

ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА

УДК 533.66.063

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ТРЕХКАНАЛЬНЫЕ ГАЗОАНАЛИЗАТОРЫ В ОПТИЧЕСКОМ МОНИТОРИНГЕ ПОЖАРООПАСНЫХ ИСТЕЧЕНИЙ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА

© 2023 г. А. В. Загнитко^{а,*}, Н. П. Зарецкий^а, И. Д. Мацуков^а, С. Е. Сальников^а, В. В. Пименов^а,
Д. Ю. Федин^а, В. И. Алексеев^а

^аНИИЦ “Курчатовский институт”, Москва, Россия

*e-mail: azagnitko@yandex.ru

Поступила в редакцию 24.12.2021 г.

После доработки 29.06.2022 г.

Принята к публикации 30.06.2022 г.

Разработана сеть трехканальных низкотемпературных инфракрасно-оптических газоанализаторов с временным откликом < 1 с для детектирования при температуре до 150 К взрывопожароопасных концентраций газифицированного сжиженного природного газа (СПГ). Описаны их характеристики при анализе его крупномасштабных выбросов в атмосферу. Показано, что при импульсных выбросах СПГ в виде затопленных струй и разливах на стандартный бетон и воду образуются флуктуирующие во времени и по объему крупномасштабные области смесей воздуха, метана и паров легких алканов с взрывопожароопасной концентрацией. Теоретически и экспериментально исследовано испарение криогенных капель метана диаметром более 0.1 мм в воздухе и парах метана от температуры $T = 150\text{--}290$ К.

Ключевые слова: атмосфера, выбросы, инфракрасный газоанализатор, низкие температуры, разлив, сжиженный природный газ, затопленные струи

DOI: 10.31857/S0044453723010375, **EDN:** BEAJFJ

При обеспечении промышленной безопасности объектов получения и хранения сжиженного природного газа (СПГ) необходима оценка последствий их выбросов в атмосферу с образованием облаков взрывопожароопасных топливно-воздушных смесей (ТВС) [1–3]. Данные по их эволюции при техногенных авариях, связанных с крупномасштабными, импульсными выбросами СПГ в виде струй и разливов на грунт, ограничены [2–14], а анализ облаков ТВС достаточно сложен, поскольку необходимо измерять их флуктуирующие концентрации при температуре $T \geq 150$ К с передачей данных на удаленный сервер. При этом сеть устройств для экспресс-сканирования углеводородов в атмосфере должна иметь временной отклик $\tau < 1$ с, функционировать при скорости газокapельных потоков до сотен метров в секунду, обладать устойчивостью к воздействию импульсов давления газов до 10^5 Па и электромагнитного излучения промышленной частоты. Отметим, что величина τ практически не зависит от времени передачи данных на сервер и определяется временным откликом газоанализатора, необходимым для измерения объемной концентрации газовой смеси на уровне 90% от конечного значения после ее импульсного изменения.

Полупроводниковые, электрохимические и инфракрасно-оптические (ИК) газоанализаторы, отвечающие указанным требованиям, разработаны недостаточно [2–15]. Цель данной работы — разработка трехканального низкотемпературного ИК-газоанализатора углеводородов и создание их сети для мониторинга взрывопожароопасных облаков ТВС при $T \geq 150$ К в процессе выбросов СПГ в виде струй массой до 10^4 кг и разливов от 2×10^3 до 5×10^3 кг на бетон и воду.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Принципиальная схема запатентованного низкотемпературного трехканального ИК-газоанализатора паров углеводородов приведена на рис. 1 [8]. Устройство включает три одинаковых по конструкции параллельных канала I, II и III для анализа газовых смесей с отечественными промышленными ИК-сенсорами 1, 2 и 3 типа МІРЕХ-02-1, МІРЕХ-02-2 и МІРЕХ-02-4 с длиной волны излучения светодиодов $\lambda_1 = 3.31$, $\lambda_2 = 3.4$ и $\lambda_3 = 3.27$ мкм соответственно, при рабочей температуре $T \approx 260\text{--}330$ К [5]. В их корпусах имеются отверстия для входа и выхода конвективного газового потока.

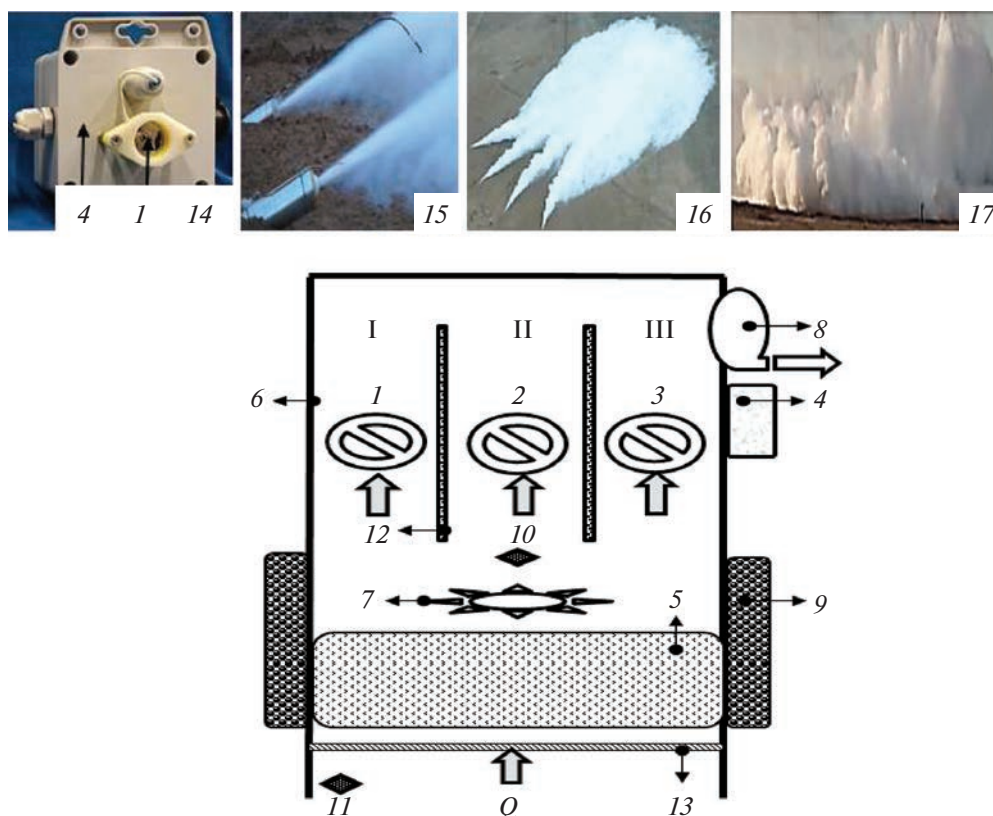


Рис. 1. Принципиальная схема низкотемпературного трехканального ИК-газоанализатора: 1, 2 и 3 – сенсоры МІРЕХ-02-1, МІРЕХ-02-2 и МІРЕХ-02-4 соответственно, 4 – электронный блок, 5 – медный наполнитель с открытой пористостью ~94%, 6 – корпус, 7 – вентилятор, 8 – газовый насос, 9 – цилиндрическая электропечь, 10 и 11 – соответственно измерители внутренней и внешней температуры газа, 12 – разделительная пластина газового потока, 13 – аэрозольный фильтр; I, II и III – параллельные каналы анализа газовой смеси с сенсорами 1, 2 и 3 соответственно; фотографии: 14 – сенсор 1 с электронным блоком 4; 15 – выброс из форсунок в атмосферу затопленных струй СПГ с образованием холодного углеродно-воздушного облака 16 и 17 высотой менее 10 м и шириной до 40 м, стекающего над землей; фотография 16 выполнена с беспилотного летательного аппарата, а 17 – с помощью горизонтальной видеокамеры.

Электронный блок 4, содержащий усилители сигналов, платы питания и внешней коммутации, микроконтроллер, управляющий микропроцессор и интерфейс RS-485 с формирователем цифровых сигналов (на рис. 1 не показаны), предназначен для считывания данных с сенсоров 1–3, управления цилиндрической электропечью 9, побудителем расхода 8 газовой смеси и термопарами для анализа ее внутренней 10 и внешней 11 температуры. Электропечь 9 содержит пористый медный наполнитель 5 для эффективного нагревания газов. С целью их направления в сенсоры установлена разделительная диэлектрическая пластина 12. На входе в газоанализатор расположен фильтр 13 с металлической сеткой, изготовленный из стойкого к перепадам температуры волокнистого материала класса *H10* для защиты сенсоров от дисперсной фазы [8, 10]. В результате аэрозольные частицы с массовой концентрацией до 100 г/м^3 не влияют на их характеристики. Источник питания электропечи 9 соединен обрат-

ной связью с анализатором показаний термопар и управляется микропроцессором для регулировки ее мощности и оптимального нагревания газовой смеси до 270–310 К, когда ее температура снаружи газоанализатора опускается ниже 260 К согласно данным термопары 11. Вентилятор 7 предназначен для перемешивания и создания однородной по составу анализируемой газовой смеси. В сенсоры газ поступает за счет создания потока конвективной диффузии газовым насосом 8 с расходом $Q \leq 2.5 \times 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$. Это обеспечивает его доставку к сенсорам за 0.2–0.3 с и величину $\tau < 1 \text{ с}$, поскольку данные по оптоволоконной линии передаются на удаленный сервер сбора информации с интервалом 1–10 мс.

Сенсоры 1 и 3 настроены на целевой газ метан, а 2 – на пропан с различной чувствительностью к другим алканам. В каждом из них газовая смесь детектируется путем избирательного поглощения молекулами излучения заданной длины волны. При этом интенсивность монохроматическо-

го излучения, прошедшего через многокомпонентную ТВС, $I = I_0 \exp\left(-L \sum_i \Delta_i C_i\right)$, где I_0 и I — соответственно интенсивности излучения до и после ТВС, Вт/м²; Δ_i — спектральный коэффициент поглощения излучения i -компонентой ТВС (м²/моль) с ослаблением излучения I_i ; C_i — концентрация i -компоненты в ТВС (моль/м³); L — ее оптическая длина, м [4–9]. 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.

Калибровка ИК-газоанализаторов проводилась на газовом стенде путем создания заданного состава объемной концентрации алканов и СПГ с фильтрованным воздухом с их однородным перемешиванием в винтофрированных трубах [6].

Лабораторные ТВС на основе легких алканов и СПГ моделировались на газовом стенде при $T \geq 150$ К [6, 8, 9]. Объемная концентрация метана, этана, пропана и бутана составляла $C \geq 99.95$ об. %. Концентрация метана в стандартном СПГ варьировалась от 93 до 99 об. %, а широкой фракции углеводородов (ШФЛУ: этан, пропан, бутан и другие алканы) от 1 до 7 об. %. Величина C определялась из соотношения измеренных значений их объемных расходов и воздуха с периодическим хроматографическим анализом.

В полевых условиях крупномасштабные выбросы создавались распылением СПГ в виде струй и в процессе его разлива из наземных криогенных емкостей на стандартный бетон и воду с образованием холодных углеродно-воздушных облаков [6].

Струйные выбросы СПГ массой до 10⁴ кг и длиной до 60 м создавались распылением из форсунок при числах Рейнольдса $Re = Udp/\eta < 10^5$ с их аэродинамическим дроблением при числах Вебера $We = \rho(U - U_0)^2 d/\sigma < 10^4$ и парообразованием кипящих капель с формированием облаков ТВС объемом до 10⁶ м³ за время менее 30–40 с (рис. 1) [2–6, 10]. Здесь ρ — плотность воздуха, кг/м³; η — его динамическая вязкость, Па·с; U_0 — скорость воздушного потока, м/с; $\sigma = 15.5 \times 10^{-3}$ н/м — коэффициент поверхностного натяжения СПГ при $T = 110$ К; $d \approx (0.0001–0.04)$ м — диаметр капель и фрагментов СПГ; $U \leq 60$ м/с — их скорость.

Эксперименты проводились при начальной температуре атмосферы $T \approx 280–290$ К с относительной влажностью 30–40% и скорости ветра менее 8 м/с. Сеть ИК-газоанализаторов была установлена на мачтах на высоте от 1 до 20 м. При выбросах СПГ вследствие резкого понижения температуры наблюдались конденсации паров и

образование тумана воды [10], что позволяло наблюдать перемещения холодных стелящихся облаков ТВС над местностью (рис. 1, фотографии 15–17).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Трехканальный ИК-газоанализатор был устойчив к воздействию магнитного поля с напряженностью и частотой до 200 А/м и 500 Гц и выдерживал избыточное давление во фронте ударной волны $\sim 10^5$ Па со скоростью воздуха до 300 м/с при $T \geq 150$ К.

Основной компонент СПГ — метан с примесью этана, пропана и бутана, составляющих основную объемную концентрацию в ШФЛУ [9]. Объемные значения их нижнего и верхнего концентрационных пределов распространения пламени (НКПР/ВКПР) составляют соответственно $C \approx (4.4/17.0, \text{ метан}); (2.5/15.5, \text{ этан}); (1.7/10.9, \text{ пропан})$ и $(1.4/9.3, \text{ бутан})$ в об. % [1–3].

На рис. 2 приведены данные калибровки ИК-газоанализаторов для легких алканов и различных типов газифицированного стандартного СПГ с концентрацией ШФЛУ от 1 до 7 об. %. Из ее анализа следует, что первый сенсор позволяет детектировать метан в диапазоне от 0.5 до 100 об. % и значения его НКПР/ВКПР, а также величины НКПР для этана, пропана и бутана [1–3]. Сенсор 3 используется для анализа метана и СПГ, а также этана с концентрацией $C < 10$ об. % [1]. Его показания S в об. % при детектировании паров ШФЛУ меньше по сравнению с показаниями сенсора 1. При этом для метана значения S сенсоров 1 и 3 (кривые 1М и 3М) совпадают и отношение $S/C = 1$. Сенсор 2 характеризуется несущественной (кривая 2М, для нее $S, \text{ об. \%} = 0.027C + 0.42$) чувствительностью к метану при $C = 4–60$ об. % по сравнению с сенсорами 1 и 3 и применяется для детектирования НКПР алканов, а также для анализа возможных флуктуаций концентрации паров ШФЛУ при выбросах СПГ в атмосферу. Отметим, что анализ расчетов показаний сенсора 2 как сумма его отдельных показаний при регистрации метана, этана, пропана и бутана с известной концентрацией $C \leq 2.5 \pm 0.1$ об. % показал, что такая аппроксимация удовлетворительно описывает экспериментальные результаты. Однако, данный аддитивный подход к расчетам показаний S сенсоров 1 и 3 при анализе смеси алканов и паров СПГ оказался не применимым.

Известно, что содержание метана и других горючих компонент СПГ не нормируется [9], поэтому для мониторинга его выбросов в атмосферу необходимо осуществлять калибровку ИК-газоанализаторов. Однако, необходимо отметить, что использование стендовой калибровки ИК-газоанализаторов справедливо для однородно пере-

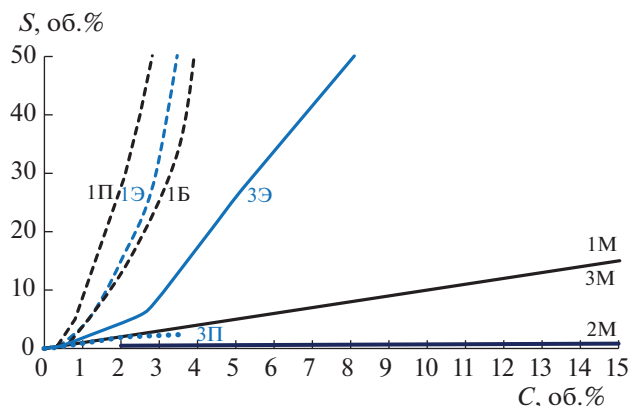


Рис. 2. Показания S сенсоров 1, 2 и 3 от величины объемной концентрации C метана, этана, пропана и бутана в смеси с воздухом: кривые 1М, 1Э, 1П и 1Б – метан, этан, пропан и бутан соответственно для сенсора 1; прямая 2М – метан для сенсора 2, ее уравнение $S, \text{ об. \%} = 0.027C + 0.42$ при $C = 2\text{--}60 \text{ об. \%}$; кривые 3М, 3Э и 3П – метан, этан и пропан соответственно для сенсора 3; прямые 1М и 3М совпадают и для них отношение $S/C = 1$ при $C = 0.5\text{--}100 \text{ об. \%}$.

мешенных компонент СПГ в атмосфере. Возможное возникновение локальных флуктуаций концентрации паров ШФЛУ, например, при мгновенном испарении СПГ или в результате импульсного разлива не полностью смешанного СПГ разной плотности в резервуарах хранения [9, 12, 14] контролируется сенсорами 1–3. При этом одновременные значительные отличия ($>25\%$) их показаний позволяют сделать вывод о локальных флуктуациях концентрации паров ШФЛУ в процессе газификации выбросов СПГ в атмосферу. Их величина может быть оценена расчетным путем из данных калибровки сенсоров 1 и 3, а также сенсора 2, показания которого S можно рассчитывать как сумму его отдельных показаний при регистрации метана, этана, пропана и бутана.

На рис. 3 приведены зависимости измеренных значений C от времени t в процессе многоструйного выброса СПГ массой до 10^4 кг за время менее 25 с (кривая 1), а также его разлива массой 3×10^3 кг за 12–15 с на бетон (кривые 2 и 3) с крупномасштабным парообразованием в течении 120–140 с.

При импульсном разливе СПГ толщина растекающейся криогенной жидкости по поверхности бассейна – переменная величина. При контакте грунт “раскален” по отношению к жидкости. При этом ее кипение происходит в пленочном, переходном и пузырьковом режиме. Ее первоначальное кипение в пленочном режиме (эффект Лейденфроста) на малом расстоянии от границы жидкость–пар является нестационарным. Неустойчивость межфазной границы приводит к интенсификации теплообмена за счет развития конвективных течений, перемешивающих жид-

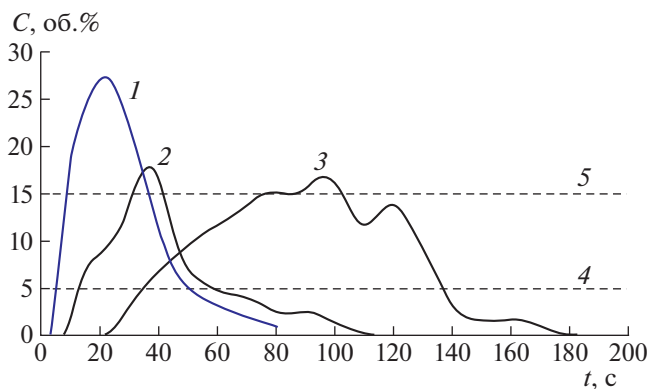


Рис. 3. Зависимости измеренных значений C от времени t в процессе выброса в атмосферу СПГ с концентрацией ШФЛУ $\sim 7 \text{ об. \%}$ в виде струй массой $\sim 10^4$ кг (кривая 1, ИК-газоанализатор на высоте 3 м в центре облака) и разлива до 3×10^3 кг на стандартный бетон (кривые 2 и 3 – ИК-газоанализаторы на высоте 1 м и соответственно на расстоянии 15 и 40 м от центра бассейна); прямые 4 и 5 – нижний и верхний концентрационные пределы распространения пламени для СПГ с величиной $C = 5$ и 15 об. %; состав ШФЛУ СПГ: 4.8 этан, 1.5 пропан, 0.5 бутан и 0.2 об. % другие примеси.

кость, и к образованию динамического двухфазного слоя. В процессе импульсного разлива криогенной жидкости наблюдалось в полевых и лабораторных условиях ее диспергирование с образованием стохастических выбросов полидисперсных капель в широком диапазоне размеров, струй и жидких фрагментов. Турбулентные ветровые потоки и нестационарная конвекция атмосферы также влияли на кинетику газификации и распределение концентрации паров СПГ в облаке ТВС при контакте с грунтом и атмосферой. Это приводило к нестационарному временному процессу испарения и выброса паров углеводородов в атмосферу с их последующим рассеиванием. В результате при разливе СПГ и его газификации наблюдался существенный градиент концентрации смеси углеводородов по высоте и длине облака ТВС. На высоте $\sim 9\text{--}10$ м пары углеводородов практически не фиксировались. Зафиксированное нарушение монотонного снижения значений C около поверхности земли на высоте 1 м при $t = 110\text{--}120$ с (кривая 3) обусловлено флуктуациями концентрации паров СПГ в нестационарном и рассеивающемся облаке ТВС, стелющемся вдоль поверхности земли в направлении атмосферного ветра.

Показано, что при импульсных выбросах СПГ в атмосферу в облаках ТВС образуются флуктуирующие по объему и во времени локальные области смесей воздуха и углеводородов взрывопожароопасного состава. Скорость их становления и распада зависела от условий распыления и разли-

ва СПГ, типа грунта, скорости ветра и температуры воздуха.

Получены данные о кинетике изменения их температуры от 280 до 150 К и концентрации от 0.5 до 30 об. % с передачей данных по оптоволоконной линии с интервалом 1–10 мс на удаленный до 4000 м сервер сбора информации. При этом установлено, что образуются локальные и достаточно однородные смеси метана и паров ШФЛУ в соответствии с их составом в СПГ с учетом разбавления воздухом. Развития областей ТВС с существенными импульсными выбросами концентрации паров ШФЛУ, флуктуирующей до значений их НКПР, не наблюдалось. Это согласуется с данными о преимущественном испарении метана из капель СПГ [6] и парообразовании отпарного газа в емкостях его хранения и перевозки [12, 14], а также качественно коррелируют с результатами “Falcon” [2, 3] и “Burg” [14] по истечению СПГ в атмосферу и на воду.

На рис. 4 приведены рассчитанные значения времени t полного испарения криогенных капель метана диаметром $d = 0.1, 1, 3$ и 5 мм (кривые 1, 2, 3 и 4 соответственно) от температуры $T = 150–290$ К. При этом сплошные кривые – испарение капель в воздухе, а пунктирные – испарение капель в облаке чистого метана с давлением паров 10^5 Па. Величина t рассчитывалась на основе модели конвекционного обмена энергией между седиментирующей криогенной каплей и окружающей парогазовой средой при числах Рейнольдса $Re \approx 1–3000$, температуре кипения метана 111.66 К, его теплоемкости 2.16 кДж/(кг К), теплоте парообразования 510 кДж/кг и плотности 426 кг/м³ [6, 15]. Отметим, что использование классической теории диффузионного испарения Максвелла–Ленгмюра для капли метана, неподвижной относительно парогазовой среды, некорректно, так как их температуры существенно различаются, а сами капли седиментируют [10].

Необходимо отметить, что рассчитанные значения времени испарения капель метана в воздухе и в парах 100 об. % метана отличались менее, чем на 30%. Соответственно, при образовании парогазового облака из смеси СПГ и воздуха в атмосфере время испарения капель метана по мере увеличения концентрации его пара несущественно изменялось в ходе проведенных экспериментов по созданию облаков ТВС на основе паров СПГ (рис. 3). В результате капли диаметром менее 5 мм практически полностью испарялись в проведенных экспериментах по распылению и разливу СПГ (рис. 3). Более крупные капли распадалась на фрагменты за счет аэродинамического дробления при числах $We > 10$, и далее испарялись. При этом их небольшая часть выпадала в осадок при понижении температуры паровоздушной смеси до 150–200 К и испарялась при

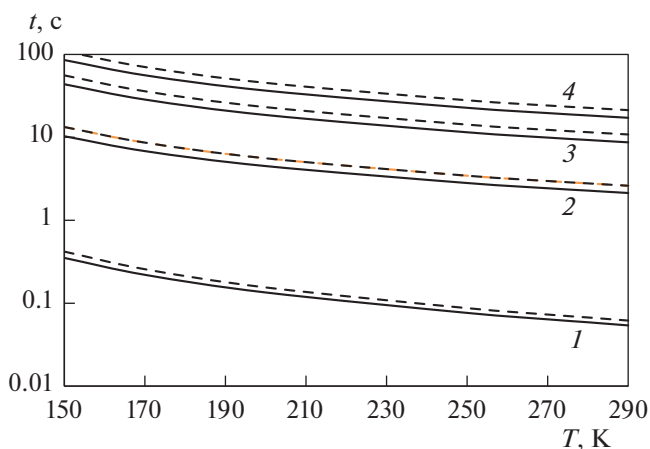


Рис. 4. Рассчитанные значения времени t полного испарения криогенных капель метана диаметром $d = 0.1, 1, 3$ и 5 мм (кривые 1, 2, 3 и 4 соответственно) от температуры парогазового облака $T = 150–290$ К: сплошные кривые – испарение в воздухе, пунктирные – испарение в облаке паров чистого метана с давлением 10^5 Па.

контакте с относительно теплой поверхностью грунта [4, 6]. Укажем также, что при измерении времени частичного испарения t_0 аэрозольного потока умеренно монодисперсных капель метана с $d \approx 1.5 \pm 0.5$ мм было показано, что время уменьшения их диаметра в 2 раза составляло $\sim 2–2.5$ с при температуре окружающего воздуха 293 К. Это значение удовлетворительно согласуется с расчетным $t_0 \approx 1.9$ и 4 с для криогенных капель метана с первоначальным диаметром 1 и 2 мм соответственно при $T = 293$ К [6, 15]. Экспериментальная методика анализа капель метана описана в [6].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан трехканальный низкотемпературный ИК-газоанализатор облаков ТВС с временным откликом < 1 с при $T \geq 150$ К. Их сеть испытана в процессе моделирования аварийных крупномасштабных выбросов СПГ в атмосферу для детектирования смесей углеводородов и воздуха. Показано, что при импульсных выбросах СПГ в атмосферу в виде затопленных струй и разливов на грунт в облаках ТВС возникают флуктуирующие по объему и во времени локальные области смесей воздуха и углеводородов взрывопожароопасного состава. При этом образуются локальные и достаточно однородные смеси метана и паров ШФЛУ в соответствии с их составом в СПГ с учетом разбавления воздухом. Длительность их существования зависела от объема и условий выбросов СПГ, а также от состояния атмосферы и грунта.

Созданные ИК-газоанализаторы могут использоваться для детектирования флуктуаций

концентрации паров ШФЛУ до величин их НКПР при выбросах СПГ, в технологиях создания локальных газокапельных потоков алканов в крупномасштабных метановоздушных смесях и анализа этана, пропана и бутана при исследовании их взрывопожароопасных свойств, а также для решения экологических задач и мониторинга атмосферы в системах промышленной безопасности объектов топливно-энергетического комплекса.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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” согласно приказу № 2748 от 28.10.2021.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Coronado C.J.R., Carvalho J.A., Andrade J.C. et al.* // J. Hazardous Materials. 2012. № 241–242. P. 32–54. <https://doi.org/org/10.1016/j.hazmat.2012.09.035>
2. ГОСТ Р 52136-2003 (МЭК 61779-1-98). Газоанализаторы и сигнализаторы горючих газов и паров электрические.
3. *Brown T.C., Cederwall R.T., Chan S.T. et al.* Falcon Series Data Report. 1987 LNG Vapor Barrier Verification Field // Lawrence Livermore National Lab. 1990. P. 665.
4. *Горев В.А., Овсянников Д.Л.* // Пожаровзрывобезопасность. Процессы горения, детонации и взрыва. 2019. Т. 28. № 1. С. 14. <https://doi.org/10.18322/PVB.28.01.C.14–21>
5. Малогабаритный измерительный датчик взрывоопасных газов. Руководство по эксплуатации ES-AT.413347.002 РЭ. Версия 19.04.2017. ООО Опто-сенс. СПб. 50 с.
6. *Загнитько А.В., Зарецкий Н.П., Мацуков И.Д. и др.* // Газовая промышленность. 2021. № 5. С. 82.
7. *Загнитько А.В., Зарецкий Н.П., Каникевич А.В. и др.* // Приборы и техника эксперимента. 2019. № 5. С. 153–155.
8. *Загнитько А.В., Сальников С.Е.* Низкотемпературный инфракрасный анализатор выбросов паров сжиженного природного газа в атмосфере // Патент РФ № 203905. Бюл. № 12 от 26.04.2021.
9. ГОСТ Р 57431-2017. Газ природный сжиженный. Общие характеристики.
10. *Райст П.* Аэрозоли, введение в теорию. М.: Мир, 2020. С. 1987.
11. *Загнитько А.В., Зарецкий Н.П., Мацуков И.Д.* // Журн. физ. химии. 2020. Т. 94. № 9. С. 1328.
12. *Середенко Е.С., Пахомов О.В., Баранов А.Ю.* // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20. № 4. С. 603. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2020-4-603-610>
13. Газоанализаторы серии Сенсис. Москва. ООО Дельта-С. 2008.
14. *Сафонов В.С.* Анализ особенностей растекания и испарения СПГ на водной поверхности при аварийных нарушениях герметичности грузовых емкостей танкеров. Научно-технический сборник. Вести газовой науки. Повышение надежности и безопасности объектов газовой промышленности. М.: Газпром ВНИИГАЗ. 2018. № 2 (34). С. 177–190.
15. *Ruan Y., Chen L., Liu X. et al.* // IOP Publishing Conference Series: Materials Science Engineering. 2017. № 278. 8 p. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/278/1/012130>