

ДИСТАНЦИОННОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ АВАРИЙНЫХ ВЫБРОСОВ И УТЕЧЕК ГАЗОВ

© 2024 г. И. Д. Родионов¹, М. А. Гоморев^{2*}, И. П. Родионова¹,
А. И. Родионов^{1, 2}, В. Л. Шаповалов¹, Д. В. Шестаков¹, М. Г. Голубков¹

¹ Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семёнова
Российской академии наук, Москва, Россия

² ЗАО “Научно-технический центр “Реагент”, Москва, Россия

*E-mail: gomorevma@gmail.com

Поступила в редакцию 08.04.2024;

после доработки 16.04.2024;

принята в печать 22.04.2024

Существует множество причин для возникновения утечки природного газа (метана) в сети газораспределения. Одна из важнейших задач газораспределительных организаций — своевременно идентифицировать и устранить утечки газа до того, как они станут причиной аварийных и нештатных ситуаций. Скорейшее устранение утечек газа минимизирует негативное влияние на экологию. В настоящей работе предложена новая оригинальная методика по обнаружению аварийных выбросов газов в атмосферу и утечек в системах газопроводов. Методика предполагает одновременное использование как экспериментальных, так и расчетных данных для определения концентрации выбрасываемого газа и характерных линейных размеров газового облака. Апробация методики проведена в лабораторных условиях с использованием баллона с пропаном и газовой горелки. В качестве регистрирующей аппаратуры применялся монофотонный сенсор “Скорпион”. В результате обработки данных эксперимента и математического моделирования с использованием методов вычислительной газовой динамики построена зависимость концентрации пропана от расстояния до горелки и определены характерные размеры газового облака.

Ключевые слова: атмосфера, аварийные выбросы газа, утечка на газопроводе, гиперспектрометр, монофотонный датчик, время задержки воспламенения, вычислительная газовая динамика.

DOI: 10.31857/S0207401X24100069

1. ВВЕДЕНИЕ

С ростом мирового спроса на энергию природный газ стал ключевым источником, обеспечивающим потребность в электроэнергии большинства промышленных производств. Несмотря на свою эффективность, процессы добычи, транспортировки и использования природного газа имеют значительные негативные последствия для окружающей среды. Одним из основных источников загрязнения являются неизбежные утечки газа при его добыче из месторождений. Другим значительным источником выбросов метана является сеть газопроводов, где утечки могут происходить из-за старения и износа инфраструктуры, а также вследствие техногенных катастроф.

Разработка и использование передовых систем мониторинга, таких как беспилотные летательные аппараты (дроны) и спутниковые технологии,

позволят оперативно обнаруживать и отслеживать утечки и аварийные газовые выбросы. Специализированные датчики и камеры могут эффективно сканировать газопроводы и места добычи, обеспечивая быструю реакцию на потенциальные проблемы.

Современные гиперспектральные средства (ГС) предоставляют возможность обнаружения аварийных выбросов газов в атмосферу и их утечек в системах газопровода. Основные принципы работы и преимущества ГС изложены в работах [1–11]. Как правило, выбор типа ГС осуществляется, исходя из оценок концентрации и линейных размеров выбросов.

Подобные оценки невозможно получить без применения современных методов вычислительной газовой динамики (ВГД), которые позволяют рассчитать основные параметры объекта

исследования: динамику формирования облака газа, его концентрацию, характерные линейные размеры. На малых масштабах программное обеспечение (ПО) ВГД успешно применяется для задач обтекания и внутренних течений. Математическое моделирование на более крупных масштабах (открытая атмосфера) является более сложным, но тоже имеет ряд разработанных подходов, о которых будет сказано ниже.

Цель настоящей работы заключалась в разработке новой методики по обнаружению аварийных выбросов газов в атмосферу и утечек в системах газопроводов. Поскольку такие утечки при определенных условиях могут привести к возгоранию и взрыву, то на первом этапе предполагалось провести ряд экспериментов в лабораторных условиях с использованием баллона с пропаном и газовой горелки. На втором этапе планировалось использовать трехмерную модель ВГД, адаптированную под указанный выше эксперимент и позволяющую находить пространственное распределение концентрации газа в условиях газового выброса. На заключительном этапе в результате обработки данных эксперимента и математического моделирования требовалось построить зависимость концентрации пропана от расстояния до горелки и определить характерные размеры газового облака.

2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЫБРОСА ГАЗОВ

Математическое моделирование процессов выброса газов в данной работе проводилось методами ВГД, которые за последние тридцать лет получили широкое развитие благодаря появлению мощных вычислительных кластеров. В рамках используемой нами трехмерной математической модели описание протекающих процессов проводится с использованием системы нелинейных дифференциальных уравнений Навье—Стокса [12]. Эта модель хорошо зарекомендовала себя для описания реальных физических процессов при условии проверки подлинности данных, которая включает в себя исследование сходимости решения по сетке и сравнение с аналитическим решением для случаев, когда это возможно. Кроме того, предполагается сопоставление расчетных и экспериментальных данных. Конечным результатом моделирования является определение кон-

центрации и характерных размеров газового облака.

2.1. Распространение газовых выбросов на малых масштабах

Для моделирования течения на малых масштабах (задач обтекания и внутренних течений) в настоящее время успешно применяются следующие коммерческие программы: ANSYS Fluent [13], Star CCM [14] с реализацией метода конечных объемов либо COMSOL Multiphysics [15] с реализацией метода конечных элементов, а также российское ПО FlowVision [16] для многодисциплинарного моделирования и открытые исходные коды: SALOME [17] и OpenFOAM [18]. В указанных программных продуктах применяются подходы, основанные на использовании уравнений Навье—Стокса, осредненных по Рейнольдсу [12], а также замыкающие модели турбулентности (например, k — ε -модель) [19, 20], уравнения переноса, метод крупных вихрей [21] и др.

Для определения основных параметров турбулентного течения и выбора соответствующего метода проводится предварительный расчет, предшествующий ВГД-моделированию. Первоначально определяются входные данные: плотность ρ , динамическая вязкость μ , число Рейнольдса

$$Re = \rho U_{cp} D / \mu = U_{cp} D / \nu, \quad (1)$$

где U_{cp} — средняя скорость по сечению трубы, D — гидравлический диаметр трубы, а ν — коэффициент кинематической вязкости. Отметим, что величины ρ и μ в выражении (1) являются функциями давления и температуры:

$$\rho = \rho(p, T), \quad \mu = \mu(p, T). \quad (2)$$

Данные параметры рассчитываются согласно табличным данным и/или методикам расчета [22, 23], реализованным в ПО NIST [24].

Для труб круглого сечения турбулентный режим начинается при $Re > 2300$ [25]. Расчет коэффициента трения λ осуществляется по закону трения Колбрука:

$$\lambda_K = \lambda(Re, \varepsilon), \quad (3)$$

где λ является функцией числа Рейнольдса и шероховатости ε , и находится методом итераций из уравнения:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{2.51}{Re \sqrt{\lambda}} \right). \quad (4)$$

Далее рассчитываются физические параметры пристеночного слоя. Скорость трения U_τ на стенке выражается в виде

$$U_\tau = U_{cp} \left(\frac{\lambda}{8} \right)^{1/2}. \quad (5)$$

Величина U_τ в (5) является мерой касательного напряжения τ_w на стенке. При этом коэффициент вязкого трения определяется как

$$c_f = \frac{1}{2} \frac{\tau_w}{\rho U^2}, \quad (6)$$

Фактически величина τ_w — это сила, действующая со стороны потока на единицу площади поверхности. Выражение для толщины вязкого пристеночного слоя δ принимает вид [26]

$$\delta = \frac{\nu}{U_\tau} = \frac{D}{\text{Re}} \left(\frac{8}{\lambda} \right)^{1/2}. \quad (7)$$

На заключительной стадии рассчитывается безразмерное расстояние y^+ до стенки:

$$y^+ = \frac{y U_\tau}{\nu} = \frac{y}{\delta}, \quad (8)$$

которое представляет собой некоторое подобие числа Рейнольдса, где в качестве масштаба скорости принята величина U_τ , а в качестве масштаба длины — расстояние y от центра расчетной ячейки до стенки. Аналогично вводится понятие скорости u^+ как динамической переменной:

$$u^+ = U/U_\tau \quad (9)$$

Величина u^+ в (9) определяется коэффициентом вязкого трения:

$$u^+ = (2c_f)^{1/2}, \quad (10)$$

где c_f — коэффициент вязкого трения.

Зависимость $u^+(y^+)$ является локальным аналогом зависимости коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса. Расчет толщины первого слоя расчетной сетки, $y = \delta$, осуществляется по известному значению y^+ (см. выражение (8)). В этом случае для разрешения вязкого подслоя рассчитываются параметры призматического слоя сетки.

Многие сеточные генераторы ПО ГВД позволяют задавать различные прогрессии, связывающие толщину первого слоя ($y = \delta$), толщину последнего слоя и коэффициент растяжения. Это,

в свою очередь, приводит к плавному изменению размера ячейки сетки от пристеночного слоя к ядру потока.

Модели турбулентности в основном делятся на две категории: низкорейнольдсовые ($y^+ \approx 1$) и высокорейнольдсовые ($11.5 \leq y^+ \leq 200$). Как правило, у низкорейнольдсовых моделей требования по сетке очень жесткие, поэтому их целесообразно применять только на малых масштабах.

Для нахождения распределения давления и плотности по длине рабочей области следует решить уравнения неразрывности и изменения количества движения, имеющие вид

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho x_i) = 0, \quad (11)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = \\ & = \frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[m \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right) \right] + \\ & + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u' u'}_j). \end{aligned} \quad (12)$$

Здесь x_i и x_j — декартовы координаты ($i, j = 1, 2, 3$), $u'_i = u_i - \bar{u}_i$ — пульсации скорости (горизонтальная черта сверху означает осреднение по Рейнольдсу), δ_{ij} — дельта-символ Кронекера, $\overline{u'_i u'_j}$ — корреляция пульсаций случайных величин. Замыкающей для системы уравнений (11), (12) является к-ε-модель турбулентности с пристеночными функциями на высокорейнольдсовой сетке ($y^+ < 200$).

Решая далее уравнение переноса для фаз:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\rho_q} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla (\alpha_q \rho_q v_q) \right] = \\ & = S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}), \end{aligned} \quad (13)$$

можно определить объемные доли фазы α_q . Индексы p и q в формуле (13) принимают значения 1 и 2, α_1 — объемная доля фазы 1 (выбрасываемый газ), α_2 — объемная доля фазы 2 (воздух), v_q — вектор скорости, S_{α_q} — источниковый член, $\dot{m}_{pq}$ — расход вытекающего газа через грань расчетного домена, n — временной шаг.

Искомая массовая концентрация s , характеризующая облако выбрасываемого газа, следующим образом выражается через объемную долю

α_1 , полученную в результате решения уравнения (13) с использованием ПО ВГД:

$$c = \frac{\alpha_1 M}{V_m z}. \quad (14)$$

Здесь M — молярная масса выбрасываемого газа, V_m — молярный объем выбрасываемого идеального газа при 20 °С, z — фактор сжимаемости. По значениям концентрации в узлах сетки (по скалярной сцене распределения концентрации облака) могут быть найдены характерные размеры выброса газа.

Среднее значение концентрации вдоль оптического пути c_c , рассчитывается следующим образом:

$$c_{cp} = \frac{1}{L} \int_{H-h_{шл}}^{H+h_{шл}} c(z) dz, \quad (15)$$

где L — длина оптического пути, H — высота источника выброса, $h_{шл}$ — высота шлейфа выброса.

2.2. Распространение газовых выбросов на крупных масштабах

Численное моделирование процессов распространения выбросов газов на крупных масштабах, т.е. в пограничном слое атмосферы, уже достаточно затруднительно, поэтому здесь используются упрощенные модели дрейфа облака газовой смеси, представленные в работах [27, 28], а также модель FLACS (Gexcon) [29]. Кроме того, применяются модели на основе теории подобия Момина—Обухова [30].

Для моделирования течений на крупных масштабах подходят высокорейнольдсовы модели. Высокое значение y^+ означает большое значение y (размера первой ячейки) и меньшее количество элементов сетки в пристеночной области, что позволяет относительно быстро проводить расчет. В этом случае используются пристеночные функции, которые удовлетворяют универсальному логарифмическому закону распределения скоростей вблизи стенки (закон стенки). Одна из модификаций закона стенки выглядит следующим образом:

$$u^+ = \begin{cases} y^+, & \text{при } 0 < y^+ \leq 11.5; \\ \frac{1}{k} \ln(y^+) + 5.1, & \text{при } y^+ \geq 11.5. \end{cases} \quad (16)$$

Логарифмический закон включает слагаемое, содержащее коэффициент шероховатости, определяемый высотой деревьев. В этом случае необ-

ходимо, чтобы первая расчетная ячейка сетки вблизи стенки удовлетворяла следующим условиям: 1) $11.5 < y^+ < 500$; 2) $y_p > y_0$ (y_p — расстояние от стенки до центра расчетной ячейки, ближайшей к стенке). Расчет концентрации c и длины оптического пути L проводится здесь аналогично случаю газовых выбросов на малых масштабах с использованием формул (14) и (15).

2.3. Утечка газа в системе газопровода

Утечки на системах газопровода расположенного под землей включают физический процесс фильтрации: просачивание газа при низких скоростях течения через грунт или другую пористую среду [31]. В подземной гидродинамике для моделирования процессов фильтрации применяется закон Дарси, который в общем случае для анизотропных пористых сред имеет вид [32, 33]

$$u_i = -\frac{k_{ij}}{\mu} (\nabla^j p - \rho g^j), \quad (17)$$

где k_{ij} — симметричный положительно определенный тензор проницаемости, g^j — компонента вектора силы тяжести.

Простейшая оценка массового расхода Q_M для облака газа при утечке в системе газопровода, расположенного над землей, может быть получена на основе формулы для скорости истечения сжатого газа из баллона малого отверстия при допущении, что газ — идеальный [34]:

$$Q_M = \rho S \left\{ 2 \frac{\gamma}{\gamma - 1} R T_0 \left[1 - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\gamma/\gamma - 1} \right] \right\}^{1/2}, \quad (18)$$

где S — площадь сечения отверстия, γ — показатель адиабаты, R — универсальная газовая постоянная, T_0 — температура окружающей среды, p_0 — атмосферное давление.

2.4. Истечение пропана из горелки

Целью математического моделирования здесь было получение распределения концентрации пропана вдоль продольной и поперечной осей вне области горелки. Входные параметры для ВГД-моделирования были следующими: массовый расход $Q_M = 1$ г/с, скорость истечения $U = 0.2$ м/с, число Рейнольдса $Re = 2744$, что соответствует турбулентному режиму течения. Геометрические параметры цилиндрической части: длина $L = 100$ мм, диаметр $D = 58$ мм. При давлении



Рис. 1. Фотография экспериментальной установки.

$p = 0.101325$ МПа и температуре $T = 20$ °С плотность пропана составляет $\rho = 1.87$ кг/м³. Были рассмотрены варианты газовой горелки с отверстиями и без них с различной ориентацией относительно поля тяжести.

В качестве физической модели рассматривался вязкий газ (смесь пропана с воздухом) с постоянной плотностью при нормальных условиях ($p = 0.101325$ МПа $T = 20$ °С). Расчеты проводились по алгоритму, описанному в п.2.1 с использованием ПО RANS, основу которого составляют уравнения Навье–Стокса для движения вязкой жидкости, осредненные по Рейнольдсу [12].

3. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Утечки на объектах газопровода при определенных условиях могут приводить к возгоранию и взрыву. Поэтому на первом этапе было принято решение всесторонне исследовать в лабораторных условиях утечку газа из пропановой горелки при атмосферном давлении.

Перед проведением эксперимента было сделано предположение, что концентрация пропана при удалении от горелки уменьшается. Это, в свою очередь, должно приводить к увеличению времени задержки воспламенения. Поэтому целью эксперимента было определение зависимости времени задержки воспламенения газовой смеси от рас-

стояния до газовой горелки. Для построения зависимости концентрации пропана от расстояния предполагалось использовать результаты численного моделирования.

В качестве экспериментальной установки (рис. 1) рассматривался баллон, наполненный пропаном и соединенный с редуктором к выпускной трубке с горелкой. Массовый расход пропана составил 1 г/с. Эксперимент проводился при нормальных условиях ($p = 0.101325$ МПа $T = 20$ °С). Использовалась газовая горелка наподобие паяльной лампы.

В качестве регистрирующей аппаратуры применялся монофотонный сенсор “Скорпион” [10, 35–37] (рис. 2). По экспериментальным данным, полученным при помощи монофотонных датчиков, осуществлялась раскадровка и строился график зависимости интенсивности сигнала от времени. Первый пик на временной шкале соответствовал искровому поджигу, а второй пик — возгоранию смеси. Разность между пиками определяла время задержки воспламенения. Камера “Скорпиона”, работающая в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне, позволяет определить характерное время задержки воспламенения, которое составляет около 1 мс. Точность измерения указанного выше метода составляет величину порядка 10 нс.



Рис. 2. Фотография монофотонного УФ–С-сенсора “Скорпион”.

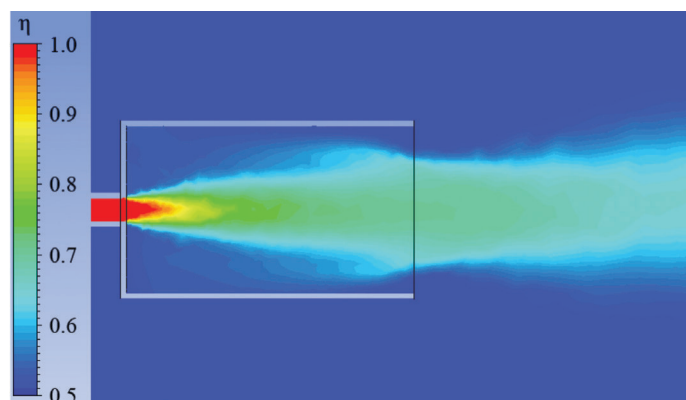


Рис. 3. Скалярная сцена концентрации пропана. Величина η – объемная доля пропана в смеси “пропан+воздух”.

За момент воспламенения принимались кадры с первыми признаками инициирования горения. Система искрового поджига включала повышающий трансформатор. Длительность искры была менее 0.5 мс. Частота кадров соответствовала периоду дискретизации в 0.5 мс. Время воспламенения составляло 34 мс.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3 представлена скалярная сцена концентрации пропана, рассчитанная методами ВГД с использованием данных эксперимента. Видно, что максимальное значение объемной доли пропана, η , наблюдается в подводящем патрубке. На близком расстоянии к патрубку η спадает до 80% и на достаточно протяженном расстоянии держится в интервале 65–80%. Сам след газового

выброса является сильно вытянутым вдоль оси горелки (направления истечения газа).

Определенные сложности, с которыми пришлось столкнуться в ходе проведения эксперимента, не позволили получить график зависимости времени воспламенения от расстояния до газовой горелки. Основными причинами являются: малый масштаб установки, быстрое падение концентрации выбрасываемого газа, неравномерность потока газа, сложность контроля заданного расхода, обугливание системы поджига и последующая ее чистка после каждого воспламенения. Тем не менее, с помощью математического моделирования методами ВГД поставленную задачу удалось решить: была построена зависимость концентрации от расстояния до горелки и определены характерные размеры газового облака.

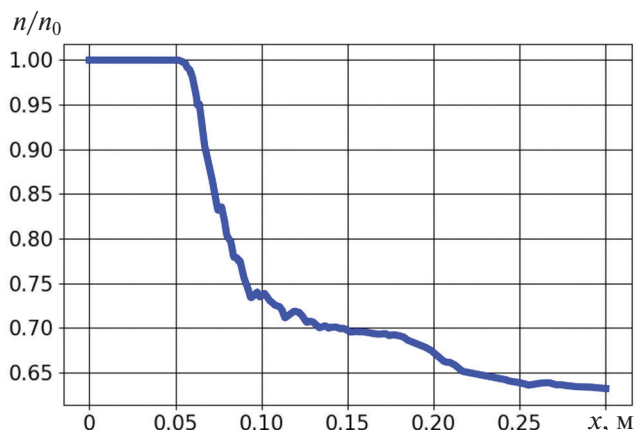


Рис. 4. Зависимость относительной концентрации пропана n/n_0 от расстояния x до патрубка. Здесь n_0 – концентрация пропана в патрубке.

Продольное распределение концентрации пропана вдоль оси горелки (см. рис. 4), нормированное на максимальное значение концентрации газа в подводящем патрубке: $n_0 = 2.1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, подтверждает справедливость высказанного ранее предположения о падении концентрации с увеличением расстояния до горелки. Так, расчеты показали, что уже на расстоянии 25 см от горелки концентрация газа уменьшается почти в два раза.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе предложена новая оригинальная методика по обнаружению аварийных выбросов газов в атмосферу и утечек на объектах газопроводов. Методика предполагает одновременное использование как экспериментальных, так и расчетных данных для определения концентрации и характерных размеров газового облака. Апробация методики проведена в лабораторных условиях с использованием баллона с пропаном и газовой горелки. В качестве регистрирующей аппаратуры применялся монофотонный сенсор “Скорпион”. В результате обработки данных эксперимента и математического моделирования с использованием методов вычислительной газовой динамики построена зависимость концентрации пропана от расстояния до горелки и определены характерные размеры газового облака.

Дальнейшее развитие методики по обнаружению утечек газов предполагает использование ГС-технологий [10]. На основе ГС-измерений по экспериментально полученным спектрам и резонансным линиям поглощения планируется определять глубину спектра поглощения. Согласно

закону Бугера–Ламберта–Бера концентрацию газа можно рассчитать при известных значениях глубины поглощения, сечения рассеяния и длины оптического пути. Последняя величина представляет собой линейный размер шлейфа облака выбросов, которые могут быть получены на основе ВГД-моделирования и различных моделей шлейфа газового облака. Кроме того, для обнаружения аварийных выбросов газов в атмосферу возможно применение и других современных технологий [38–40].

Работа выполнена в рамках госзадания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 122040500060-4), частично финансово поддержана грантом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075–15–2021–1362.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Van der Werff H.M.A., Noomen M.F., van der Meijde M. et al. // New Developments and Challenges in Remote Sensing / Ed. Bochenek. Z. /Rotterdam: Millpress, 2007. P. 707.
2. Sabbah S., Rusch P., Gerhard J.H. et al. // Electro-Optical Remote Sensing, Photonic Technologies, and Applications V / Eds. Kamerman G.W., Steinvall O., Bishop G.J., et al. Proc. SPIE. 2011. V. 8186. 81860S; <https://doi.org/10.1117/12.899687>
3. Ma P., Mondal T.G., Shi Z. et al. // Environ. Sci. Technol. 2024. V. 58. P. 12018; <https://doi.org/10.1021/acs.est.4c03345>
4. Gagnon M.A., Tremblay P., Savary S. et al. // Advanced Environmental, Chemical, and Biological Sensing Technologies XI / Eds. Vo-Dinh T., Lieberman R.A., Gauglitz G.G. . Proc. SPIE. 2014. V. 9106. 91060C; <https://doi.org/10.1117/12.2050588>
5. Tratt D.M., Buckland K.N., Keim E.R. et al. // Proc. 8th Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing (WHISPERS). Los Angeles: IEEE, 2016. P. 1; <https://doi.org/10.1109/WHISPERS.2016.8071711>
6. Xavier W., Labat N., Audouin G. et al. // Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference (16ADIP). Abu Dhabi: SPE, 2016. SPE-183527-MS; <https://doi.org/10.2118/183527-MS>
7. Scafutto R.P.M., De Souza Filho C.R. // Remote Sens. 2018. V. 10. № 8. 1237; <https://doi.org/10.3390/rs10081237>
8. Xiao C., Fu B., Shui H. et al. // Remote Sens. 2020. V. 12. № 3. 537; <https://doi.org/10.3390/rs12030537>
9. Рубцов Н.М., Виноградов А.Н., Калинин А.П. и др. // Хим. физика. 2019. Т. 38. № 4. С. 53; <https://doi.org/10.1134/S0207401X19040101>

10. Родионов А.И., Родионов И.Д., Родионова И.П. и др. // Хим. физика. 2021. Т. 40. № 10. С. 61; <https://doi.org/10.31857/S0207401X21100113>
11. Rubtsov N., Alymov M., Kalinin A. et al. Remote studies of combustion and explosion processes based on optoelectronic methods. Melbourne: AUS PUBLISHERS, 2022; https://doi.org/10.26526/monography_62876066a124d8.04785158
12. Роуч П. Вычислительная гидродинамика. М.: Мир, 1980.
13. ANSYS Fluent Theory Guide. Canonsburg: SAS Inc., 2013.
14. Star-CCM+. <https://star-ccm.com/>
15. Введение в COMSOL Multiphysics; <https://www.comsol.com/>
16. Flow Vision; <https://flowvisioncf.com/en/>
17. SALOME version 9.12.0; <https://www.salome-platform.org/?p=2657>
18. Schwarz J., Axelsson K., Anheuer D. et al. // SoftwareX. 2023. V. 22. 101378; <https://doi.org/10.1016/j.softx.2023.101378>
19. Белов И.А., Исаев С.А. Моделирование турбулентных течений. Санкт-Петербург: Изд-во Балтийского ГТУ, 2001.
20. Wilcox D.C. Turbulence modelling for CFD. San Diego: Birmingham Press, 2006.
21. Волков К.Н., Емельянов В.Н. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений. М.: Физматлит, 2008.
22. Leachman J.W., Jacobsen R.T., Lemmon E.W. et al. Thermodynamic properties of cryogenic fluids / Eds. Van Sciver S.W., Jeong S.. Cham: Springer International Publishing, 2017; <https://doi.org/10.1007/978-3-319-57835-4>
23. Span R. Multiparameter equations of state. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2000; <https://doi.org/10.1007/978-3-662-04092-8>
24. Lemmon E.W., Bell I.H., Huber M.L. et al. NIST Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties Database (REFPROP) Ver. 10.0. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2018.
25. Гольдштик М.А., Штерн В.Н. Гидродинамическая устойчивость и турбулентность. Новосибирск: Наука, 1977.
26. Schlichting H., Gersten K. Boundary-layer theory. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017; <https://doi.org/10.1007/978-3-662-52919-5>
27. Приказ Ростехнадзора от 28.11.2022 № 415 “Об утверждении Руководства по безопасности “Методика оценки последствий аварий на взрывопожароопасных химических производствах”. 2022; https://set.rk.gov.ru/uploads/txteditor/set/attachments/d4/1d/8c/d98f00b204e9800998ecf8427e/php1W8esL_1.pdf
28. Руководство по безопасности “Методика моделирования распространения аварийных выбросов опасных веществ”. М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2015.
29. FLACS-CFD Release 24.1; <https://www.gexcon.com/software/flacs-cfd/>
30. Монин А.С., Обухов А.М. // Тр. Геофиз. Инст-та АН СССР. 1954. Т. 24. № 151. С. 163.
31. Tiab D., Donaldson E.C. Petrophysics: theory and practice of measuring of reservoir rock and fluid transport properties. Oxford: Gulf Professional Publishing, 2004.
32. Басниев К.С., Кочина И.Н., Максимов В.М. Подземная гидромеханика. М.: Недра, 1993.
33. Басниев К.С., Дмитриев Н.М., Розенберг Г.Д. Нефтегазовая гидромеханика. М.—Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2005.
34. Yuhu D., Huilin G., Jingen Z. et al. // Chem. Eng. J. 2003. V. 92. № 1–3. Р. 237; [https://doi.org/10.1016/S1385-8947\(02\)00259-0](https://doi.org/10.1016/S1385-8947(02)00259-0)
35. Белов А.А., Калинин А.П., Крысюк И.В. и др. // Датчики и системы. 2010. № 1. С. 47.
36. Калинин А.П., Егоров В.В., Родионов А.И. и др. // Хим. физика. 2023. Т. 42. № 7. С. 17; <https://doi.org/10.31857/S0207401X23070087>
37. Родионов А.И., Родионов И.Д., Родионова И.П. и др. // Хим. физика. 2023. Т. 42. № 10. С. 96; <https://doi.org/10.31857/S0207401X23100138>
38. Козлов П.В., Забелинский И.Е., Быкова Н.Г. и др. // Хим. физика. 2022. Т. 41. № 9. С. 26; <https://doi.org/10.31857/S0207401X22090047>
39. Голяк Ил.С., Анфимов Д.Р., Винтайкин И.Б. и др. // Хим. физика. 2023. Т. 42. № 4. С. 3; <https://doi.org/10.31857/S0207401X23040088>
40. Морозов А.Н., Табалин С.Е., Анфимов Д.Р. и др. // Хим. физика. 2024. Т. 43. № 6.

REMOTE DETECTION OF EMERGENCY EMISSIONS AND GAS LEAKS

I. D. Rodionov¹, M. A. Gomorev^{2*}, I. P. Rodionova¹, A. I. Rodionov^{1, 2},
V. L. Shapovalov¹, D. V. Shestakov¹, M. G. Golubkov¹

¹ *Semenov Federal Research Center for Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

² *AO Scientific and Technical Center Reagent, Moscow, Russia*

*E-mail: gomorevma@gmail.com

There are many reasons for natural gas (methane) leaks in gas distribution networks. One of the most important tasks of gas distribution organizations is to promptly identify and eliminate gas leaks before they cause emergency situations. Eliminating gas leaks as soon as possible will minimize the negative impact on the environment. This paper proposes a new original method for detecting emergency gas emissions into the atmosphere and leaks on gas pipeline systems. The technique involves the simultaneous use of both experimental and calculated data to determine the concentration and characteristic sizes of gas emissions. The methodology was tested at laboratory conditions using a propane cylinder and a gas burner. The Scorpion monophotonic sensor was used as recording equipment. As a result of processing experimental data and mathematical modeling using computational fluid dynamics methods, the dependence of propane concentration on the distance to the burner was constructed and the characteristic dimensions of the gas cloud were determined.

Keywords: atmosphere, emergency gas releases, gas pipeline leak, hyperspectrometer, monophotonic sensor, ignition delay time, computational gas dynamics.

REFERENCES

1. H.M.A. van der Werff, M.F. Noomen, M. van der Meijde, J.F. Kooistra, and F.D. van der Meer, in: *New Developments and Challenges in Remote Sensing*, Ed by Z. Bochenek (Millpress, Rotterdam, 2007), p. 707.
2. S. Sabbah, P. Rusch, J. H. Gerhard, et al., in: *Proceedings of Electro-Optical Remote Sensing, Photonic Technologies, and Applications V*, Ed by G.W. Kamerman, O. Steinvall, G.J. Bishop, J.D. Gonglewski, K.L. Lewis, R.C. Hollins, and T.J. Merlet, Proc. SPIE **8186**, 81860S (2011).
<https://doi.org/10.1117/12.899687>
3. P. Ma, T.G. Mondal, Z. Shi, et al., Environ. Sci. Technol. **58**, 12018 (2024).
<https://doi.org/10.1021/acs.est.4c03345>
4. M.A. Gagnon, P. Tremblay, S. Savary, et al., in: *Proceedings of Advanced Environmental, Chemical, and Biological Sensing Technologies XI*, Ed by T. Vo-Dinh, R. A. Lieberman, and G. G. Gauglitz, Proc. SPIE **9106**, 91060C (2014).
<https://doi.org/10.1117/12.2050588>
5. D.M. Tratt, K.N. Buckland, E.R. Keim, and P. D. Johnson, in: *Proceedings of 2016 8th Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing (WHISPERS)* (IEEE, Los Angeles, 2016), p. 1.
<https://doi.org/10.1109/WHISPERS.2016.8071711>
6. W. Xavier, N. Labat, G. Audouin, et al., in: *Proceedings of Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference (16ADIP)* (SPE, Abu Dhabi, 2016), SPE-183527-MS;
<https://doi.org/10.2118/183527-MS>
7. R.P.M. Scafutto and C. R. De Souza Filho, Remote Sens. **10**, 1237 (2018).
<https://doi.org/10.3390/rs10081237>
8. C. Xiao, B. Fu, H. Shui, Z. Guo, and J. Zhu, Remote Sens. **12**, 537 (2020).
<https://doi.org/10.3390/rs12030537>
9. N. M. Rubtsov, A. N. Vinogradov, A. P. Kalinin, et al., Russ. J. Phys. Chem. B **13**, 305 (2019).
<https://doi.org/10.1134/S1990793119020210>
10. A.I. Rodionov, I.D. Rodionov, I.P. Rodionova, et al., Russ. J. Phys. Chem. B **15**, 904 (2021).
<https://doi.org/10.1134/S1990793121050201>
11. N. Rubtsov, M. Alymov, A. Kalinin, et al., *Remote studies of combustion and explosion processes based on opto-electronic methods* (AUS PUBLISHERS, Melbourne, 2022).
https://doi.org/10.26526/monography_62876066a124d8.04785158
12. P.J. Roache, *Computational fluid dynamics* (Mir, Moscow, 1980).
13. ANSYS Fluent Theory Guide. Canonsburg: SAS Inc., 2013.
14. Star-CCM+. <https://star-ccm.com/>
15. Introduction to COMSOL Multiphysics. <https://www.comsol.com/>
16. Flow Vision. <https://flowvisioncfd.com/en/>
17. SALOME version 9.12.0. <https://www.salome-platform.org/?p=2657>
18. J. Schwarz, K. Axelsson, D. Anheuer, et al., SoftwareX **22**, 101378 (2023).
<https://doi.org/10.1016/j.softx.2023.101378>
19. I.A. Belov and S. A. Isaev, *Simulation of turbulent flows* (Publishing House of Baltic State Technical University, St. Petersburg, 2001).
20. D.C. Wilcox, *Turbulence modelling for CFD* (Birmingham Press, San Diego, 2006).

21. K.N. Volkov and V.N. Emelyanov, Large eddy simulation in calculations of turbulent flows (Fizmatlit, Moscow, 2008).
22. J.W. Leachman, R.T. Jacobsen, E. W. Lemmon, and S.G. Penoncello, *Thermodynamic properties of cryogenic fluids*, Ed by S. W. Van Sciver and S. Jeong (Springer International Publishing, Cham, 2017).
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-57835-4>
23. R. Span, *Multiparameter equations of state* (Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2000).
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-04092-8>
24. E.W. Lemmon, I.H. Bell, M.L. Huber, and M. O. McLinden, *NIST Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties Database (REFPROP), Version 10.0* (National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, 2018).
25. M. A. Goldshtik and V. N. Stern, *Hydrodynamic Stability and Turbulence* (Nauka, Novosibirsk, 1977).
26. H. Schlichting and K. Gersten, *Boundary-layer theory* (Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2017).
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-52919-5>
27. Rostekhnadzor Order No. 415 dated 11/28/2022 “On Approval of the Safety Manual “Methodology for assessing the consequences of accidents at explosive and flammable chemical industries”. 2022. https://set.rk.gov.ru/uploads/txteditor/set/attachments/d4/1d/8c/d98f00b204e9800998ecf8427e/phpIW8esL_1.pdf
28. Safety manual “Methodology for modeling the spread of accidental emissions of hazardous substances”. (Moscow: 2015). <https://meganorm.ru/Data2/1/4293763/4293763998.pdf>
29. FLACS-CFD Release 24.1. <https://www.gexcon.com/software/flacs-cfd/>
30. A.S. Monin and A. M. Obukhov, Trudy geofiz. Inst. Akad. Nauk U.R.S.S. **24**, 163 (1954).
31. D. Tiab and E. C. Donaldson, *Petrophysics: theory and practice of measuring of reservoir rock and fluid transport properties* (Gulf Professional Publishing, Oxford, 2004).
32. K.S. Basniev, I.N. Kochina, and V.M. Maksimov, *Underground hydromechanics* (Nedra, Moscow, 1993).
33. K. S. Basniev, N. M. Dmitriev, and G. D. Rozenberg, *Oil and gas hydromechanics* (Institute for Computer Research, Moscow, Izhevsk, 2005).
34. D. Yuhu, G. Huilin, Z. Jingen, and F. Yaorong, Chem. Eng. J. **92**, 237 (2003).
[https://doi.org/10.1016/S1385-8947\(02\)00259-0](https://doi.org/10.1016/S1385-8947(02)00259-0)
35. A. A. Belov, A. P. Kalinin, I. V. Krysyuk, et al., Sensors and Systems **1**, 47 (2010).
36. A. P. Kalinin, V. V. Egorov, A. I. Rodionov, et al., Russ. J. Phys. Chem. B **17**, 796 (2023).
<https://doi.org/10.1134/S1990793123040085>
37. A. I. Rodionov, I. D. Rodionov, I. P. Rodionova, et al., Russ. J. Phys. Chem. B **17**, 1246 (2023).
<https://doi.org/10.1134/S1990793123050275>
38. P.V. Kozlov, I.E. Zabelinsky, N.G. Bykova, et al., Russ. J. Phys. Chem. B **16**, 883 (2022).
<https://doi.org/10.1134/S1990793122050049>
39. I.I. S. Golyak, D.R. Anfimov, I.B. Vintaykin, et al., Russ. J. Phys. Chem. B **17**, 320 (2023).
<https://doi.org/10.1134/S1990793123020264>
40. A.N. Morozov, S.E. Tabalin, D.R. Anfimov, et al., Russ. J. Phys. Chem. B **18**, 763 (2024).
<https://doi.org/10.1134/S1990793124700234>