случае величина C (6) должна быть равна нулю. Однако ошибка определения A_0/R_0 (4) приводит к отклонению расчетной концентрации от нуля.

Для определения чувствительности к температурным изменениям датчик был помещен в испытательную камеру, в которую подавался чистый воздух. Воздух проходил через змеевик, расположенный внутри испытательной камеры. Змеевик

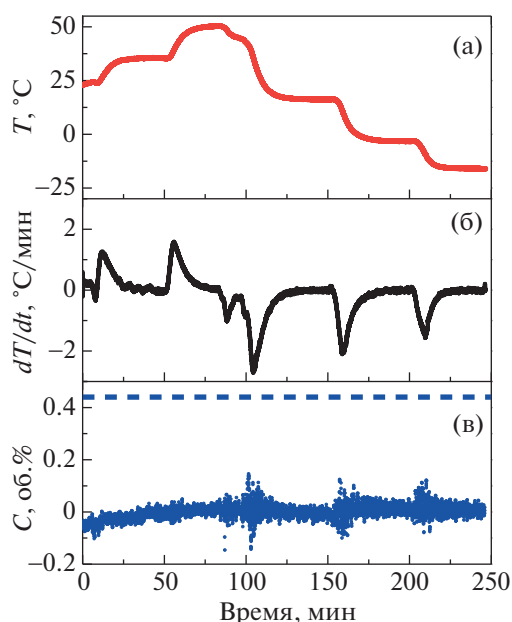


Рис. 5. Тестирование датчика на устойчивость нулевых показаний при быстром изменении температуры окружающей среды: **а** — график изменения температуры; **б** — скорость изменения температуры dT/dt ; **в** — концентрация C , рассчитанная по формуле (6). Штриховой линией показан уровень 0.44 об. % (10% НКПР).

позволял охлаждать/нагревать подаваемый воздух до температуры внутри камеры.

На рис. 5 показаны результаты тестирования при изменении температуры от $+23$ до -16°C . Сначала температура увеличивается до $+50^\circ\text{C}$, а затем, в несколько этапов, уменьшается до -16°C (рис. 5а). Скорость изменения температуры принимает как положительные, так и отрицательные значения (рис. 5б).

При стационарной температуре отклонение расчетной концентрации от нуля не превышает ± 0.05 об.% (рис. 5в) или $\pm 2.3\%$ от диапазона измерений (2.2 об.%). Для газоанализаторов с верхним пределом измерения объемной доли газа до 100% НКПР (до 4.4 об.%) допустимым является отклонение $\pm 5\%$ от диапазона измерений [16].

Процесс нагрева датчика от $+23$ до $+35^\circ\text{C}$ характеризуется смещением показаний в область отрицательных значений. Дальнейший нагрев до $+50^\circ\text{C}$ не оказывает существенного влияния на показания датчика. Характер показаний существенно меняется при охлаждении ($dT/dt < 0$). Когда производная dT/dt достигает величины $-2.7^\circ\text{C}/\text{мин}$, разброс показаний увеличивается до ± 0.15 об.% (см. рис. 5б, 5в). Для $dT/dt = -2.1^\circ\text{C}/\text{мин}$ и $dT/dt = -1.6^\circ\text{C}/\text{мин}$ отклонение показаний не превышает ± 0.11 об.%, что составляет $\pm 5\%$ от диапазона измерений. Такая погрешность явля-

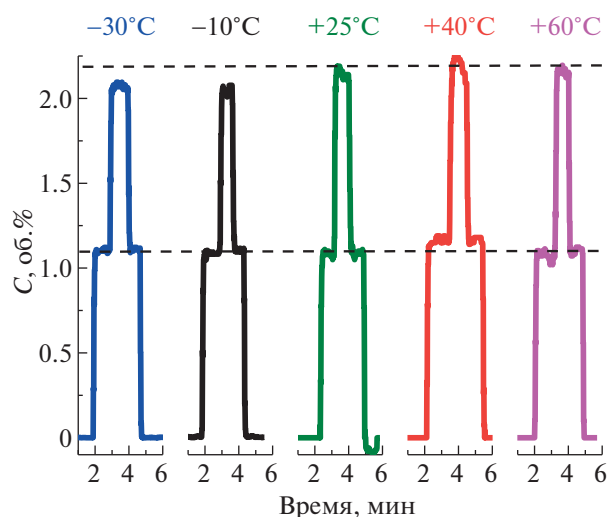


Рис. 6. Результаты тестирования датчика газовыми смесями с концентрацией метана 1.1 об.% (25% НКПР) и 2.2 об.% (50% НКПР) при различных значениях температуры окружающей среды (цифры над кривыми). Уровни 1.1 об.% и 2.2 об.% показаны штриховыми линиями.

ется допустимой даже для стационарных условий [16].

При тестировании газовой смесью воздух/метан использовались смеси с концентрацией 1.1 об.% и 2.2 об.% (рис. 6). Температура подаваемой смеси равнялась температуре среды внутри испытательной камеры. При каждом изменении температуры датчик выдерживался при новых условиях в течение часа. Точность определения концентрации метана составила ± 0.1 об.%.

Тестирование на долговременную стабильность проводилось в течение 28 дней при постоянной температуре $+25^\circ\text{C}$. Раз в сутки подавалась метановоздушная смесь с концентрацией метана 0.88 об.%. Точность измерений составила $\pm 2\%$ от показаний.

ВЫВОДЫ

В работе представлен датчик метана с двумя источниками ИК-излучения и одним термопарным приемником. Первый и второй источники ИК-излучения включаются попеременно по команде микропроцессора. Данные для измерительного канала получают при включении первого источника ИК-излучения и измерении интенсивности света, прошедшего через кювету с газом. Данные для опорного канала получают при включении второго источника. Поскольку второй источник расположен рядом с термопарным приемником, амплитуда электрического сигнала, получаемого при включении второго источника, слабо зависит от концентрации газа. Это позво-

ляет использовать данный сигнал как опорный. Идентичность температурных характеристик опорного и измерительного сигналов достигается подбором ламп накаливания с одинаковым током потребления и использованием стабилизатора тока. При стационарных условиях в диапазоне температур от -20 до $+50^{\circ}\text{C}$ погрешность определения концентрации, включая нулевые значения, не превышает ± 0.1 об.%. При быстром изменении температуры ($|dT/dt| \leq 2.7^{\circ}\text{C}/\text{мин}$) погрешность определения нулевого значения концентрации не превышает ± 0.15 об.%. При $|dT/dt| \leq 2^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ погрешность уменьшается до ± 0.1 об.%.

Недостатком схемы с двумя источниками ИК-излучения и одним приемником является чувствительность датчика к наличию пыли. Поэтому при эксплуатации датчика необходимо использовать противопылевой фильтр.

Применение схемы с двумя источниками ограничено детектированием малых концентраций газа. При больших концентрациях амплитуда опорного сигнала начинает изменяться вследствие поглощения ИК-излучения газом, и данный сигнал нельзя использовать как опорный.

К достоинствам схемы с двумя источниками ИК-излучения и одним приемником следует отнести ее низкую себестоимость. Основной вклад в себестоимость оптического датчика дает стоимость приемника с интерференционным оптическим фильтром. Приемник с двумя интерференционными фильтрами, например HTS-E21 (Heimann Sensor GmbH), почти в два раза дороже по сравнению с одноканальным вариантом HTS-A21. Датчик с газовой кюветой в виде трубки может быть изготовлен с использованием токарных и фрезеровочных работ. Изготовление кюветы не требует применения сложных литьевых прессформ, что немаловажно для снижения себестоимости изделия.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках проекта Российского научного фонда № 22-12-00396. Автор благодарен коллективу Центра инновационных технологий (г. Саратов) за консультации по реализации экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dinh T.-V., Choi I.-Y., Son Y.-S., Kim J.-C. // *Sensors and Actuators B: Chem.* 2016. V. 231. № 8. P. 529. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.03.040>
2. Wong J.Y., Anderson R.L. *Non-Dispersive infrared gas measurement*. Barcelona, Spain: IFSA Publishing, 2012. P. 120. ISBN: 978-84-615-9732-1.
3. Norton H.N. *Sensor and analyzer handbook*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall Inc., 1982. P. 562. ISBN 978-0138067601.
4. Popa D., Udrea F. // *Sensors*. 2019. V. 19. № 9. P. 2076. <https://doi.org/10.3390/s19092076>
5. Jun L., Qiulin T., Wendong Z., Chenyang X., Tao G., Jijun X. // *Measurement*. 2011. V. 44. № 5. P. 823. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2011.01.021>
6. Zhang G., Wu X. // *Opt. and Las. in Engineering*. 2004. V. 42. № 2. P. 219. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2003.08.001>
7. Guangjun Z., Yaping L., Qingbo L. // *Opt. and Las. in Engineering*. 2010. V. 48. № 12. P. 1206. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2010.06.012>
8. Wong J.Y., Schell M. // *Sensor Review*. 2011. V. 31. № 1. P. 70. <https://doi.org/10.1108/02602281111099116>
9. Signal conditioning for NDIR sensor. Application note AN5571. [Электронный ресурс] STMicroelectronics URL: www.st.com/resource/en/application_note/an5571-signal-conditioning-for-ndir-sensor-stmicroelectronics.pdf (дата обращения: 20 июня 2022).
10. Wong J., Tse C. // *Sensor Review*. 2012. V. 32. № 3. P. 217. <https://doi.org/10.1108/02602281211233205>
11. Wong J.Y. Saturation filtering NDIR gas sensing methodology. US Patent No. 8003944B2, (August 23, 2011). [Электронный ресурс] URL: <https://patents.google.com/patent/US8003944B2/en> (дата обращения: 20 июня 2022).
12. Wang X., Rodjergard H., Oelmann B., Martin H., Larsson B. // *Procedia Engineering*. 2010. V. 5. № 1. P. 1208. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2010.09.329>
13. Yi S. // *Sens. Mater.* 2017. V. 29. № 3. P. 243. <https://doi.org/10.18494/SAM.2017.1439>
14. Дремлюга В.Я., Микитченко В.Ф., Головченко П.Ф., Дашковский А.А., Шаповаленко В.И. Патент СССР № 1149146 // БИ. 1985. № 13.
15. Frodl R., Tille T. // *IEEE Sensors Journ.* 2006. V. 6. № 6. P. 1697. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2006.884440>
16. ГОСТ IEC 60079-29-1-2013 Взрывоопасные среды. Часть 29-1. Газоанализаторы. Требования к эксплуатационным характеристикам газоанализаторов горючих газов. [Электронный ресурс] Электронный фонд нормативно-технической и нормативно-правовой информации. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200107435> (дата обращения: 12.07.2022).
17. Horowitz P., Hill W. *The Art of Electronics*. 3rd Edition. USA, NY.: Cambridge University Press, 2015. P. 1220. ISBN: 9780521809269.
18. Stoer J., Bulirsch R. *Introduction to Numerical Analysis*. 2nd edition. NY.: Springer-Verlag, 2002. ISBN 9780387954523
19. Bernath P.F. *Spectra of Atoms and Molecules*. 3rd ed. UK, Oxford: Oxford University Press, 2016. P. 488. ISBN 9780199382576.