

03

## Быстродействующий низкотемпературный газоанализатор импульсных выбросов сжиженного природного газа в атмосферу на основе иммерсионных диодных оптопар

© А.В. Загнитько,<sup>1</sup> И.Д. Мацуков,<sup>2</sup> В.В. Пименов,<sup>1</sup> С.Е. Сальников,<sup>1</sup> Д.Ю. Федин,<sup>1</sup> В.И. Алексеев,<sup>2</sup> С.М. Вельмакин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский центр „Курчатовский институт“,  
123182 Москва, Россия

<sup>2</sup> Приозёрский филиал национального исследовательского центра „Курчатовский институт“,  
123182 Москва, Россия  
e-mail: zagnitko\_av@nrcki.ru

Поступило в Редакцию 24 декабря 2021 г.  
В окончательной редакции 3 марта 2022 г.  
Принято к публикации 4 марта 2022 г.

Разработан низкотемпературный инфракрасный оптический газоанализатор на основе иммерсионных диодных оптопар с быстродействием менее 0.03 с для детектирования импульсных выбросов в атмосферу взрывопожароопасных смесей сжиженного природного газа и алканов с воздухом при температуре более 150 К с передачей оцифрованных данных на удаленный сервер. Описана конструкция и приведены ее характеристики в процессе анализа смесей воздуха с метаном, этаном, пропаном и сниженным природным газом различного состава. Показано, что величина быстродействия и диапазон рабочих температур газоанализатора превосходят параметры аналогов для мониторинга истечений сжиженного природного газа в атмосферу.

**Ключевые слова:** алканы, быстродействие, инфракрасный оптический газоанализатор, импульсные выбросы, иммерсионные диодные оптопары, сжиженный природный газ.

DOI: 10.21883/JTF.2022.06.52505.325-21

### Введение

При обеспечении промышленной безопасности объектов добычи и хранения сжиженного природного газа (СПГ) необходима оценка последствий их техногенных, импульсных выбросов в виде струй и пролива на грунт с образованием в процессе регазификации жидких углеводородов пожароопасных облаков топливно-воздушных смесей (ТВС) с объемными концентрационными пределами воспламенения (КПВ) в диапазоне от 5 до 15 vol.% [1–3]. Их анализ достаточно сложен, поскольку необходимо измерять флуктуирующие значения концентрации  $C$  при температуре  $T \geq 150$  К с передачей цифровых данных на удаленный сервер, а устройства для сканирования облаков ТВС должны иметь быстродействие  $\tau < 0.1$  с, функционировать при скорости газонакапельных потоков до сотен метров в секунду и обладать устойчивостью к воздействию импульсов давления газов до  $10^5$  Па [2–14]. Здесь  $\tau$  определяется как время, необходимое для измерения объемной концентрации газовой смеси на уровне 90% от ее конечного значения после быстрого изменения величины  $C$ .

Известно, что для промышленных полупроводниковых газоанализаторов на основе пленок диоксидов металлов, допированных палладием, оксидом меди и т.п., величина  $\tau \leq 2–3$  с вследствие относительно малой скорости диффузии анализируемых молекул через чувствитель-

ную тонкую пленку диоксида металла [4–7]. Попытки повысить их быстродействие за счет оптимизации ее толщины и химического состава, температуры нагревания и схемы стабилизации позволили создать опытные образцы с 0.3 с.

В электрохимических газоанализаторах осуществляется селективная реакция анализируемых молекул с электролитом [4–7]. Величина генерируемого тока прямо пропорциональна концентрации детектируемого газа и значение  $\tau = 15–30$  с [4–7].

В типичных инфракрасных оптических (ИК) газоанализаторах, например, Сенсис-500 с зарубежным пироэлектрическим сенсором типа „MSH-P-CH4-5BPF Dynament GB“ и поглощением молекулами углеводородов ИК излучения с рабочей длиной волны  $\lambda = 3.3$   $\mu\text{m}$  лампы накаливания с вольфрамовой нитью, отбор анализируемых газов осуществляется за счет их молекулярной диффузии через защитный аэрозольный фильтр сенсора [8]. В результате  $\tau \approx 20–25$  с при температуре более 255 К.

Отечественные ИК газоанализаторы на основе сенсоров „Мирех“ с использованием традиционных светодиодов и фотодиодов с аэрозольными фильтрами характеризуются значением  $\tau \approx 0.5–1$  с при  $T > 150$  К за счет создания предварительно нагретого в электропечи потока конвективной диффузии детектируемой газовой смеси через сенсор с помощью аспиратора [9–11].

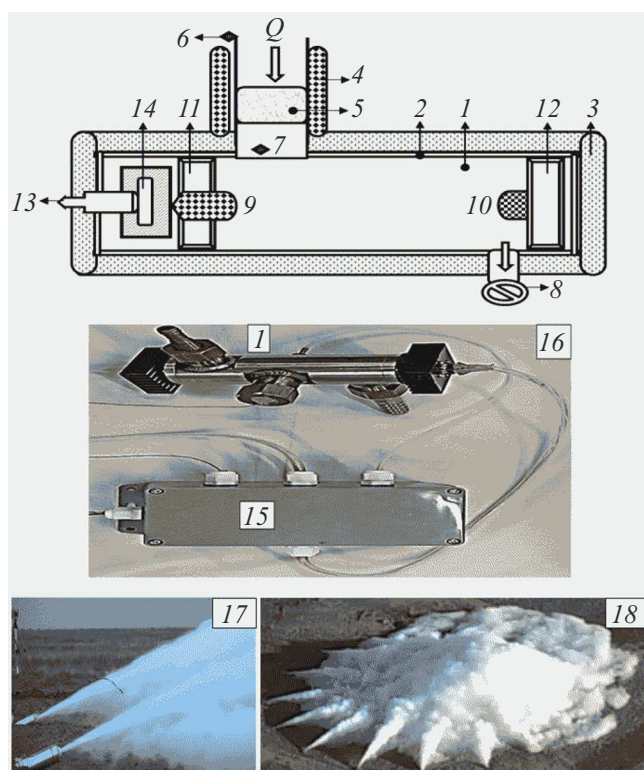
В приведенных ИК аналогах светодиоды с широкой диаграммой излучения и фотодиоды жестко связаны с корпусом газовой кюветы [7–11]. Это не критично, так как большая часть ИК излучения собирается на фотоприемнике. Однако при узких диаграммах направленности излучения светодиода и его приема фотодиодом, характерных для иммерсионных диодных оптопар, их положение фиксируется гибкой механической связью с корпусом газовой кюветы юстировочными элементами, так как диаграмма распространения излучения источника может не совпадать с максимумом чувствительности диаграммы приема излучения фотоприемника [12–14]. При этом ИК газоанализаторы на основе иммерсионных диодных оптопар позволяют измерять концентрацию углеводородов с быстродействием до 0.1 с [12–14]. Однако последние не детектируют парообразование выбросов метана и широкой фракции легких углеводородов (ШФЛУ: этан, пропан, бутан и другие легкие алканы) СПГ в атмосферу с характерным временем флуктуаций их объемной концентрации менее 0.1 с при  $T > 150$  К. Это обусловлено тем, что иммерсионные диодные оптопары не предназначены для работы при столь низкой температуре.

Целью настоящей работы являлась разработка низкотемпературного ИК газоанализатора на основе иммерсионных диодных оптопар для экспресс мониторинга техногенных и природных импульсных выбросов в атмосферу алканов и СПГ в виде затопленных струй или разливов на грунт с образованием флуктуирующих взрывопожароопасных концентраций ТВС в процессе регазификации жидких углеводородов с быстродействием  $\tau < 0.03$  с при температуре более 150 К [1]. Проведено исследование зависимости парообразования тонкодисперсных капель жидких алканов от величины их диаметра и температуры атмосферы.

## 1. Экспериментальная часть

На рис. 1 приведена принципиальная схема и фотография запатентованного быстродействующего низкотемпературного ИК газоанализатора импульсных выбросов алканов и СПГ в атмосферу на основе иммерсионных диодных оптопар [15].

Устройство включает побудитель расхода  $Q$  анализируемой углеводно-воздушной смеси 8 через измерительную газовую кювету 1, отражающие поверхности которой образуют оптическую схему для формирования пучка ИК излучения, его источник в виде иммерсионного светодиода 9 и его фотоприемник в виде иммерсионного фотодиода 10 [12–14], связанные гибкой механической связью с корпусом 2 газовой кюветы элементами юстировки 11 и 12, внешние электронные блоки 14 и 15 для питания, управления, стабилизации температуры и передачи оцифрованных сигналов на удаленный сервер их анализа. Корпус газовой кюветы 1 выполнен с внешним теплоизолирующим покрытием 3 и механически



**Рис. 1.** Принципиальная схема и фотография низкотемпературного ИК газоанализатора на основе иммерсионных диодных оптопар: 1 — измерительная газовая кювета с корпусом 2 и внешним 3 теплоизолирующим покрытием; 4 — цилиндрическая электропечь с аэрозольным металлическим фильтром 5 внутри; 6 и 7 — термопары для измерения температуры воздушно-углеродных смесей снаружи и внутри ИК газоанализатора, соответственно; 8 — побудитель расхода  $Q$  анализируемой углеводно-воздушной смеси; 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 иммерсионных светодиода и фотодиода; 16 — фотография внешнего электронного блока 15 и газовой кюветой 1 без теплоизолирующего покрытия 3; 17 и 18 — фотографии выброса затопленных струй СПГ из форсунок с начальной скоростью и длиной до 60 м/с и 50 м с образованием холодного углеводно-воздушного облака объемом около  $10^5$  м<sup>3</sup>, стелящегося над поверхностью земли.

состыкован с цилиндрическим каналом электропечи 4 для нагревания и ввода анализируемого газа в газовую кювету 1. Внутри цилиндрического канала электропечи последовательно установлен аэрозольный металлический фильтр 5 и термопара 7 для контроля температуры анализируемой ТВС. Снаружи расположена термопара 6 для анализа ее внешней температуры. В электронном блоке 15 установлены плата управления термопарами хромель–алюмель 6 и 7, побудителем расхода 8 и цилиндрической электропечью 4. Волокнистый аэрозольный металлический фильтр 5 класса Н11 изготовлен

из меди с эффективностью улавливания частиц более 99.9%. Теплоизоляция 3 выполнена из синтетического вспененного каучука для уменьшения теплообмена между внешней атмосферой и внутренним объемом газовой кюветы 1. В специальных случаях используется экранно-вакуумная теплоизоляция с давлением не выше  $10^{-6}$  Па.

Светодиод 9 и фотодиод 10 настроены с помощью элементов юстировки 11 и 12 на максимальную величину выходного сигнала фотодиода 10. Оба полупроводниковых прибора с рабочей длиной волны  $\lambda \approx 3.2\text{--}3.6\ \mu\text{m}$  оснащены системой термостабилизации 14 на основе элементов Пельтье для поддержания их температуры на заданном уровне от 285 до 300 К. Значения  $T$  считываются аналого-цифровым преобразователем (АЦП) микропроцессора для контроля и с величинами светового и фонового сигналов фотодиода 10 передаются по интерфейсу RS-485 на удаленный сервер (на рис. 1 не показан). Оптическая длина  $L$  и объем газовой кюветы 1 составляет около 0.1 м и  $2.8 \cdot 10^{-6}\ \text{m}^3$ .

В соответствии с законом Бугера–Ламберта–Бера ослабление интенсивности излучения, прошедшего через многокомпонентную ТВС, составляет

$$I = I_0 \exp\left(-L \sum \Delta_i C_i\right),$$

где  $I_0$  и  $I$  — интенсивности монохроматического излучения до и после ТВС соответственно,  $L$  — ее оптическая длина,  $\Delta_i$  — спектральный коэффициент поглощения излучения  $i$ -компонентой ТВС,  $C_i$  — ее концентрация. Их оптическая плотность может быть рассчитана на основании аддитивного закона, как

$$D = \lg(I_0/I) = \sum D_i,$$

где  $D_i = \lg(I_0/I_i)$  — оптическая плотность  $i$ -компоненты ТВС с ослаблением излучения  $I_i$  [16,17].

Известно, что температура СПГ при нормальных условиях хранения составляет около 110 К, состав его горючих компонент ШФЛУ не нормируется, а их основное объемное содержание определяется концентрацией этана, пропана и бутана [18]. В процессе выброса сжиженного газа в атмосферу имеет место понижение температуры облака углеводородов. Например, при крупномасштабном струйном выбросе СПГ массой до  $5 \cdot 10^3\text{--}10^4$  kg наблюдалось понижение температуры до 160 К в центре облака ТВС объемом более  $10^5\ \text{m}^3$  [10,11]. В связи с этим поток анализируемой ТВС перед подачей в газовую кювету 1 предварительно нагревается в электропечи 4 с аэрозольным медным фильтром 5. Его оптимальный расход  $Q \approx (3\text{--}9) \cdot 10^{-4}\ \text{m}^3/\text{s}$ .

Калибровка и анализ характеристик ИК газоанализатора со светодиодом 9 марки LED34TO8TEC и фотодиодом 10 марки PD34TO8TEC с  $\lambda = 3.4\ \mu\text{m}$  [12-14] проводились на газовом стенде путем создания заданной объемной концентрации алканов или СПГ с фильтрованным воздухом с их однородным перемешиванием в винтоффрированных трубах [10,11,15]. Концентрация

углеводородов определялась из соотношения объемных расходов алканов или СПГ и воздуха с периодическим хроматографическим анализом их проб. При этом использовались метан, этан, пропан и бутан с  $C > 99.95\ \text{vol.}\%$ , а также промышленный, отечественный СПГ с концентрацией ШФЛУ от 2 до 7 vol.% [18].

Анализ крупномасштабных выбросов СПГ массой до  $5 \cdot 10^3$  kg осуществлялся при его распылении в виде затопленных струй с их дроблением при числах Рейнольдса  $Re = Vd\rho/\eta < 10^5$  и Вебера  $We = \rho(V - V_0)^2 d/\sigma < 10^4$  с парообразованием кипящих капель [1,2,17]. Конвективный теплообмен между ними и атмосферой определялся состоянием воздушной среды, температурой и скоростью ветра, а также размером облака ТВС. Здесь  $\rho$ ,  $\eta$  и  $V_0$  — плотность, динамическая вязкость и скорость воздуха соответственно,  $\sigma = 15.5 \cdot 10^{-3}\ \text{n/m}$  — коэффициент поверхностного натяжения СПГ при 110 К,  $d \leq 0.05\ \text{m}$  — диаметр каплей СПГ,  $V \leq 60\ \text{m/s}$  — их скорость. При этом наблюдалась визуализация струй и облака ТВС (фотография 17, рис. 1) за счет спонтанной конденсации паров воды при их резком охлаждении с образованием водного тумана каплей и частиц льда. Первоначальная относительная влажность воздуха составляла 35–40% при  $T \approx 280\text{--}285\ \text{K}$ .

## 2. Результаты, их обсуждение

На рис. 2 приведена зависимость напряжения  $U$  на выходе усилителя сигнала фотодиода 10 от времени  $t$  при включении и выключении светодиода 9 (LED34TO8TEC) с длительностью его включенного состояния  $130\ \mu\text{s}$  для определения быстродействия  $\tau_0$  электронного блока ИК газоанализатора. В процессе ее измерения таймер микропроцессора был настроен на период повторения 20 ms. По прерыванию таймера при  $t = -80\ \mu\text{s}$  его АЦП считывает при выключенном светодиоде уровень фонового сигнала фотодиода 16 раз для получения усредненного значения. В момент  $t = 0\ \mu\text{s}$  микропроцессор включает светодиод и через  $52\ \mu\text{s}$  после полной стабилизации его ИК излучения АЦП микро-

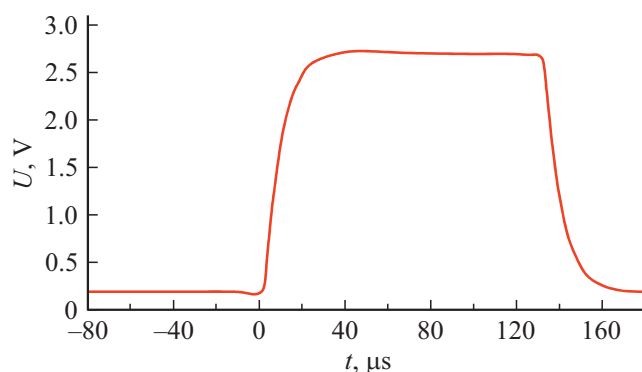


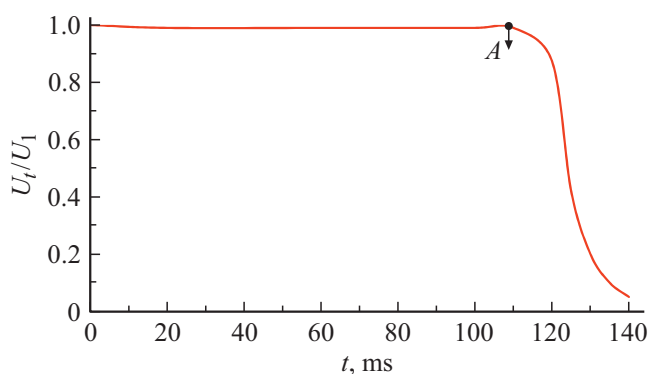
Рис. 2. Зависимость напряжения  $U$  усилителя сигнала фотодиода от времени  $t$ .

процессора считывает также 16 раз уровень сигнала фотодиода для получения его усредненного светового значения. Далее микропроцессор выключает светодиод и происходит передача измеренных значений  $U$  на удаленный до 1200 м сервер. Анализ данных рис. 2 показал, что величина  $\tau_0 \leq 25 \mu\text{s}$ .

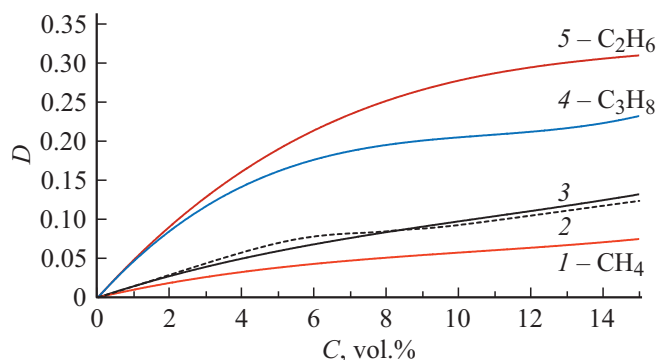
На рис. 3 приведена зависимость относительного изменения напряжения  $U_t/U_1$  на выходе усилителя сигнала фотодиода  $I0$  (PD34T08TEC) от времени  $t$  при более чем 100 кратном обмене за секунду в газоанализаторе метана с начальной концентрацией  $C = 6.5 \text{ vol.}\%$  фильтрованным воздухом с расходом  $Q = 9 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$  для определения его быстродействия, где  $U_1$  — стационарное напряжение на выходе усилителя сигнала фотодиода при  $C = 6.5 \text{ vol.}\%$ ,  $U_t$  — изменение напряжения на выходе усилителя сигнала фотодиода от времени в процессе обмена метана воздухом в газовой кювете и соответственно уменьшения величины его концентрации от 6.5 до  $\approx 0.6 \text{ vol.}\%$ . Анализ данных рис. 3 показал, что величина  $\tau \leq 25\text{--}30 \text{ ms}$  при  $\tau_0 \approx 25 \mu\text{s}$ .

Зависимости значений  $D$ , измеренных для смеси воздуха с метаном, регазифицированным СПГ, пропаном и этаном (сплошные кривые 1, 3–5 соответственно), от величины их объемной концентрации  $C$  приведены на рис. 4. Отметим, что при  $C < 1 \text{ vol.}\%$  значения  $D$  с достаточной для практики точностью совпадают. Пунктирная кривая 2 — расчетные значения  $D$  для СПГ как сумма измеренных значений оптических плотностей  $D_i$  алканов, входящих в его состав с известной объемной концентрацией: 93 метан, 4,8 этан, 1,5 пропан, 0,5 бутан и 0,2 vol.% другие примеси [18]. Укажем, что кривые 2 и 3 удовлетворительно совпадают.

В процессе анализа парообразования выбросов алканов и СПГ в атмосферу были выполнены расчеты времени  $t$  полного и 50% испарения массы криогенных капель от величины их диаметра  $d = 10\text{--}5000 \mu\text{m}$  при температуре воздуха  $T = 112\text{--}293 \text{ K}$ . Значения  $t$  рассчитывались на основе экспериментально проверенной модели конвективного обмена энергией между криогенной каплей и окружающей парогазовой средой в процессе ее



**Рис. 3.** Зависимость относительного изменения напряжения  $U_t/U_1$  на выходе усилителя сигнала фотодиода от времени  $t$ ; А — начало обмена при  $t \approx 110 \text{ ms}$ .

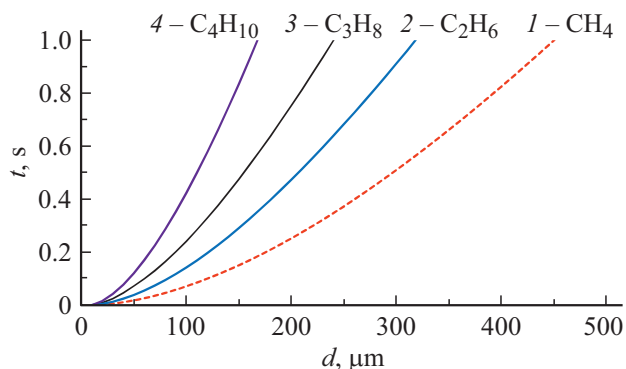


**Рис. 4.** Экспериментальная зависимость значений оптической плотности  $D$  смеси воздуха с алканами и СПГ от величины их объемной концентрации  $C$ : 1 — метан, 2 — расчет  $D$  для СПГ, согласно аддитивному закону, 3 — СПГ, 4 — пропан, 5 — этан.

свободного падения в воздухе с температурой от 112 до 293 К при числах Рейнольдса  $Re = d\rho V_s/\eta \approx 0.1\text{--}10^5$ , где  $V_s$  — скорость седиментации капли [10,19,20]. Процесс испарения каплей является нестационарным и происходит в режиме кипения жидкости с постоянной температурой до ее парообразования. Нестационарный конвективный массоперенос в газовой фазе при испарении связан с потерей устойчивости диффузионного режима на начальной фазе движения капли. Скорость седиментации каплей определялась по известным зависимостям при  $Re < 1$  (закон Стокса), в переходном режиме ( $1 < Re < 10^3$ ) и в области применимости закона Ньютона ( $10^3 < Re < 10^5$ ) [17–20]. В результате для кипящей капли была получена зависимость изменения  $d$  от  $t$  с учетом теплоты испарения жидкости при  $Re < 10^5$ . При этом не учитывалась деформация капли и лучистый теплообмен. Отметим, что использование классической теории диффузионного испарения Максвелла–Ленгмюра, а также Кнудсена и Герца для неподвижных относительно парогазовой среды кипящих каплей [17–20] не корректно, так как их температуры существенно различаются, а сами капли седиментируют.

В качестве примера на рис. 5 приведены значения времени  $t$  полного испарения криогенных каплей алканов диаметром  $d = 10\text{--}500 \mu\text{m}$  при  $T = 293 \text{ K}$ . Из анализа данных рис. 5 следует, что капли метана быстрее испаряются, чем капли более тяжелых алканов. Аналогичный результат имел место при понижении температуры до 150 К, а также в процессе испарения двухкомпонентных криогенных каплей метана с примесью этана или пропана с концентрацией от 1 до 10 vol.%. Полученные результаты согласуются с экспериментальными данными о преимущественном парообразовании метана (отпарной газ) в крупномасштабных емкостях хранения и транспортировки СПГ [21], а также с наблюдением отсутствия образования существенно неоднородных смесей этана, пропана и бутана в углеродно-воздушных облаках при





**Рис. 5.** Зависимость рассчитанных значений времени  $t$  полного испарения криогенных капель алканов при температуре воздуха 293 К от величины их диаметра  $d$ : 1 — метан, 2 — этан, 3 — пропан, 4 — бутан.

выбросе СПГ в виде струй или разливов на грунт с его последующей регазификацией [10,11].

Отметим, что величина  $t < 1$  s для капель метана диаметром менее 500  $\mu\text{m}$ . Время уменьшения их диаметра на 20% с испарением 50% массы существенно меньше и, например, для капель метана диаметром  $d = 100, 500$  и  $1000 \mu\text{m}$  составляет  $\approx 0.04, 0.56$  и  $1.6$  s соответственно при  $T = 293$  К. Многочисленные ИК аналоги с временным разрешением более 0.3 s [4–10] не позволяют детектировать процесс столь быстрого парообразования тонкодисперсных криогенных капель алканов и СПГ (рис. 5). Созданный ИК газоанализатор на основе иммерсионных диодных оптопар позволил анализировать их парообразование с быстродействием  $\tau < 0.03$  s. Это необходимо, в частности, для инженерного анализа крупномасштабных, импульсных истечений СПГ за счет использования высокоэнергетических материалов с образованием взрывопожароопасных ТВС объемом более  $10^5 \text{ m}^3$  за несколько секунд.

Показано, что при крупномасштабных выбросах СПГ внутри углеродно-воздушного облака образуются локальные и взрывоопасные ТВС объемом от  $10^3$  до  $10^5 \text{ m}^3$  с объемной концентрацией паров углеводородов от 5 до 15 vol.%. Длительность их существования зависит от условий распыления и количества массы импульсно выброшенного СПГ, а также от состояния атмосферы и грунта. В процессе испарения распыленного СПГ и возрастания концентрации его паров температура ТВС в центре облака понижалась до 150–170 К. При этом внутри ИК газоанализатора температура практически не менялась и составляла около 290 К. Концентрация и температура газовых смесей метана, паров ШФЛУ и воздуха флуктуировали во времени и были неоднородно распределены как по высоте (до 40 m), так и по длине (более 100 m) облаков. Получены данные о кинетике изменения температуры от 280 до 150 К и концентрации метана от 1 до 30 vol.%. внутри облаков СПГ объемом до  $10^6 \text{ m}^3$  с передачей данных с интервалом 1 ms на

удаленный до 4000 m головной сервер. Эти результаты качественно коррелируют с данными экспериментов „Falcon“ по истечению СПГ в атмосфере [2,3].

## Заключение

Разработан и запатентован ИК газоанализатор на основе иммерсионных диодных оптопар с быстродействием менее 0.03 с при  $T > 150$  К для определения объемной концентрации алканов и паров СПГ в процессе их техногенных выбросов в атмосферу в виде струй и разливов на грунт с передачей оцифрованных данных по оптоволоконной линии на удаленный сервер. Его технические характеристики превосходят параметры отечественных и зарубежных газоанализаторов для анализа аварийных выбросов СПГ.

Созданный быстродействующий ИК газоанализатор может использоваться для экспресс-контроля КПВ алканов и СПГ при их импульсном истечении в атмосферу с помощью высокоэнергетических материалов для быстрого развития ТВС, а также в технологиях создания газокapельных потоков алканов в крупномасштабных метановоздушных смесях СПГ при исследовании их взрывопожароопасных свойств.

Сеть ИК газоанализаторов может быть интегрирована в экспресс-системы промышленной безопасности объектов топливно-энергетического комплекса для получения и хранения СПГ, а также анализа эволюции их выбросов с образованием крупномасштабных облаков ТВС.

## Финансирование работы

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

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] C.J.R. Coronado, J.A. Carvalho, J.C. Andrade, E.V. Cortez, F.S. Carvalho, J.C. Santos, A.Z. Mendiburu. *J. Hazardous Mater.*, **2414–4242**, 32 (2012). doi:org/10.1016/j.hazmat.2012.09.035
- [2] S.T. Chan. *J. Hazardous Mater.*, **30**, 195 (1992).
- [3] T.C. Brown, R.T. Cederwall, S.T. Chan, D.L. Ermak, R.P. Koopman, K.C. Lamson, D.L. Ermak, R.P. Koopman, K.C. Lamson, J.W. McClure, L.K. Morris. *Lawrence Livermore National Lab.*, 665 (1990).
- [4] В.В. Мальшев, А.В. Писляков. *Журн. аналит. химии*, **64** (1), 99 (2009).

- [5] Z.Maolin, Y. Zhanheng, S. Jianping, Z. Cheng. J. Sensors Actuators B, **148**, 87 (2010).
- [6] A.A. Vasiliev, V.V. Malyshev. J. Sensors Actuators B, **189**, 260 (2013).
- [7] Система газоаналитическая СКВА-01, ЕКРМ.411741.001РЭ, Руководство по эксплуатации (ООО НПФ ИНКРАМ, М., 2013), 58 с.
- [8] Газоанализаторы серии Сенсис (ООО Дельта-С, М., 2008)
- [9] Малогабаритный измерительный преобразователь взрывоопасных газов МИП. Руководство по эксплуатации (ООО Оптосенс, СПб., 2012), 50 с.
- [10] А.В. Загнитько, Н.П. Зарецкий, И.Д. Мацуков, В.И. Алексеев, С.М. Вельмакин, Д.Ю. Федин, В.В. Пименов, С.Е. Сальников. Журн. газовая промышленность, (5), 82 (2021).
- [11] А.В. Загнитько, Н.П. Зарецкий, И.Д. Мацуков. ЖФХ, **94** (9), 1328 (2020).
- [12] ООО „ИоффеЛед“. [www.ioffeled.com](http://www.ioffeled.com)
- [13] С.Е. Александров, Г.А. Гаврилов, А.А. Капралов, Б.А. Матвеев, Г.Ю. Сотникова, М.А. Ременный. ЖТФ, **79** (6), 112 (2009). [S.E. Aleksandrov, G.A. Gavrilov, A.A. Kapralov, B.A. Matveev, G.Yu. Sotnikova, M.A. Remennyi. Tech. Phys., **54** (6), 874 (2009).]
- [14] С.А. Карандышев, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, А.А. Шленский, Л.С. Лунин, В.И. Ратушный, А.В. Корюк, Н.Г. Тараканова. ФТП, **41** (11), 1389 (2007).
- [15] А.В. Загнитько, Д.Ю. Федин. Низкотемпературный инфракрасный анализатор выбросов паров сжиженного природного газа в атмосфере на основе иммерсионных диодных оптопар (Патент РФ на полезную модель. № 201917. Бюл. 3 от 21.01.2021)
- [16] Г.С. Ландсберг. Оптика (Наука, М., 1976), 928 с.
- [17] П. Райст. Аэрозоли, введение в теорию (Мир, М., 1987), 280 с.
- [18] ГОСТ Р 57431-2017. Газ природный сжиженный. Общие характеристики. <https://docs.cntd.ru/document/1200144948>
- [19] Y. Ruan, L. Chen, X. Liu, S. Chen. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., **278**, 8 (2017). DOI: 10.1088/1757-899X/278/1/012130
- [20] S.O. Awonorin. J. Heat Transfer Eng., **10** (1), 26 (1989). DOI: 10.1080/01457638908939689
- [21] Е.С. Середенко, О.В. Пахомов, А.Ю. Баранов. Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, **20** (4), 603 (2020). DOI: 10.175862226-1494-2020-4-603-610