

ПРИБОРЫ, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ  
В ЛАБОРАТОРИЯХ

УДК 533.66.063

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ ГАЗОАНАЛИЗАТОР С ИММЕРСИОННОЙ  
ДИОДНОЙ ОПТОПАРОЙ В ЭКСПРЕСС-МОНИТОРИНГЕ  
ПОЖАРООПАСНОГО ПАРООБРАЗОВАНИЯ ВЫБРОСОВ  
СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА© 2022 г. А. В. Загнитько, И. Д. Мацуков, В. В. Пименов, С. Е. Сальников,  
Д. Ю. Федин, С. М. Вельмакин, В. И. Алексеев

Поступила в редакцию 15.02.2022 г.

После доработки 25.02.2022 г.

Принята к публикации 30.03.2022 г.

DOI: 10.31857/S0032816222050111

При обеспечении безопасности объектов сжиженного природного газа (СПГ) необходимо осуществлять их мониторинг с регистрацией техногенных выбросов в атмосферу с потенциальным образованием взрывопожароопасных облаков топливно-воздушных смесей (ТВС) в процессе регазификации жидких углеводородов [1]. Нами разработан и запатентован низкотемпературный газоанализатор с иммерсионной диодной оптопарой для экспресс-анализа выбросов СПГ в виде струй и разливов на грунт [2]. На рис. 1а приведены его принципиальная схема и фотография. Устройство включает в себя побудитель  $\delta$  расхода анализируемой ТВС через измерительную газовую кювету  $1$ , отражающие поверхности которой образуют оптическую схему для формирования пучка инфракрасного (ИК) излучения, иммерсионный светодиод  $9$  в качестве источника ИК-излучения и иммерсионный фотодиод  $10$  в качестве фотоприемника [2–4]. Последние связаны гибкой механической связью с корпусом  $2$  газовой кюветы юстировочными элементами  $11$  и  $12$ . Также устройство содержит внешний электронный блок  $15$  для питания, управления, стабилизации температуры и передачи оцифрованных сигналов на удаленный сервер для их анализа.

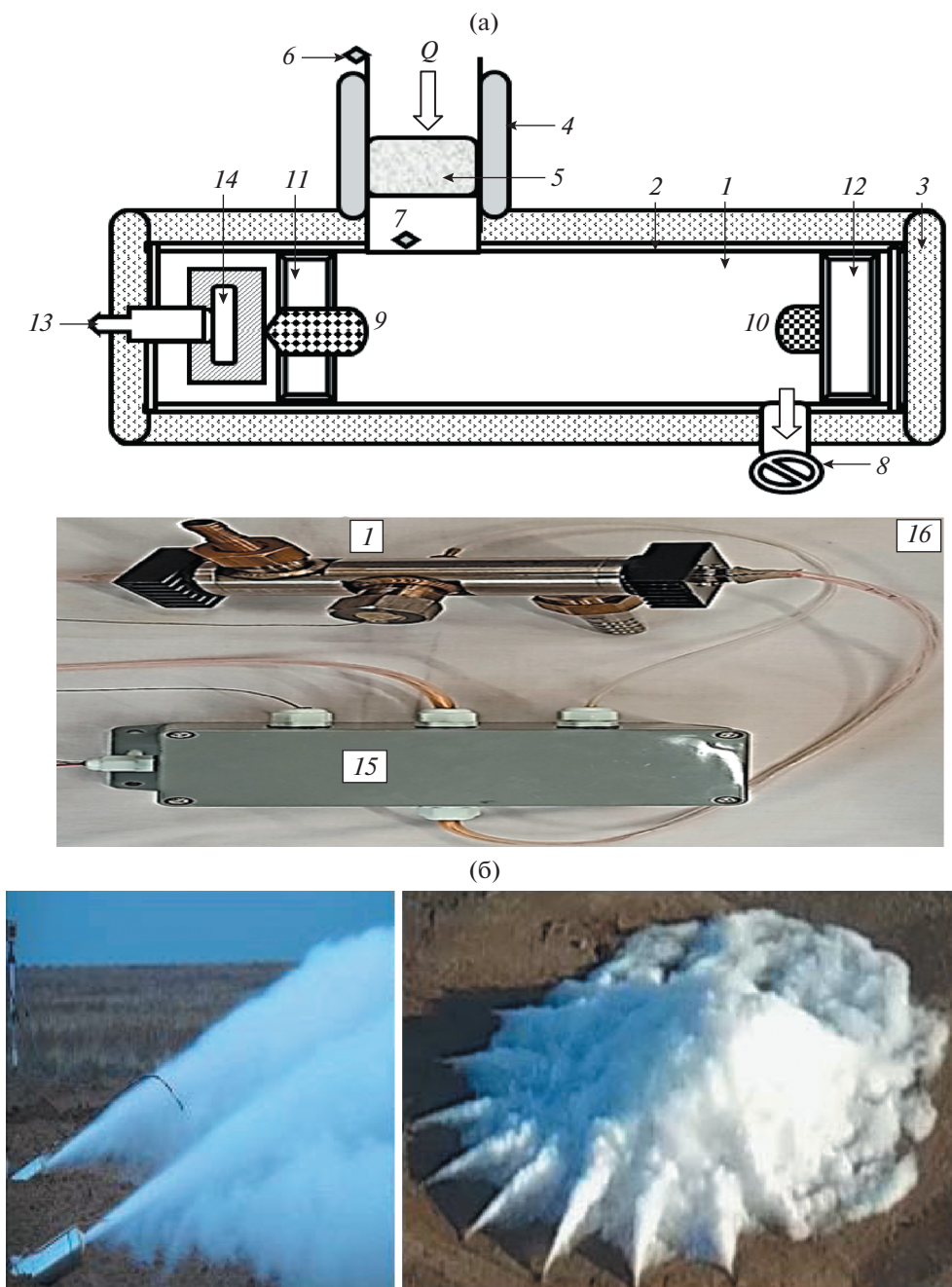
При выбросе СПГ имеет место локальное понижение температуры  $T$  атмосферы. Например, при импульсном струйном распылении СПГ с температурой хранения около 110 К и массой до  $5 \cdot 10^3$  кг внутри ТВС объемом более  $10^5$  м<sup>3</sup> наблюдалось уменьшение  $T$  до 160 К [1, 2]. Для устранения ошибки измерений при столь низкой температуре корпус газовой кюветы  $1$  выполнен с теплоизолирующим покрытием  $3$  и механически состыкован с цилиндрическим каналом электропечи  $4$  для нагревания и ввода потока анализируемого газа в кювету  $1$ . Внутри цилиндрического канала электропечи последовательно установлен

ны аэрозольный медный фильтр  $5$  с эффективностью улавливания частиц более 99.9% и термопара  $7$  для контроля внутренней температуры ТВС. Снаружи расположена термопара  $6$  для анализа температуры атмосферы.

Электронный блок  $15$  содержит плату управления термопарами хромель-алюмель  $6$  и  $7$ , побудителем расхода  $\delta$  и цилиндрической электропечью  $4$ . Теплоизоляция  $3$  выполнена из синтетического вспененного каучука. Светодиод  $9$  и фотодиод  $10$  с узкой диаграммой направленности устанавливаются в кювету  $1$  с помощью элементов юстировки  $11$  и  $12$  с настройкой диодной оптопары на максимальную величину выходного сигнала. В результате устраняется несоосность ее оптической схемы.

Оба полупроводниковых прибора ( $9$  и  $10$ ) работают на длине волны  $\lambda \approx 3.2$ – $3.6$  мкм и оснащены системой термостабилизации  $14$  на основе элементов Пельтье, обеспечивающей стабилизацию температуры на уровне, установленном при их настройке  $T \approx 285$ – $300$  К. Микропроцессор (на рис. 1 не показан) инициирует излучение светодиода  $9$  путем его включения. Аналого-цифровой преобразователь микропроцессора через несколько микросекунд, необходимых для стабилизации излучения, считывает уровень сигнала фотодиода  $16$  раз для получения усредненной величины светового значения сигнала фотодиода. Далее микропроцессор выключает светодиод, и вся процедура повторяется для получения фонового значения сигнала фотодиода. Значения светового и фонового сигналов фотодиода  $10$  передаются по интерфейсу RS-485 в удаленный компьютер.

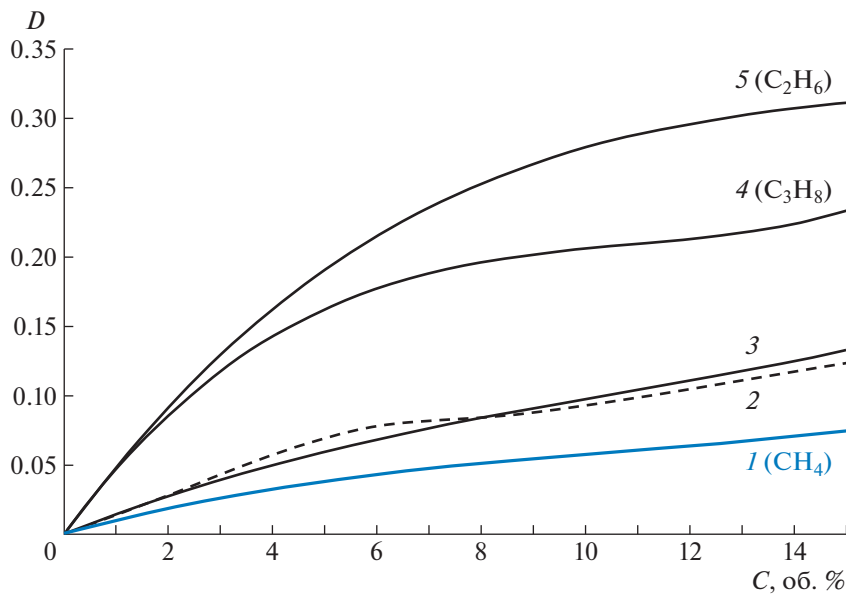
Исследование параметров газоанализатора со светодиодом LED34TO8TEC и фотодиодом марки PD34TO8TEC с  $\lambda = 3.4$  мкм [3, 4] проводилось



**Рис. 1.** а – принципиальная схема и фотография низкотемпературного ИК-газоанализатора (1 – газовая кювета с корпусом 2 и внешним теплоизолирующим покрытием 3; 4 – цилиндрическая электропечь с аэрозольным медным фильтром 5 внутри; 6 и 7 – термопары для измерения температуры ТВС снаружи и внутри ИК-газоанализатора соответственно; 8 – побудитель расхода газа; 9 и 10 – иммерсионные светодиод и фотодиод соответственно; 11 и 12 – их юстировочные элементы; 13 – разъем соединения внешнего электронного блока 15 для подключения цепей управления, питания и передачи данных; 14 – система термостабилизации светодиода и фотодиода; 16 – фотография внешнего удаленного электронного блока 15 с газовой кюветой 1 без теплоизолирующего покрытия); б – авторские фотографии выброса из форсунок затопленных струй СПГ (слева) с развитием холодного облака ТВС диаметром около 100 м и объемом  $10^5 \text{ м}^3$ , стелющегося над поверхностью Земли, с визуализацией вследствие охлаждения и конденсации паров воды с образованием водного аэрозоля (справа).

на газовом стенде путем создания заданной объемной концентрации алканов и СПГ с фильтрованным воздухом с их однородным перемешива-

нием в винтофрированных трубах [1]. Их объемная концентрация  $C_{\text{определялась}}$  из соотношения расходов углеводородов и воздуха с периодиче-



**Рис. 2.** Экспериментальные зависимости оптической плотности  $D$  метана (1), СПГ (3), пропана (4) и этана (5) от их концентрации  $C$  в воздухе; штриховая кривая 2 – расчет  $D$ , согласно аддитивному закону, для следующего состава СПГ: 93 об.% – метан, 4,8 об.% – этан, 1,5 об.% – пропан, 0,5 об.% – бутан и 0,2 об.% – другие примеси [1].

ским хроматографическим анализом проб. Использовались метан, этан и пропан с  $C > 99,95$  об.%, а также промышленный СПГ с концентрацией широкой фракции легких углеводородов (этан, пропан, бутан и др.) от 2 до 7 об.%. Показано, что оптимальный расход анализируемого газа  $Q \approx (3-9) \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$  при  $T > 150 \text{ К}$ .

Анализ быстродействия  $\tau_0$  электронного блока 15 осуществлялся путем измерения напряжения на выходе усилителя сигнала фотодиода 10 в зависимости от времени  $t$  при периодическом включении на 130 мкс и выключении светодиода 9 с периодичностью 0,02 с, обеспечиваемой таймером микропроцессора.

Быстродействие газоанализатора определялось в процессе импульсного уменьшения концентрации метана на 90% в газовой кювете 1. Изменение величины  $C$  осуществлялось путем более чем стократного разбавления метана фильтрованным воздухом с расходом  $Q = 9 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$  с быстрым вытеснением метана из газоанализатора. Одновременно регистрировалось изменение напряжения на выходе усилителя сигнала фотодиода 10 в зависимости от времени.

Установлено, что для электронного блока  $\tau_0 \leq 25 \text{ мкс}$ , а быстродействие газоанализатора составляет  $\tau \leq 0,025-0,03 \text{ с}$ .

Согласно закону Бугера–Ламберта–Бера, ослабление интенсивности излучения, прошедшего через многокомпонентную ТВС, составляет  $I = I_0 \exp(-L \sum_i \Delta_i C_i)$ , где  $I_0$  и  $I$  – соответственно

интенсивности излучения до и после ТВС;  $\Delta_i$  – спектральный коэффициент поглощения излучения  $i$  компонентой ТВС;  $C_i$  – ее концентрация. Их оптическая плотность может быть рассчитана как  $D = \lg(I_0/I) = \sum D_i$ , где  $D_i = \lg(I_0/I_i)$  – оптическая плотность компоненты  $i$  ТВС с ослаблением излучения  $I_i$  [5].

Измеренные значения  $D$  для смеси воздуха с метаном, регазифицированным СПГ, пропаном и этаном (сплошные кривые 1, 3, 4 и 5 соответственно) в зависимости от их объемной концентрации  $C$  приведены на рис. 2. Оптические плотности  $D$  для бутана, этана и пропана практически совпадают при  $C < 1$  об.%. Штриховая кривая 2 соответствует расчетному значению  $D$  как суммы измеренных значений оптических плотностей  $D_i$  алканов, входящих в состав СПГ, с известной концентрацией. Отметим, что кривые 2 и 3 удивительно совпадают.

Разработанные ИК-газоанализаторы позволили с быстродействием  $\tau \leq 0,03 \text{ с}$  анализировать взрывопожароопасные парообразования крупномасштабных выбросов СПГ (см. рис. 1б) массой до  $5 \cdot 10^3 \text{ кг}$  при температуре от 300 до 160 К с полным или более чем 50%-ным испарением массы капель с диаметром  $d < 0,001 \text{ м}$  за время менее 1 с. Выбросы осуществлялись распылением СПГ в виде струй с их дроблением при числах Рейнольдса  $Re = Ud\rho/\eta < 10^5$  и Вебера  $We = \rho(U - U_0)^2 d/\sigma < 10^4$  с парообразованием кипящих капель [1]. Здесь  $\rho$ ,  $\eta$  и  $U_0$  – плотность, динамическая вязкость и скорость воздуха соответственно;  $\sigma$  – коэффициент

поверхностного натяжения СПГ при 110 К,  $d \leq 0.05$  м – диаметр капель СПГ;  $U \leq 60$  м/с – их скорость. Конвективный теплообмен между каплями и атмосферой определяется состоянием воздушной среды, температурой и скоростью ветра, а также размером облака ТВС. В результате, созданный газоанализатор позволяет детектировать парообразование СПГ с возникновением взрывопожароопасных объемных концентраций ТВС в диапазоне от 5 до 15 об.% с быстродействием  $\tau \leq 0.03$  с. Отметим, что многочисленные аналоги [1–5] позволяют детектировать кинетику испарения капель СПГ только с  $\tau > 0.3–0.5$  с.

Таким образом, разработан и запатентован ИК-газоанализатор на основе иммерсионной диодной оптопары с быстродействием  $\tau \leq 0.03$  с для экспресс-анализа взрывопожароопасных паров образований выбросов СПГ в атмосферу при  $T > 150$  К с передачей оцифрованных данных на удаленный до 1200 м сервер. Его характеристики превосходят параметры отечественных и зарубежных газоанализаторов, предназначенных для мониторинга выбросов СПГ. Созданный ИК-газоанализатор может использоваться для контроля концентрации алканов и СПГ при их быстром истечении в атмосферу, а также в технологиях создания импульсных газокпельных потоков алканов в крупномасштабных метановоздушных смесях СПГ для исследования взрывопожароопасных свойств ТВС.

Сеть таких газоанализаторов может быть интегрирована в системы промышленной безопасности объектов топливно-энергетического комплекса и анализа эволюции аварийных выбросов СПГ.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена по теме “Разработка физико-технических основ методов измерения параметров аэрозольных и парогазовых облаков, возникающих при крупномасштабных авариях на объектах ТЭК, и создание экспериментальных образцов систем диагностики аэрозольных облаков”, приказ № 2748 от 28.10.2021.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Загнитько А.В., Зарецкий Н.П., Мацуков И.Д., Алексеев В.И., Вельмакин С.М., Федин Д.Ю., Пименов В.В., Сальников С.Е. // Газовая промышленность. 2021. № 5. С. 82.
2. Загнитько А.В., Федин Д.Ю. Патент РФ на полезную модель № 201917 // Оpubл. 21.01.2021. Бюл. 3.
3. ООО “ИоффеЛед”. [www.ioffeled.com](http://www.ioffeled.com).
4. Александров С.Е., Гаврилов Г.А., Капралов А.А. и др. // Журнал технической физики. 2009. Т. 79. Вып. 6. С. 112.
5. Ландсберг Г.С. Оптика. М.: Наука, 1976.

Адрес для справок: Россия, 123182, Москва, площадь Курчатова, 1, НИЦ “Курчатовский институт”, E-mail: [zagnitko\\_av@nrcki.ru](mailto:zagnitko_av@nrcki.ru)