

Оптический анализ взрывоопасных и масштабных газочапельных выбросов топлив в атмосферу оптронами с инфракрасными газоанализаторами

А. В. Загнитко, Н. П. Зарецкий, С. Е. Сальников, Д. Ю. Федин,
И. Д. Мацуков и В. И. Алексеев

Национальный исследовательский центр “Курчатовский Институт”, пл. Академика
Курчатова, д. 1, Москва 123182, Россия

E-mail: zagnitko_av@nrcki.ru

Статья поступила в редакцию 20 июля 2023 г.

Аннотация. Экспериментально исследованы техногенные истечения газообразных углеводородов и жидких топлив в атмосферу с образованием масштабных и оптически плотных топливно-воздушных смесей объемом до 10^6 м³. Разработана методика и аппаратура их оптического анализа путем одновременного измерения ослабления инфракрасного и видимого излучения каплями диаметром $d \approx 0.3$ –5000 мкм. Созданы быстродействующие оптические инфракрасные газоанализаторы для мониторинга паров углеводородов при температуре от 150 до 330 К. Установлено, что при масштабных выбросах газообразных углеводородов и жидких топлив образуются локальные и флуктуирующие по объему и во времени взрывопожароопасные газочапельные облака. Полученные результаты могут быть использованы в системах контроля промышленной безопасности при экспресс-мониторинге техногенных газочапельных истечений топлив и для разработки генераторов масштабных аэрозольных барьеров на пути их распространения в атмосфере.
<https://doi.org/10.33849/2023105>

1. ВВЕДЕНИЕ

При обеспечении промышленной безопасности объектов получения и хранения природного газа и топливных жидкостей (сжиженный природный газ (СПГ), керосин, бензин, мазут, дизельное топливо (ДТ), ракетное топливо и т.п.) необходима оценка последствий их возможных техногенных выбросов в атмосферу в виде струй и/или разливов на грунт/воду, сопровождающихся образованием масштабных топливовоздушных смесей (ТВС) объемом до 10^7 м³ [1–4]. Эти смеси могут быть взрывопожароопасными [1, 3, 5], поэтому разработка экспресс-методов и аппаратуры диагностики техногенных и/или аварийных выбросов топлив имеет научное и практическое значение для систем контроля промышленной безопасности объектов топливно-энергетического комплекса (ТЭК).

При взрывном выбросе топлив в атмосферу образование квазистационарных облаков ТВС из капель и паров последовательно происходит через три основных стадии: диспергирование кавитированной жидкости и формирование жидко-капельного потока в результате срабатывания высокоэнергетических материалов (ВЭМ), эволюция газочапельного потока и аэродинамическое взаимодействие капель с внешней средой при скоростях более нескольких сотен метров в секунду и формирование квазистационарного аэрозольного облака ТВС из капель и паров.

Данные по изучению кинетики становления и рассеивания углеводородных облаков при моделировании масштабных аварий на объектах ТЭК, связанных с несанкционированным выбросом топлив и СПГ в атмосферу, ограничены [1–4, 6–14]. Сложности исследования ТВС из капель и паров обусловлены существенным диапазоном изменения их массовой концентрации $M \approx 0.01$ –5 кг/м³, широким спектром распределения капель по размерам от (1–10) до (5–10) × 10³ мкм и относительно малым временем (< 10 с) развития двухфазных потоков затопленных струй с образованием квази-

стационарных облаков. При этом необходимо измерять быстроизменяющиеся и оптически плотные концентрации капель и паров в широком диапазоне их взрывопожароопасной объемной концентрации $C \approx 1$ –20 % об., в том числе при низкой температуре $T \geq 150$ К, в случае выброса в атмосферу СПГ или его разлива на грунт и воду. Кроме того, в связи взрывоопасностью требуется осуществлять дистанционный анализ ТВС с быстрой передачей оцифрованных данных на головной сервер сбора информации [1–4, 10–14]. Наконец, устройства для определения параметров выбросов должны иметь высокое быстродействие $\tau < 0.5$ с, функционировать при скорости газочапельных потоков до нескольких сотен метров в секунду, обладать устойчивостью к воздействию избыточного давления газов до 10^5 Па и электромагнитного излучения промышленной частоты.

Быстродействующие блоки дистанционного экспресс-анализа масштабных, взрывоопасных и оптически плотных облаков ТВС из капель и паров, отвечающие указанным требованиям, разработаны недостаточно и/или не выпускаются для практического использования [1–4, 6–14]. При этом, созданные газоанализаторы используются, как правило, для детектирования дозрывных концентраций ТВС с малым объемным расходом анализируемой смеси $Q < 1$ см³, относительно большим быстродействием и рабочей температурой более 233 К. В частности, промышленные полупроводниковые газоанализаторы [15, 16] на основе пленок диоксидов металлов, допированных палладием и оксидом меди, характеризуются величиной $\tau \leq 3$ с, вследствие относительно малой скорости диффузии анализируемых молекул через чувствительную тонкую пленку диоксида металла. В электрохимических газоанализаторах осуществляется селективная электрохимическая реакция анализируемых молекул с загущенным электролитом, значение $\tau = 15$ –30 с и они практически не используются для анализа алканов [17]. В оптических инфракрасных (ИК) газоанализаторах,

например, Сенсис-500 с зарубежным пироэлектрическим сенсором типа “MSH-P-CH4-5BPF Dupont GB” и поглощением молекулами углеводородов инфракрасного излучения с рабочей длиной волны $\lambda = 3.3$ мкм от лампы накаливания с вольфрамовой нитью, отбор анализируемых газов осуществляется за счет их молекулярной диффузии через защитный аэрозольный фильтр сенсора [18]. В результате $\tau \approx 20\text{--}25$ с при рабочей температуре более 255 К. ИК-газоанализаторы с отечественными сенсорами «Мирех» характеризуются значением $\tau \approx 10$ с за счет создания потока конвективной диффузии углеводородной смеси через отверстия в корпусе сенсора [19]. Их рабочая температура составляет более 233 и 260 К с погрешностью измерения 20 и 10% соответственно.

В рассмотренных ИК-газоанализаторах [18, 19] светодиоды с широкой диаграммой излучения и фотодиоды жестко связаны с корпусом газовой кюветы. 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 юстированными элементами, так как диаграмма распространения излучения источника может не совпадать с максимумом чувствительности диаграммы приема излучения фотоприемника [14]. При этом ИК-газоанализаторы на основе иммерсионных диодных оптопар позволяют измерять концентрацию углеводородов с быстродействием менее 0.1 с [14]. Однако, последние не позволяют детектировать парообразование выбросов метана и широкой фракции легких углеводородов (ШФЛУ: этан, пропан, бутан и другие легкие алканы) СПГ в атмосферу при $T > 150$ К, так как иммерсионные диодные оптопары не предназначены для работы при столь низкой температуре.

Согласно теории рассеяния излучения Ми и закону его ослабления Бугера оптическую плотность облака капель и паров $D(\lambda)$ можно рассчитывать как [7, 9, 13]:

$$D(\lambda) = D_P(\lambda) + D_A(\lambda) = \lg[(I_0/I_P(\lambda))] + \lg[(I_0/I_A(\lambda)), \quad (1)$$

где $D_P(\lambda) = L \sum_i \Delta_i(\lambda) C_i = \sum_i D_i(\lambda)$ — оптическая плотность смеси паров на толщине рассеивающего слоя L , м; $\Delta_i(\lambda)$ — спектральный коэффициент ослабления волны i -ой компонентой паров, м²/моль; C_i — ее концентрация, моль/м³; $D_i = \lg(I_0/I_i(\lambda))$ — оптическая плотность i -ой компоненты паров с ослаблением интенсивности излучения $I_i(\lambda)$ при длине волны λ ; $D_A(\lambda) = \lg[(I_0/I_A(\lambda))] = K_A(\lambda)L$ — оптическая плотность капель, $K_A(\lambda)$ — их объемный коэффициент ослабления излучения с длиной волны λ ; I_0 — интенсивность излучения без ТВС, а $I_P(\lambda)$ и $I_A(\lambda)$ — в присутствии паров и капель, соответственно.

Формула (1) справедлива при однократном рассеивании излучения каплями и для большого числа рассеивателей $NS_1L \gg 1$ с расстоянием между ними более $3d$, где d и N — диаметр и счетная концентрация капель; S_1 — площадь сечения оптического луча в зоне анализа [7, 9, 13]. Укажем, что в данной работе эти условия выполнялись.

В случае полидисперсного аэрозоля с дифференциальным распределением по размерам $f(d)$ в приближении, что вклад от каждой из групп капель в коэффициент $K_A(\lambda)$ аддитивен, его значение вычисляется как $K_A(\lambda) = N(\frac{\pi}{4}) \int_d d^2 f(d) \beta(m) d(d)$, где $\beta(m)$ — коэффициент ослабления излучения каплей от параметра Ми $m = \pi d/\lambda$ [7, 9, 13].

Использование закона Бугера предполагает, что вся рассеянная каплями энергия изымается из пучка излучения, а величина $K_A(\lambda)$ определяется интегрированием рассеянной в различных направлениях энергии, включая и направление вперед. При $m \geq 10$ коэффициент $K_A(\lambda) = F(Z, m) \times (S/4)$, где $Z = md_1/2L$, d_1 — диаметр приемного объектива; $F(Z, m)$ — корректирующая функция, учитывающая индикатрису рассеивания излучения каплями и конечные размеры оптического канала их анализа, $S = \pi \langle d^2 \rangle N$ — удельная поверхностная концентрация капель; $\langle d^2 \rangle^{0.5}$ — их среднеквадратичный диаметр [2, 13]. Значения $F(Z, m)$ стремятся к пределу $\alpha = 1; 1.5$ и 2 при $Z \gg 1, \rightarrow 1$ и $\rightarrow 0$, соответственно. При этом $D_A(\lambda) = \alpha \pi \langle d^2 \rangle NL/9.2 = \alpha SL/9.2$ и коэффициент $K_A(\lambda) = \alpha S/4$ [7, 9, 13].

В случае распространенного логнормального распределения капель по размерам $\langle d^2 \rangle = \langle d \rangle^2 \exp(\ln^2 \sigma)$, где $\langle d \rangle$ — их средний арифметический диаметр и σ — стандартное геометрическое отклонение размеров [8, 9].

Целью данной работы являлось экспериментальное исследование импульсных газокapelных истечений жидких топлив и СПГ в атмосферу массой от 10^3 до 10^5 кг с образованием масштабных и воспламеняемых облаков ТВС объемом до 10^6 м³ и концентрацией капель и паров $M \approx 0.001\text{--}4.0$ кг/м³, а также разработка методики и создание сети аэрозольных оптронов с $\tau \leq 0.01$ с и оптических инфракрасных газоанализаторов с $\tau < 0.5$ с на основе диодных оптопар и сенсоров для экспресс-анализа оптически плотных ТВС с величиной $D \approx 0.01\text{--}3.5$ и передачей оцифрованных данных через интерфейс RS-485 на удаленный до 5 000 м сервер сбора информации. Методика анализа τ описана в [6, 14].

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Локальные газокapelные выбросы создавались на стенде с помощью импульсных генераторов с источником сжатых до 8 МПа газов. Затопленные струи длиной до 10 м и начальной скоростью более 50 м/с формировались при импульсном барботаже газов через жидкость со скоростью до 250–300 м/с при числах Рейнольдса $Re = U_1 d \rho / \eta < 10^4$ с аэродинамическим дроблением струй при числах Вебера $We = \rho(U_1 - U)^2 d / \delta < 10^3$ [7–10]. Здесь ρ — плотность воздуха; η — его динамическая вязкость; U — скорость воздуха; δ — коэффициент поверхностного натяжения жидкости; U_1 — скорость капель.

В полигонных условиях масштабные истечения ТВС длиной и объемом более 100 м и 10^6 м³ соответственно развивались в процессе импульсного распыления топлив в атмосферу с использованием ВЭМ, а также энергии сжатых газов из баллонов при числах $Re < 10^6$ и $We < 10^5$ (см. рисунки 1 и 2). Эксперименты проводились при начальной температуре воздуха $T \approx 270\text{--}320$ К с относительной влажностью менее 40 % и скорости ветра менее 10 м/с.



(a)



(b)

Рисунок 1. (a) — Фотография облака ТВС из капель и паров керосина ТС-1 высотой и объемом более 90 м и 10^5 м^3 и (b) — авторская фотография пневматического выброса СПГ в атмосферу из 18-ти сопел, расположенных по кругу диаметром 90 м, в виде затопленных струй с начальной скоростью до 60 м/с и образования в течение 30 с облака диаметром до 100 м и объемом около $5 \times 10^5 \text{ м}^3$ из смеси метана, паров ШФЛУ, аэрозолей СПГ и воды.

На рисунке 1 приведены фотографии: (a) — фотография облака ТВС керосина ТС-1 высотой и объемом более 90 м и 10^5 м^3 через 2.5 с после инициирования ВЭМ с диапазоном воспламеняемости 0.7–5 % об.; (b) — выброса в течении 30 с затопленных струй СПГ в атмосферу из набора 18-ти сопел, расположенных по кругу диаметром 90 м, с образованием облака объемом до $5 \times 10^5 \text{ м}^3$ из смеси воздуха, метана, регазифицированных паров широкой фракции легких углеводородов (ШФЛУ: этан, пропан, бутан и др.), аэрозолей СПГ и воды. В процессе выброса СПГ наблюдалось охлаждение ТВС в центре облака до температуры 150–160 К с конденсацией паров воды и образованием капель и частиц льда в виде белого тумана. Их концентрация в облаке составляла менее 3 г/м^3 , что существенно меньше концентрации распыленного СПГ.

Размер и концентрация аэрозольных частиц определялись с помощью шестикаскадного импактора и микроскопа, ультрамикроскопическим методом в кювете, а также весовым способом с высокоскоростным

отбором частиц на стекловолокнистые НЕРА-фильтры (High Efficiency Particulate Air — высокоэффективное удержание частиц) [6, 8, 13, 14, 20].

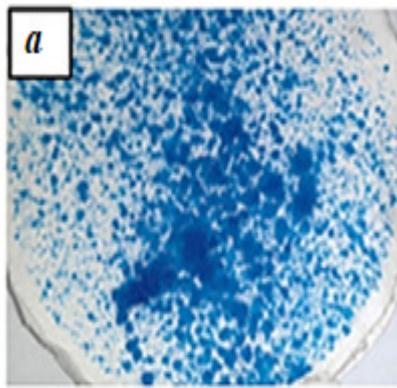
Объемный заряд капель измерялся путем их отбора на электропроводящий фильтр, соединенный с электрометром [20]. Обработка изображений отпечатков капель, отобранных на поверхность фильтров (см. рисунок 2) для определения распределения по размерам с учетом их коэффициента растекания, производилась с использованием программного комплекса ImageJ [21]. Кроме того, осуществлялась униполярная зарядка капель газовыми ионами коронного разряда с последующим измерением тока переноса заряженных частиц при их осаждении на волокна электропроводящего фильтра, соединенного с электрометрическим усилителем [20]. Скорость выбросов ТВС от 10 до 300 м/с анализировалась двухканальными оптронами с $\lambda = 0.65 \text{ мкм}$ [6, 8, 13, 14].

На рисунке 3 приведена принципиальная схема запатентованного [22] базового варианта газоанализатора I с рабочей температурой ТВС до 150 К, включающего цилиндрический металлический корпус 11, в котором размещены соосно и последовательно электропечь 9 с медным наполнителем и защитной сеткой 10, входной волокнистый фильтр тонкой очистки газа 7, вентилятор 6 для аспирации газа, сенсор 2 и выходной волокнистый газовый фильтр 8. На верхней части корпуса 11 установлен электронный блок 1, в функции которого входит сбор данных сенсора, питание сенсора и вентилятора, управление нагревом электропечи, а также связь через разъем 4 с сетью других ИК-газоанализаторов и системой обработки с передачей данных на удаленный сервер. К блоку 1 также подключены внешняя термопара 3 для контроля температуры атмосферы снаружи газоанализатора и внутренняя термопара 5 с быстродействием до 0.15 с, установленная перед сенсором 2 для измерения температуры ТВС перед ее анализом.

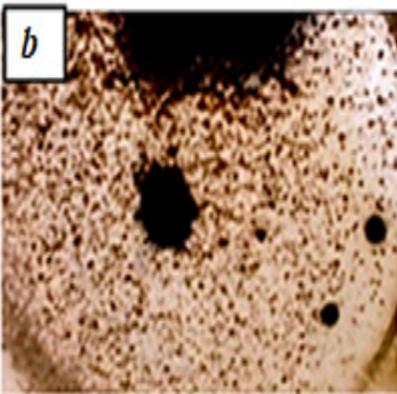
Регистрация углеводородов производится с использованием инфракрасного сенсора 2 из семейства Mirax с длиной волны светодиодов $\lambda = 3.27; 3.31$ или 3.4 мкм [6, 19]. Рабочий диапазон их температуры варьируется от 233 до 330 К с $\tau < 0.5 \text{ с}$. В его чувствительную зону анализируемый газ с расходом $Q \leq 30 \text{ см}^3/\text{с}$ поступает через сквозные окна с помощью вентилятора 6 через аэрозольный фильтр 7 для защиты сенсора от дисперсных примесей. При этом аэрозольный поток с массовой концентрацией до 100 г/м^3 не влияет на характеристики ИК-газоанализатора. Предварительное нагревание анализируемых газов осуществляется в электропечи 9, когда температура снаружи газоанализатора опускается ниже 260 К согласно показаниям термопары 3.

С целью увеличения расхода анализируемой смеси до $Q \approx (1.5\text{--}2) \times 10^4 \text{ см}^3/\text{с}$ был создан ИК-газоанализатор с сенсором Mirax, рабочей температурой $T = 255\text{--}330 \text{ К}$ и быстродействием $\tau < 0.5 \text{ с}$ (см. рисунок 4). В устройство анализируемая проба поступает через газораспределительную решетку 1 с защитным аэрозольным НЕРА-фильтром с помощью газовой турбиной 4. Электронный блок 6 предназначен для питания устройства напряжением 24 В, обработки и передачи оцифрованных данных через разъем 7 в удаленный сервер (на рисунке 4 не показан).

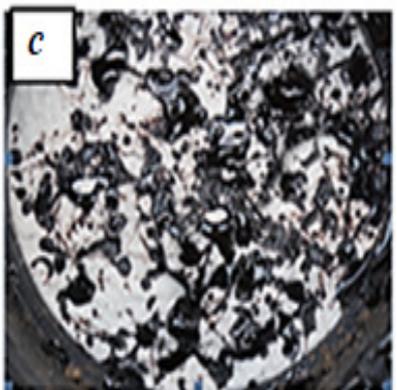
На рисунке 5 приведена схема запатентованного ИК-газоанализатора [23] на основе иммерсионных



(a)



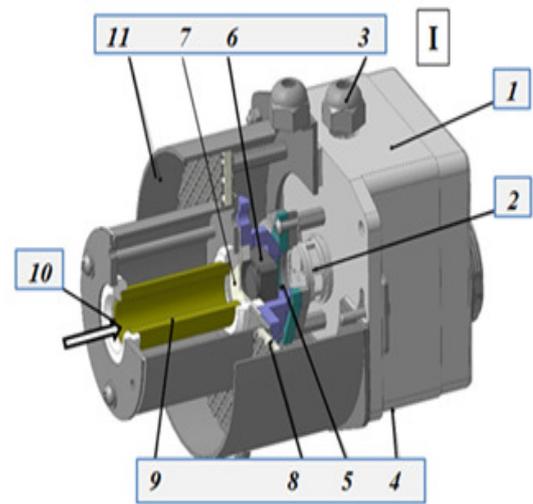
(b)



(c)

Рисунок 2. Фотографии (a), (b) и (c) поверхности стекловолоконных фильтров с отпечатками следов отобранных капель керосина (подкрашен метиленовой синью), мазута и нефти соответственно.

диодных оптопар [14] для измерения концентрации углеводородов с быстродействием $\tau < 0.5$ с при $T > 150$ К. Устройство включает побудитель 8 расхода Q ТВС через измерительную газовую кювету 1, отражающие поверхности которой образуют оптическую схему для формирования пучка инфракрасного излучения, его источник в виде иммерсионного светодиода 9 и его фотоприемник в виде иммерсионного фотодиода 10 [14], связанные гибкой механической связью с корпусом 2 газовой кюветы элементами юстировки 11 и 12; 14 — система термостабилизации иммерсионных светодиода и фотодиода; внешний электронный блок для пита-



(a)

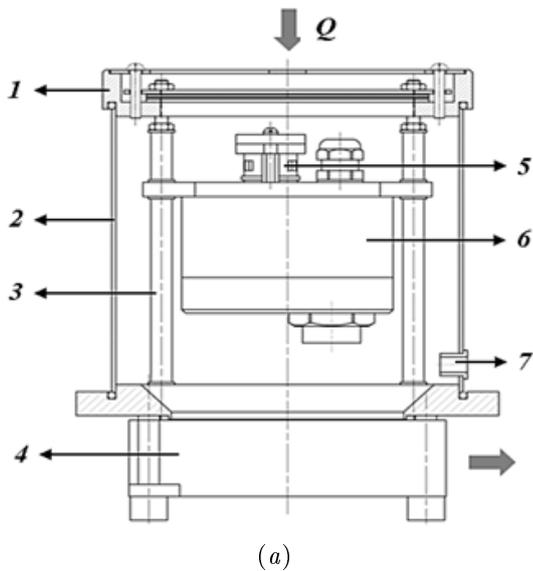


(b)

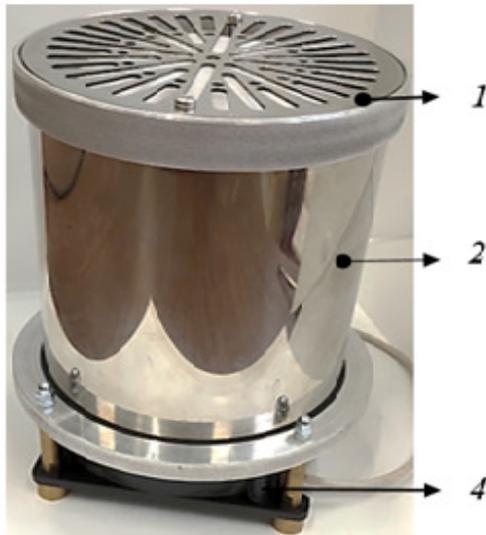
Рисунок 3. Схема (a) и фотография (b) ИК-газоанализатора I: 1 — электронный блок, 2 — сенсор, 3 — внешняя термопара, 4 — разъем, 5 — внутренняя термопара, 6 — вентилятор, 7 — входной аэрозольный фильтр, 8 — выходной аэрозольный фильтр, 9 — электропечь, 10 — защитная сетка, 11 — корпус.

ния, управления, стабилизации температуры и передачи оцифрованных сигналов на удаленный сервер их анализа (на рисунке 5 отсутствует). Корпус газовой кюветы 1 выполнен с внешним теплоизолирующим покрытием 3 пеноплекса и механически 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%.

Светодиод 9 и фотодиод 10 настроены с помощью элементов юстировки 11 и 12 на максимальную величину,



(a)



(b)

Рисунок 4. Принципиальная схема (a) и фотография (b) ИК-газоанализатора с расходом $Q \approx 1.5 \times 10^4 \text{ см}^3/\text{с}$: 1 — входная крышка с аэрозольным НЕРА-фильтром, 2 — цилиндрический корпус диаметром 10 см, 3 — четыре несущих шпильки, 4 — газовая турбина, 5 — сенсор Мірех, 6 — электронный блок, 7 — разъем для подключения внешних коммуникаций, $T = 255\text{--}330 \text{ К}$.

ну выходного сигнала фотодиода 10. Оба полупроводниковых прибора с рабочей длиной волны $\lambda \approx 3.2\text{--}3.6 \text{ мкм}$ оснащены системой термостабилизации 14 на основе элементов Пельтье для поддержания их температуры на заданном уровне от 285 до 300 К [20]. Оптическая длина L и объем газовой кюветы 1 составляют около 0.1 м и $2.8 \times 10^{-6} \text{ м}^3$. В процессе выброса СПГ имеет место понижение температуры облака ТВС и анализируемый поток перед подачей в газовую кювету 1 предварительно нагревается в электропечи 4 с аэрозольным медным фильтром 5. Оптимальный расход $Q \approx 300\text{--}500 \text{ см}^3/\text{с}$.

Калибровка ИК-газоанализаторов проводилась на газовом стенде с использованием смесей заданного со-

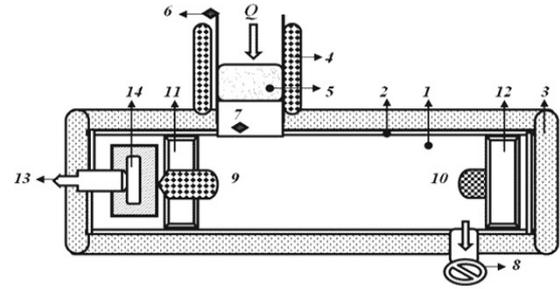


Рисунок 5. Принципиальная схема ИК-газоанализатора на основе иммерсионных диодных оптопар: 1 — измерительная газовая кювета с корпусом 2 и внешним 3 теплоизолирующим покрытием; 4 — цилиндрическая электропечь с аэрозольным металлическим фильтром 5 внутри; 6 и 7 — термомпары для измерения температуры воздушно-углеродных смесей снаружи и внутри ИК-газоанализатора, соответственно; 8 — побудитель расхода Q анализируемой углеродно-воздушной смеси; 9 и 10 — иммерсионные светодиод и фотодиод, соответственно; 11 и 12 — их юстировочные элементы; 13 — разъем соединения внешнего электронного блока (на рисунке отсутствует) для подключения цепей управления, питания и передачи данных; 14 — система термостабилизации иммерсионных светодиода и фотодиода.

става, которые создавались путем однородного перемешивания углеводородных паров с воздухом в винто-гофрированных трубах [14]. При этом использовались алканы (метан, этан, пропан, бутан) высокой чистоты ($\geq 99.95 \text{ \% об.}$). Концентрация метана в промышленном СПГ варьировалась от 93 до 99 % об., а содержание в нем ШФЛУ — от 1 до 7 % об. Величина чистоты определялась из соотношения объемных расходов горючего газа и воздуха с ее периодическим хроматографическим контролем.

Выбросы со скоростью до 400 м/с и облака топливных капель анализировались аэрозольным оптроном, включающим следующие основные элементы (см. рисунок 6): 1 — прямоугольный швеллер из дюрала, 2 — светодиод, 3 — прямоугольное окно для газочапельного потока в зону его оптического анализа, 4 — блок крепления оптрона на мачту, трос или подвеску к беспилотному летательному аппарату, 5 — фотодиод, 6 — электронный блок. Его основные характеристики: напряжение питания — 12 и 24 В, мощность излучения — 5 мВт с длиной волны $\lambda = 0.65, 3.3$ или 3.8 мкм , оптическая длина зоны анализа составляет $L = 0.1\text{--}0.27 \text{ м}$. Аэрозольный оптрон с быстродействием $\tau \leq 0.01 \text{ с}$ позволяет дистанционно измерять динамические значения оптической плотности от 0.01 до 3.5 и поверхностной концентрации капель $S = 1\text{--}300 \text{ м}^2$ в м^3 , а также величины их стандартных отклонений от средних значений с характерным временем флуктуаций около 0.01 с при объемной концентрации капель менее 0.1% об.

Запатентованные [23–26] модификации аэрозольных оптронов с количеством оптических каналов от 1 до 4 оснащены ИК-газоанализаторами на основе сенсоров Мірех или иммерсионных диодных оптопар, а также импакторами капель для их сепарации по размерам и пробоотборниками капель на аналитические НЕРА-фильтры (см. рисунок 2).

Конструкция оптических анализаторов капель и паров, система регистрации и передачи их показаний

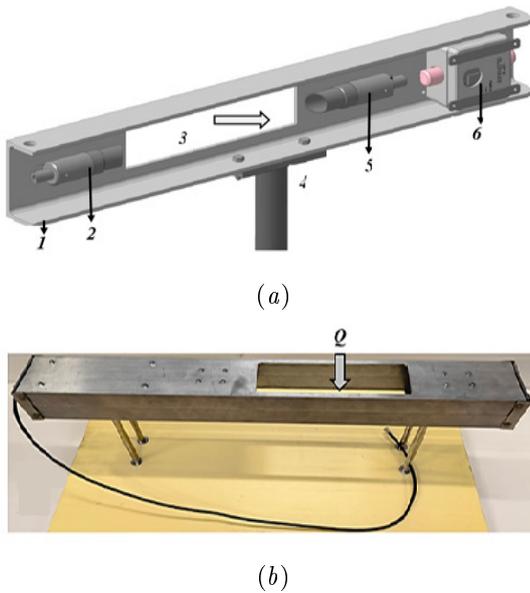


Рисунок 6. (а) — Принципиальная схема одноканального аэрозольного оптрона: 1 — прямоугольный швеллер из дюрала, 2 — светодиод, 3 — прямоугольное окно для газодождевого потока в зону его оптического анализа, 4 — блок крепления оптрона на мачту, трос или подвески к беспилотному летальному аппарату, 5 — фотодиод, 6 — электронный блок; (б) — фотография двухканального оптрона на теплоизолирующей подставке из пенополистирола.

предусматривает возможность опроса и обработки данных более 20 одновременно работающих устройств для мониторинга ТВС объемом от 10^3 до 10^6 м³. Информация от анализаторов непрерывно передается по оптоволоконной линии длиной до 5 000 м с сетевым интерфейсом 100 Мбит Ethernet на сервер. Местонахождение каждого анализатора фиксируется системой позиционирования ГЛОНАСС. Измерительные устройства устанавливаются стационарно на мачтах и/или тросах. Кроме того, разработан комплекс анализа капель и паров ТВС на платформе беспилотного летального аппарата (БПЛА), запатентован [27]. При этом, в случае выброса СПГ время анализа составляет менее 60 с, так как БПЛА не может длительно находиться в облаке с температурой $T < 250$ К.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ, ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 7 приведены измеренные распределения капель $f(d)$ (кривые I, II и III) отпечатков капель керосина ТС-1, мазута Ф5 и астраханской нефти, отобранных на поверхность фильтров из облаков ТВС с характерным временем их образования около двух-трех секунд (см. фотографии 1, 2 и 3 на рисунке 2). Обработка изображений отпечатков капель производилась с использованием комплекса ImageJ [21]. Из анализа данных рисунка 7 следует, что при взрывных выбросах топлив в атмосферу с образованием масштабных облаков ТВС с достаточной для практики точностью распределения капель по размерам можно аппроксимировать логарифмически нормальной функцией с величиной $\sigma \approx 2-2.8$ и количеством мелких капель, существенно большим, чем крупных [8, 9]. Определенные с $\tau < 0.03$ с значения удельной поверхностной кон-

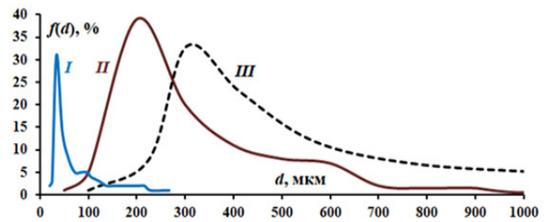


Рисунок 7. Измеренные дифференциальные распределения $f(d)$ капель керосина, мазута Ф5 и астраханской нефти по размерам при $T = 315$ К: кривая I — керосин, $\langle d \rangle = 93$ мкм, $d \approx 20-250$ мкм; II — мазут, $\langle d \rangle = 378$ мкм, $d \approx 50-2\ 000$ мкм; III — нефть, $\langle d \rangle = 610$ мкм, $d \approx 100-6\ 000$ мкм (см. рисунки 1 и 2).

центрации капель при взрывном выбросе топлив существенно изменялись со временем от (60–80) до (1–5) м² в расчете на м³. При этом их массовая концентрация $M = S\rho_1\langle d^3 \rangle / 6\langle d^2 \rangle$ уменьшалась за время менее одной секунды от (1–2) до (0.05–0.1) кг по мере становления объема облаков, где $\langle d^3 \rangle^{1/3}$ — средний массовый диаметр капель, ρ_1 — их плотность [8, 9]. Скорость газодождевых потоков флуктуировала во времени и составляла, например, на высоте 36 м около 250 м/с через ≈ 0.15 с и (10–15) м/с через ≈ 2.5 с после инициирования ВЭМ (см. фотографию (а) на рисунке 1). Заметного образования тонкодисперсных капель с $d < 10-15$ мкм практически не наблюдалось. Это согласуется с расчетами, согласно которым при скорости $U_1 < 150$ м/с их аэродинамическое дробление неэффективно, поскольку число Вебера меньше критического (< 10). Аналогичный результат был получен при анализе облаков ТВС дизельного топлива и бензина АИ-92.

Известно, что число Онезорге $Oh = \eta / (d\sigma\rho_1)^{0.5}$ позволяет оценивать влияние вязкости жидкости на эффективность ее аэродинамического дробления [8, 9]. Анализ данных на рисунках 2 и 7 показывает, что распыление нефти менее эффективно по сравнению с мазутом при одинаковых условиях, так как их числа Онезорге отличаются более чем в 150 раз. Укажем, что для нефти и мазута соответственно плотность $\rho_1 \approx 965$ и 995 кг/м³, поверхностное натяжение $\sigma \approx 0.06$ и 0.055 Н/м, вязкость $\eta \approx (5-7)$ и 0.036 Па·с при $T \approx 323$ К. Давление насыщенных паров нефти составляет менее 400 Па при 323 К.

Объемный биполярный заряд топливных капель был практически нейтральным, что обусловлено большим удельным электрическим сопротивлением ($> 10^{10}$ Ом·м) и относительно малой диэлектрической проницаемостью (≈ 2) топлив. Заряды капель были значительно меньше зарядов при их ударной и диффузионной зарядке униполярными ионами коронного разряда [8, 9, 20].

Установлено, что система масштабного распыления топлив с одним зарядом по оси симметрии жидкого объема оказалась недостаточно эффективной при создании масштабных облаков объемом от 10^4 до 10^7 м³ с заметной долей тонкодисперсных капель с $d < 15$ мкм для развития поверхности аэрозольной компоненты с $S > 300$ м² в расчете на м³, что согласуется с выводами теории масштабной импульсной фрагментации жидкостей [10].

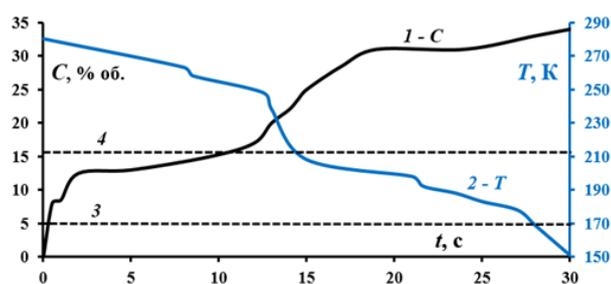


Рисунок 8. Экспериментальные зависимости концентрации углеводородов C и температуры T (кривые 1- C и 2- T соответственно) от времени t распыления СПГ в атмосферу; пунктирные прямые 3 и 4 — нижний и верхний концентрационные пределы взрываемости метана $C = 5$ и 16 % об. соответственно; состав СПГ: ≈ 94.4 метана, 3.96 этана, 1.24 пропана, 0.3 бутана и 0.1 % об. — другие органические и неорганические примеси (см. рисунок 1).

Необходимо отметить, что при выбросе СПГ в атмосферу (см. рисунки 1 и 8) скорость испарения и эффективность аэродинамического дробления криогенных капель, а также давление их насыщенных паров выше по сравнению с аналогичными параметрами капель керосина, мазута, ДТ, нефти, этилового спирта или гептила [6, 13, 14, 28]. Рассчитанное время испарения кипящих капель метана, этана и пропана согласно модели конвективного обмена энергией между криогенной каплей и окружающей парогазовой средой пропорционально квадрату их диаметра и при $d < 500$ мкм составляет менее 1 с как на воздухе, так и в облаке паров метана с давлением 10^5 Па при $T = 293$ К [13, 14, 28]. Процесс испарения является нестационарным и происходит в режиме кипения жидкости с постоянной температурой до ее полного испарения. Использование классической теории диффузионного испарения аэрозолей Максвелла-Ленгмюра не корректно, так как температуры парогазовой среды и кипящих капель существенно различаются [8, 9].

Необходимо отметить, что в облаках ТВС пары керосина, мазута, ДТ и бензина были ненасыщенными и неоднородно распределенными по объему, как и аэрозоль. При этом возникали масштабные и флуктуирующие во времени и по объему локальные зоны ТВС с содержанием паров, превышающим их нижний концентрационный предел воспламенения: $C \approx 0.7$ (керосин ТС-1); 1.4 (мазут Ф5); 2 (ДТ) и 1 % об. (бензин АИ-92).

Проведено сравнение измеренных значений оптической плотности легких алканов и регазифицированного, промышленного СПГ (ШФЛУ до 7 % об.) от величины их концентрации и длины волны излучения светодиодов $\lambda = 0.65$ – 3.8 мкм. Показано, что оптическая плотность регазифицированного СПГ может быть рассчитана по формуле (1) как сумма оптических плотностей газобразного метана и паров ШФЛУ.

Установлено, что при техногенных авариях, связанных с масштабными импульсными выбросами и/или проливами топлив и СПГ, внутри развивающегося облака образуются локальные и воспламеняемые ТВС объемом от 10^3 до 10^5 м³ (см. рисунок 8). Длительность их существования зависит от объема, условий и типа распыляемого топлива, а также от состояния атмосферы и грунта [1–4, 13].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы техногенные истечения топлив в атмосферу с образованием масштабных и оптически плотных облаков ТВС из капель и паров объемом до 10^6 м³. Разработана методика и аппаратура их оптического экспресс-анализа.

Система распыления топлив с зарядом по оси симметрии жидкого объема оказалась недостаточно эффективной при создании масштабных облаков с заметной долей тонкодисперсных капель для развития поверхности аэрозольной компоненты, что согласуется с выводами теории масштабной, импульсной фрагментации жидкостей.

Показана возможность интеграции разработанной быстродействующей сети аэрозольных оптронов и ИК-газоанализаторов с системами контроля промышленной безопасности объектов ТЭК, а также их использования для инженерных расчетов затопленных газонакапельных струй и анализа их эволюции.

Разработанные диагностические блоки были успешно использованы на практике при измерении распределений концентрации и температуры регазифицированного СПГ в газопроводах и масштабных облаках при температуре до 150 К, а также при мониторинге оптически плотных газонакапельных потоков топливных жидкостей. Их характеристики превосходят параметры российских и зарубежных аналогов.

5. БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена по Тематическому плану НИЦ «Курчатовский институт», подтема 11П.1.1. — «Разработка физико-технических основ методов измерения параметров аэрозольных и парогазовых облаков, возникающих при крупномасштабных авариях на объектах ТЭК, для создания экспериментальных образцов систем диагностики аэрозольных облаков» за 2023 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Люгай Д В и Сафонов В С 2018 *Научно-технический сборник. Вести газовой науки* **2(34)** 166–76
2. Сафонов В С 2018 *Научно-технический сборник. Вести газовой науки* **2(34)** 177–90
3. Кедринский В К 2000 *Газодинамика взрыва: эксперимент и модели.* (Новосибирск: СО РАН)
4. Горев В А и Овсянников Д Л 2019 *Пожаровзрывобезопасность. Процессы горения, детонации и взрыва.* **28** 14–21
5. РФ ГОСТ 1999 Данные по горючим газам и парам, относящиеся к эксплуатации электрооборудования. Часть 20. *ГОСТ РФ Р 51330.19-99*
6. Загнитько А В, Зарецкий Н П, Мацуков И Д, Сальников С Е, Пименов В В, Федин Д Ю и Алексеев В И 2023 *Журнал физической химии* **97** 183–8
7. Зуев В Е и Кабанов М В 1987 *Оптика атмосферного аэрозоля* (Ленинград: Гидрометеониздат)
8. Синайский Э Г, Лапица Е А и Зайцев Ю В 2002 *Сепарация многофазных многокомпонентных систем* (Москва: Недра)
9. Райст П 1987 *Аэрозоли, введение в теорию* (Москва: Мир)
10. Стебновский С В 2007 *Физика горения и взрыва* **2** 44 117–28
11. Chan S 1992 *J. of Hazardous Materials.* **30** 195–224

12. Brown T *et al* 1990 *Falcon Series Data Report. 1987 LNG Vapor Barrier Verification Field* (Livermore: Lawrence Livermore National Lab)
13. Загнитько А В, Зарецкий Н П, Меньшиков Л И и Меньшиков П Л 2022 *Оптика атмосферы и океана* **35** 944–7
14. Загнитько А В, Сальников С Е, Пименов В В, Федин Д Ю, Алексеев В И, Мацуков И Д, Вельмакин С М, Зарецкий Н П и Черненко Е В 2022 *Журнал технической физики* **92** 783–88
15. В Мальшев В и Писляков А В 2009 *Журнал аналитической химии* **64** 99–110
16. Maolin Z, Zhanheng Y, Jianping S and Cheng Z 2009 *J. Sensors and Actuators B* **148** 87–92
17. «ИНКРАМ» ООО «НПФ 2013 *Система газоаналитическая СКВА-01, ЕКРМ.411741.001РЭ. Руководство по эксплуатации* (Москва: ООО «НПФ «ИНКРАМ»)
18. «Дельта-С» ООО 2008 *Газоанализаторы серии Сенсис* (Москва, Зеленоград: ООО «Дельта-С»)
19. «Оптосенс» ООО 2017 *Малогобаритный измерительный датчик МИП ВГ/МIREX взрывоопасных газов. Руководство по эксплуатации* (СПб: ООО «Оптосенс»)
20. Загнитько А В, Кириш А А и Стечкина И Б 1988 *Журнал физической химии* **62**(11) 3058–64
21. Broeke J, Perez J and Pascau J 2015 *Image Processing with ImageJ* (Birmingham: Packet Publishing)
22. Загнитько А В, Зарецкий Н П и Мацуков И Д 2019 Инфракрасный анализатор паров сжиженного природного газа *Патент РФ* 191610
23. Загнитько А В и Федин Д Ю 2021 Низкотемпературный инфракрасный анализатор выбросов паров сжиженного природного газа в атмосфере на основе иммерсионных диодных оптопар *Патент РФ* 201017
24. Загнитько А В и Мацуков И Д 2020 Устройство для анализа содержания аэрозолей и газов в атмосферном воздухе *Патент РФ* 196118
25. Загнитько А В 2022 Устройство для анализа содержания аэрозолей и паров углеводородов при выбросе сжиженного природного газа в атмосферу *Патент РФ* 211142
26. Загнитько А В и Сальников С Е 2022 Устройство для анализа содержания тонкодисперсных аэрозолей и паров жидких углеводородов в атмосфере *Патент РФ* 215848
27. Загнитько А В и Мацуков И Д 2022 Низкотемпературный сканирующий анализатор паров сжиженного природного газа в атмосфере *Патент РФ* 210352
28. Ruap Y *и др.* 2017 *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* **278** 012130