

УДК 622.691.24

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕОРГАНИЗОВАННЫХ ВЫБРОСОВ ПРИРОДНОГО ГАЗА В АТМОСФЕРЕ

Байков Игорь Равильевич¹,
pte@rusoil.net

Китаев Сергей Владимирович¹,
svkitaev@mail.ru

Шаммазов Айрат Мингазович^{2,1},
info@rusoil.net

Зубаилов Гаджихмед Исмаилович³,
adk_gadzi@niigaz.ru

¹ Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Россия, 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

² Академия наук Республики Башкортостан,
Россия, 450008, г. Уфа, ул. Кирова, 15

³ Научно-Технический центр «Оценка соответствия» АО «Гипрониигаз»,
Россия, 410012, г. Саратов, пр. Кирова, 54.

Актуальность. Природный газ в настоящее время является безальтернативным углеводородным ресурсом, используемым преимущественно как топливо. Основным компонентом природного газа является метан, его содержание в газе превышает 95 %. При транспортировании природного газа по трубопроводам неизбежно появляются неорганизованные выбросы через разъемные соединения. Метан относится к парниковым газам и приводит к потеплению климата. Парижское соглашение, ратифицированное Россией, предполагает сокращение выбросов парниковых газов для снижения нагрузки на окружающую среду. Результаты, рассмотренные в статье, являются актуальными, т. к. приведенные рекомендации позволят повысить эффективность контроля за неорганизованными выбросами метана в окружающую среду.

Цель: разработка методики определения объема утечек природного газа в атмосферу через разъемные негерметичные соединения на газопроводах с помощью лазерного детектора метана, регистрирующего величину утечки. Методика предполагает разработку аналитических моделей для пересчета линейной концентрации метана в области утечки в объемные значения.

Объекты: экспериментальная установка, предназначенная для моделирования утечек природного газа в атмосферу. Стенд позволяет моделировать утечки различной интенсивности с помощью специальных сменных заглушек, имеющих отверстия различного диаметра.

Методы. Для обоснования предлагаемых положений использовались методы наименьших квадратов, асимптотических координат, порядковых статистик.

Результаты. Представлена методика количественного определения эмиссии метана через разъемные соединения газотранспортной системы. Для разработки методики был специально спроектирован и изготовлен лабораторный стенд, с помощью которого были получены эмпирические данные для аналитических моделей пересчета линейной концентрации метана в области утечки в объемную концентрацию.

Ключевые слова:

Трубопроводный транспорт газа, утечки природного газа, эмиссия метана, лазерный детектор, мониторинг утечек.

Введение

Парниковые газы оказывают существенное влияние на климат Земли. Значительные выбросы парниковых газов в период промышленного развития привели к нагреву атмосферы, и эти изменения уже ощущаются во всех сферах человеческой деятельности.

Цели по сокращению выбросов определены в Парижском соглашении по климату [1], Постановлении РФ о ратификации Парижского соглашения [2], Стратегии РФ по сокращению выбросов парниковых газов на период до 2050 года [3].

Значительный вклад в парниковый эффект вносят предприятия, добывающие и транспортирующие природный газ. При эксплуатации объектов газовой про-

мышленности неизбежно появляются неорганизованные утечки природного газа в атмосферу. Природный газ содержит в своем составе парниковый газ – метан (более 95 %). Причиной возникновения утечек является ухудшение технического состояния, разгерметизация газопроводов и технологического оборудования вследствие продолжительного срока их эксплуатации.

Места появления утечек могут быть различными – как правило, это разъемные фланцевые или резьбовые соединения. С большой долей вероятности утечки появляются по штоку в месте сальникового уплотнения запорно-регулирующей арматуры. Утечки также могут появиться при повреждении оборудования из-за коррозии. Коррозионные повреждения становятся источником утечки при появлении сквозного отвер-

стия. Трещины на сварных швах также могут стать источником утечек.

Для обнаружения и измерения эмиссии метана применяются различные средства: измерители концентрации метана, термоанемометры, приборы для измерения концентрации метана и расхода газового потока, дистанционный лазерный детектор метана, приборы для измерения концентрации метана и объема утечки – инфракрасные камеры [4–6].

В последнее время опубликованы научные работы, в которых рассматриваются способы обнаружения и мониторинга утечек метана на объектах, использующих в своих технологических сетях метан [7–9]. Значительный вклад в выбросы метана в атмосферу вносят объекты газотранспортной системы единой системы газоснабжения РФ. ПАО «Газпром» непрерывно ведется работа по выявлению и устранению утечек природного газа в соответствии с нормативно-техническими документами [10, 11].

В зарубежных источниках [12–17] приведены результаты исследований по обнаружению и контролю за утечками метана.

В научных работах [18, 20] приводятся научно обоснованные технологические решения по сокращению эмиссии метана в атмосферу на объектах газовой промышленности.

Проведенные исследования показывают, что актуальной является задача количественного определения объема утечек природного газа в атмосферу через негерметичные узлы для повышения эффективности работ по снижению эмиссии парникового газа – метана – в окружающую среду.

В статье приведены результаты разработки методики учета эмиссии метана с применением дистанционного лазерного детектора метана.

Положительной функцией лазерного детектора метана является измерение линейной концентрации метана в области утечки (ppm·м), т. е. концентрации метана на толщину облака утечки. Это и даст возможность перевести линейную концентрацию метана в количественную величину объема утечки с приемлемой точностью по специально разработанным аналитическим зависимостям. В работе применялся портативный лазерный детектор метана Laser methan mini.

Для разработки математических моделей выбран «прямой» метод с применением счетчиков расхода газа в качестве эталонного метода. Для проведения исследований по моделированию объемов утечек различной интенсивности, характеризующих вид утечки, была разработана и изготовлена экспериментальная установка (рис. 1).

На рис. 2 приведен фотоснимок, иллюстрирующий общий вид экспериментальной установки, собранной для моделирования утечек и измерения их объема струйным счетчиком расхода газа.

На рис. 3 приведен фотоснимок экспериментальной установки для моделирования утечек газа и измерения линейной концентрации метана в области утечки лазерным детектором метана.

На рис. 4 приведен фотоснимок области экспериментальной установки со сменной заглушкой с отверстием для моделирования утечек различной интенсивности. Стрелкой указано направление измерительного луча детектора метана при проведении измерений линейной концентрации метана в области утечки.

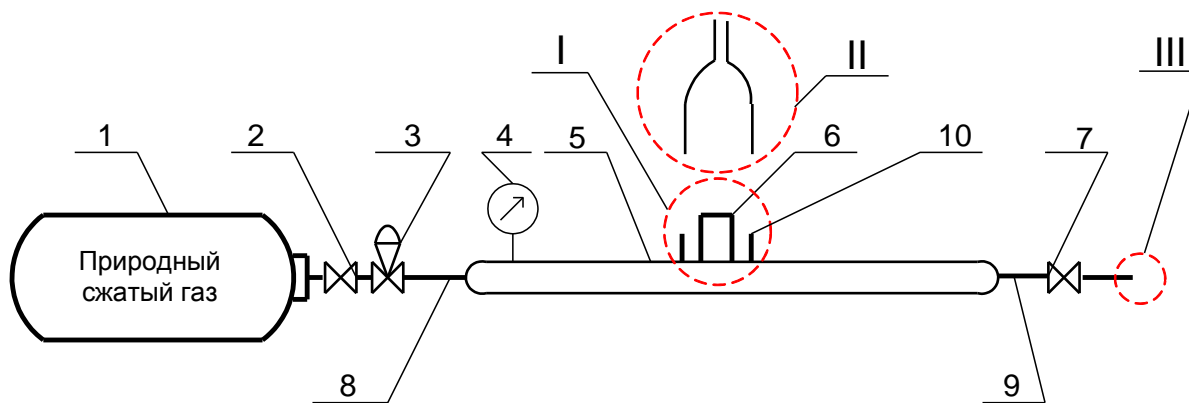


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – баллон со сжатым газом $P=25,0$ МПа; 2 – вентиль $P=25,0$ МПа; 3 – редуктор газовый $P_{вх}=25,0$ МПа, $P_{вых}=0-0,1$ МПа; 4 – манометр образцовый; 5 – имитация участка газопровода ($DN100$, $L=2,0$ м; $P=10,0$ МПа); 6 – бобышка со сменной пробкой; 7 – вентиль $P=10,0$ МПа; 8 – армированный резиновый шланг $P=0,1$ МПа, $L=2,0$ м; 9 – трубка $1/2''$, $L=0,15$ м, $P=10,0$ МПа; 10 – наружная бобышка $4''$. I – узел моделирования утечек газа; II – кожух для подачи газа на счетчик; III – штуцер для сброса остаточного давления газа в стенде

Fig. 1. Scheme of the experimental setup: 1 – compressed gas cylinders, $P=25,0$ MPa; 2 – valve $P=25,0$ MPa; 3 – reducer gas $P_{in}=25,0$ MPa, $P_{out}=0-0,1$ MPa; 4 – gauge exemplary; 5 – simulation of a gas pipeline ($DN100$, $L=2,0$ m; $P=10,0$ MPa); 6 – boss with interchangeable plug; 7 – valve $P=10,0$ MPa; 8 – reinforced rubber hose $P=0,1$ MPa, $L=2,0$ m; 9 – $1/2''$ tube, $L=0,15$ m, $P=10,0$ MPa; 10 – $4''$ outer boss. I – gas leak simulation unit; II – casing for gas supply to the meter; III – fitting for relieving the residual gas pressure in the stand



Рис. 2. Экспериментальная установка для моделирования утечек и измерения их объема струйным счетчиком расхода газа

Fig. 2. Experimental setup for modeling leaks and measuring their volume with a jet gas flow meter



Рис. 3. Экспериментальная установка для моделирования утечек и измерения линейной концентрации метана в области утечки лазерным детектором метана

Fig. 3. Experimental setup for modeling leaks and measuring methane linear concentration in the leakage region by a laser methane detector



Рис. 4. Фотоснимок области экспериментальной установки со сменной заглушкой с отверстием для моделирования утечек различной интенсивности

Fig. 4. Photograph of the experimental installation area with a replaceable plug with a hole for modeling leaks of different intensity

Работы по измерению расхода газа с утечкой производились с помощью газового счетчика при различных значениях давления газа в газопроводе и различных площадях источника утечки в следующем порядке:

- подключение имитатора газопровода с источником утечки площадью S_1 к баллону с природным газом;
- герметизация и установка изолирующего чехла над источником утечки;
- заполнение газопровода и изолирующего газопровода природным газом;
- настройка заданного давления газа в имитаторе газопровода P_1 ;
- подготовка газового счетчика к эксплуатации в соответствии с руководством по эксплуатации;
- фиксация показаний термометра и барометрического давления;
- фиксация показаний счетного устройства газового счетчика Q_1 ;
- по истечении времени τ фиксация показаний счетного устройства газового счетчика Q_2 ;
- определение расхода газа через источник утечки площадью S_1 при давлении в газопроводе P_1 по формуле: $V_{сч}=(Q_2-Q_1)$.

Измерение величины расхода газа с утечкой производилось струйными счетчиками типа СГБ-1,8 и СГБ-4,0, которые применялись поочередно в зависимости и расхода газа для обеспечения необходимой точности измерений в диапазоне малых расходов

Массовый расход газа Q_m через отверстие, выражаемый в кг/с, определяется из соотношения по формуле (1):

$$Q_m = f c_2, \quad (1)$$

где f – площадь сечения отверстия в негерметичном узле.

Скорость истечения определяется по формуле (2):

$$c_2 = \sqrt{\frac{2k}{k-1} RT_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}. \quad (2)$$

Подставляя выражение (2) в (1), получим выражение (3):

$$Q_m = f \sqrt{2 \frac{k}{k-1} \frac{p_1}{v_1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}. \quad (3)$$

Объемный часовой расход газа определяется по формуле (4):

$$Q_p = \frac{Q_m}{\rho} 3600, \quad (4)$$

где ρ – плотность газа.

Из уравнения (4) следует, что массовый секундный расход газа при истечении из трубопровода через отверстие зависит от площади отверстия, свойств газа (k – показатель адиабаты, p_1 – давление газа в трубе, v_1 – удельный объем газа в трубе) и степени его расширения (т. е. давления газа на выходе p_2).

Массовый расход газа с утечкой по формуле (4) может быть рассчитан для давлений в источнике утечки до 1 bar, т. е. при значениях от $\frac{p_2}{p_1} = \beta_{кр} = 0,5$

до $\frac{p_2}{p_1} = 1,0$ теоретические расчеты полностью совпадают с экспериментальными данными. Для интервала значений степени расширения $0 < \frac{p_2}{p_1} < \beta_{кр}$ массовый

расход газа с утечкой может быть рассчитан по другой формуле. Рассмотрим методику расчета массового расхода газа с утечкой для интервала степени расширения $0 < \frac{p_2}{p_1} < \beta_{кр}$. Режим истечения газа из отверстий критический.

Массовый расход газа при истечении из отверстия определяется по формуле (5):

$$Q_m = f \lambda_{кр} \sqrt{\frac{2gp_1}{v_1}}, \quad (5)$$

где $\lambda_{кр}$ – скоростная характеристика расхода газа.

Объемный часовой расход газа с утечкой определяется по формуле (6):

$$Q_p = \frac{Q_m}{\rho} 3600, \quad (6)$$

где ρ – плотность газа.

На рис. 5 приведены экспериментальная и расчетная зависимости расхода газа с утечкой в зависимости от избыточного давления газа в трубе для диаметра отверстия $D=0,35$ мм (в качестве примера).

Расчетные данные получены по формуле (4) для случая, когда $\beta = \frac{p_2}{p_1} = 0,5 - 1,0$.

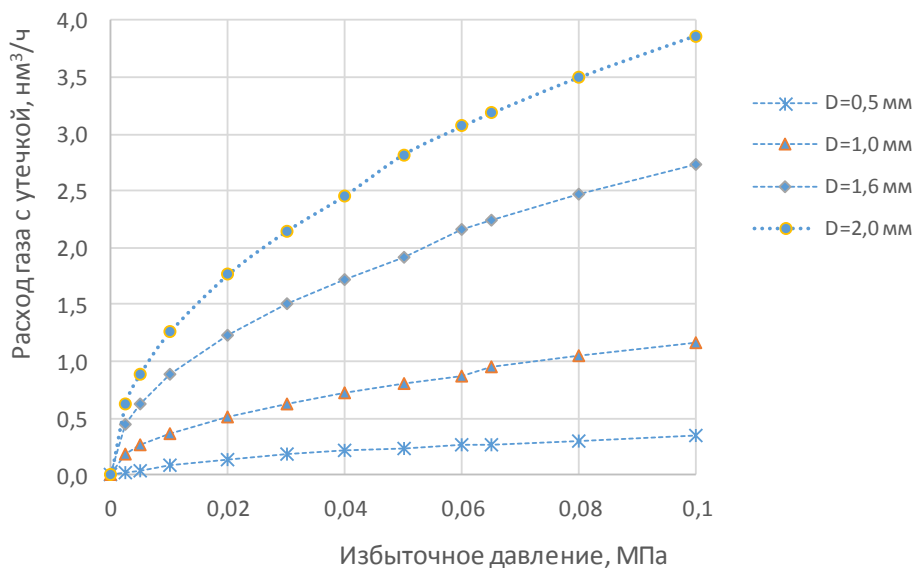


Рис. 6. Характеристики расхода газа с утечкой в зависимости от избыточного давления газа в трубе и диаметра отверстий

Fig. 6. Characteristics of the gas flow rate with leakage depending on the excess gas pressure in the pipe and the diameter of the holes

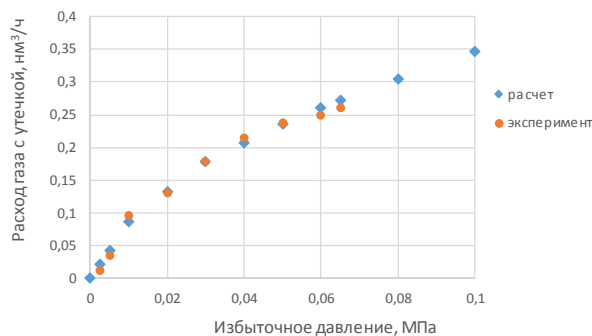


Рис. 5. Зависимость расхода газа с утечкой от избыточного давления газа в трубе для диаметра отверстия $D=0,35$ мм

Fig. 5. Dependence of the gas flow rate with leakage on the excess gas pressure in the pipe for the hole diameter $D=0,35$ mm

Аналогичные зависимости получены и для других диаметров отверстий 0,5; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,4; 1,6; 2,0 мм. Сравнительный анализ расчетных данных с экспериментальными показал, что расчетные данные хорошо соотносятся с экспериментальными данными $\delta=5\%$.

Аналитическое моделирование характеристик при избыточном давлении в трубе $0 < P_k \leq 0,1$ МПа

Применяя разработанный стенд, проведены экспериментальные исследования. Давление в источнике утечки поднималось ступенчато, при каждом значении давления фиксировался расход газа с утечкой. Для моделирования утечки использовались съемные заглушки с отверстиями разного диаметра. Полученные зависимости расхода газа от избыточного давления и диаметра отверстий приведены на рис. 6.

Характеристики (рис. 6) представляют собой серию зависимостей от двух параметров: избыточного давления в трубе (P_u) и диаметра отверстия (D), имитирующего утечку. Для представления характеристики (рис. 6) применялся метод асимптотических координат. В результате получена аналитическая зависимость Q_p от P_u и D , формула (7):

$$Q_p = (1,1676D^{1,7525})(13,44(10P_u)^5 - 36,881(10P_u)^4 + 37,29(10P_u)^3 - 17,378(10P_u)^2 + 45,301P_u). \quad (7)$$

На рис. 7 проиллюстрирован график зависимостей линейной концентрации метана в области утечки, полученный по экспериментальным данным для топливного газа.

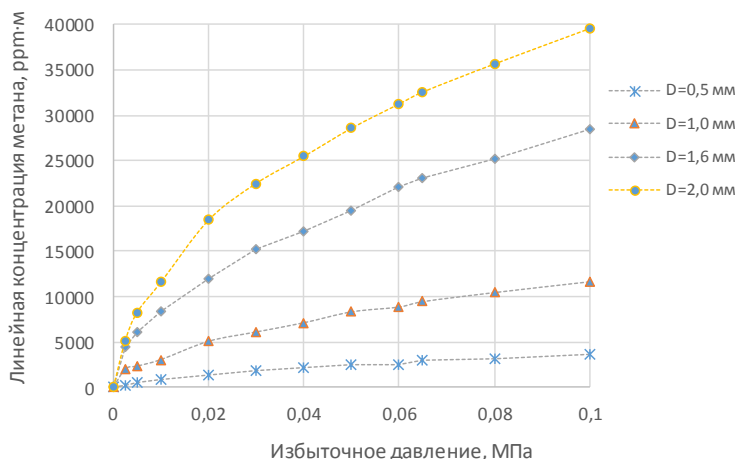


Рис. 7. Зависимости линейной концентрации метана в области утечки от избыточного давления газа в трубе и диаметра отверстия

Fig. 7. Dependences of the linear methane concentration in the leak area on the excess gas pressure in the pipe and the hole diameter

Произведя моделирование методом асимптотических координат получим аналитическую зависимость C_p от P_u и D , формула (8):

$$C_p = (11957D^{1,7525})(10,127(10P_u)^5 - 28,084(10P_u)^4 + 28,924(10P_u)^3 - 14,009(10P_u)^2 + 40,438P_u). \quad (8)$$

Для определения зависимости $Q_p=f(C_p, D)$ выразим D в уравнении (8), получим выражение, формула (9):

$$D = \left[\frac{c_p}{11957 \left(\frac{10,127(10P_u)^5 - 28,084(10P_u)^4 + 28,924(10P_u)^3 - 14,009(10P_u)^2 + 40,438P_u}{11957} \right)^{0,57}} \right] \quad (9)$$

Подставим (9) в (7), получим:

$$Q_p = 0,0001C_p \times \left(\frac{13,44(10P_u)^5 - 36,881(10P_u)^4 + 37,29(10P_u)^3 - 17,378(10P_u)^2 + 45,301P_u}{10,127(10P_u)^5 - 28,084(10P_u)^4 + 28,924(10P_u)^3 - 14,009(10P_u)^2 + 40,438P_u} \right) \quad (10)$$

Формула (10) применима в диапазоне значений избыточного давления газа $0 < P_u < 0,1$ МПа, получена для природного газа с содержанием метана (CH_4) – 86,5 %.

Расход метана в измеренном с утечкой газе определяется по формуле (11):

$$Q_{p(CH_4)} = 8,7 \cdot 10^{-5} C_p \times \left(\frac{13,44(10P_u)^5 - 36,881(10P_u)^4 + 37,29(10P_u)^3 - 17,378(10P_u)^2 + 45,301P_u}{10,127(10P_u)^5 - 28,084(10P_u)^4 + 28,924(10P_u)^3 - 14,009(10P_u)^2 + 40,438P_u} \right) \quad (11)$$

Для определения расхода измеренного газа с утечкой необходим его компонентный состав. Расход по компонентам измеренного с утечкой газа определяется по формуле (12):

$$Q_{pi} = \frac{Q_{p(CH_4)} X_i}{X_{CH_4}}, \quad (12)$$

где X_i – концентрация i -го компонента газа, %; X_{CH_4} – концентрация метана в составе измеренного с утечкой газа, %.

Аналитическое моделирование характеристик при избыточном давлении в трубе $0,1 < P_u \leq 10,0$ МПа

Характеристики расхода метана с утечкой для диапазона давлений $0,1 < P_u < 10,0$ МПа получим расчетным методом по итоговой формуле (6) с учетом того, что расчетные данные хорошо соотносятся с экспериментальными.

На рис. 8 приведены зависимости расхода газа с утечкой в зависимости от избыточного давления и диаметра отверстий.

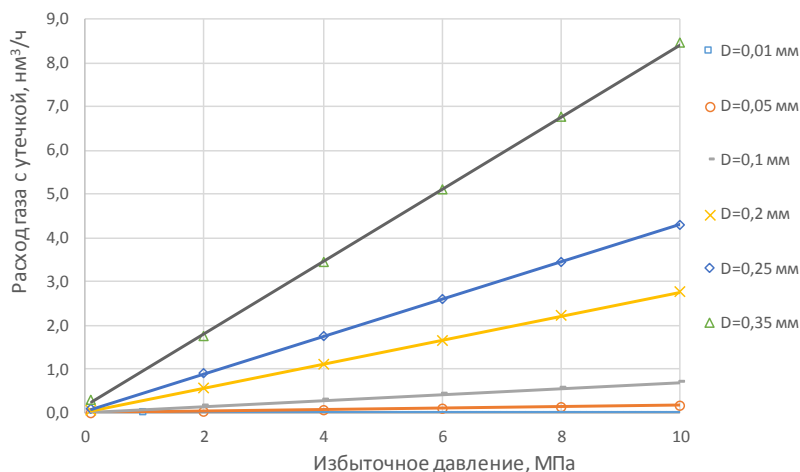


Рис. 8. Характеристики расхода метана с утечкой в зависимости от избыточного давления в трубе и диаметра отверстий

Fig. 8. Characteristics of methane flow with leakage depending on the excess pressure in the pipe and the diameter of the holes

Характеристики (рис. 8) представляют собой серию зависимостей от двух параметров: избыточного давления в трубе ($P_{и}$) и диаметра отверстия (D), имитирующего утечку. Произведя моделирование, получим аналитическую зависимость Q_p от $P_{и}$ и D , формула (13):

$$Q_p = D^2(6,825P_{и} + 0,692). \quad (13)$$

На рис. 9 проиллюстрирован графоаналитический способ определения линейной концентрации метана в области утечки, основанный на экспериментальных данных.

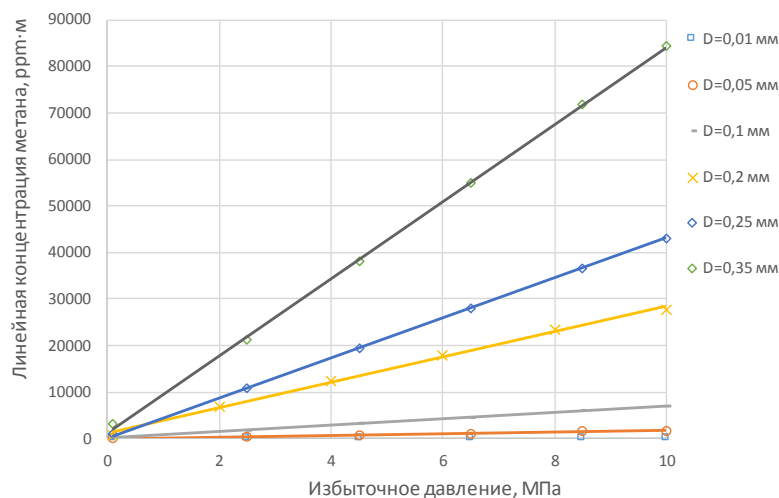


Рис. 9. Графоаналитический способ определения линейной концентрации метана в области утечки, основанный на экспериментальных данных

Fig. 9. Graphoanalytical method for determining the linear methane concentration in the leakage area, based on experimental data

Путем моделирования характеристик (рис. 8) получим аналитическую зависимость C_p от $P_{и}$ и D , формула (14):

$$C_p = D^2(67813,5P_{и} + 3563,32). \quad (14)$$

Для определения зависимости $Q_p = f(C_p, D)$ выразим D в формуле (14), получим выражение:

$$D = \sqrt{\frac{C_p}{(67813,5P_{и} + 3563,32)}}. \quad (15)$$

Подставим формулу (15) в (13), получим:

$$Q_{p(\text{CH}_4)} = \frac{C_p}{(67813,5P_{и} + 3563,32)}(6,825P_{и} + 0,692). \quad (16)$$

Формула (16) применима в диапазоне значений избыточного давления газа $0,1 < P_{и} \leq 10,0$ МПа, полученная для метана (CH_4). Для определения утечки компонентов природного газа используется формула (12).

На основе проведенных исследований аналитическая методика была реализована в виде программы Gas leaks для ПК Microsoft Windows 7, 10 (рабочее окно программы приведено на рис. 10), созданы приложения для смартфонов под Ios и Android.

| ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ | | СВОЙСТВА ГАЗА | | УТЕЧКИ ГАЗА ПО КОМПОНЕНТАМ | |
|--|--------------------|-----------------------|---------|----------------------------|-------------------|
| Название | БТПГ | КОМПОНЕНТЫ ГАЗА | % объем | Расход газа, кг/3ч | Расход газа, кг/ч |
| Функциональный узел | Кран | Бензол | 0 | 0,0 | 0,0 |
| Место утечки | В уплотнении штока | Гелий | 0,041 | 0,00000397 | 0,00000274 |
| Дата/день/месяц/год | 05 / 06 / 2020 | Углекислый газ | 0,01 | 0,00000097 | 0,00000067 |
| Время | 16 : 02 | Деканы | 0 | 0,0 | 0,0 |
| ПАРАМЕТРЫ УТЕЧКИ | | Этан | 10,7493 | 0,00103982 | 0,00071956 |
| Исходное давление в источнике утечки (P _{ис}) бар | 25 | Сероводород | 0 | 0,0 | 0,0 |
| Плотность газа (ρ), кг/м ³ | 0,692 | Изобутан | 0,326 | 0,00002154 | 0,00002182 |
| ЛИНЕЙНАЯ КОНЦЕНТРАЦИЯ МЕТАНА В УТЕЧКЕ (C_{ли}), ppm/m | | Изопентан | 0,01 | 0,00000097 | 0,00000067 |
| 1-я точка измерения | 78 | Метан | 81,2918 | 0,00796367 | 0,00544166 |
| 2-я точка измерения | 75 | Несопентан | 0,01 | 0,00000097 | 0,00000067 |
| 3-я точка измерения | 77 | Азол | 2,6823 | 0,00025847 | 0,00017955 |
| 4-я точка измерения | 79 | Кислород | 0,4001 | 0,0000387 | 0,00002678 |
| 5-я точка измерения | 76 | Пропан | 4,3205 | 0,00041794 | 0,00028921 |
| 6-я точка измерения | 75 | Толуол | 0 | 0,0 | 0,0 |
| 7-я точка измерения | 72 | Чикадианы | 0 | 0,0 | 0,0 |
| 8-я точка измерения | 80 | Ксилол | 0 | 0,0 | 0,0 |
| 9-я точка измерения | 78 | n-Бутан | 0,148 | 0,00001441 | 0,00000997 |
| Значения вводить через <-> | | n-Гептан | 0 | 0,0 | 0,0 |
| <input type="button" value="Расчитать"/> | | n-Гексан | 0 | 0,0 | 0,0 |
| <input type="button" value="Вернуться в главное меню"/> | | n-Нонан | 0 | 0,0 | 0,0 |
| | | n-Октан | 0 | 0,0 | 0,0 |
| | | n-Пентан | 0,01 | 0,00000097 | 0,00000067 |
| | | Суммарные утечки газа | 100,0 | 0,00967339 | 0,00669398 |

Рис. 10. Рабочее окно программы Gas leaks с примером расчета
 Fig. 10. Gas leaks working window with calculation example

Разработанная методика применима для газов с любым компонентным составом, главное, чтобы в газе присутствовал метан, т. к. прибор Laser methan mini предназначен только для обнаружения метана в метаносодержащих газах. Программа позволяет пересчитать измеренные значения линейной концентрации метана в области утечки с использованием данных по компонентному составу газа с учетом плотности газа и давления в источнике в суммарный расход газа с утечкой в объемном или массовом выражении. Также выводятся сведения по расходу газа с утечкой раздельно по компонентам газа.

Преимуществом разработанной методики является возможность измерения объема утечки газа, содержащего токсичные компоненты. При измерении утечек газа, содержащего сероводород, данный метод будет безопасным для человека, т. к. измерение производится на удалении от места утечки бесконтактным способом. Измерения могут производиться также через стекло, через которое измерительный луч беспрепятственно проникает, что является еще одним достоинством метода, расширяя возможные области его применения на объектах нефтегазовой отрасли.

Предлагаемая методика может найти широкое применение на объектах, в технологических процессах которых используются углеводородные газы, в том числе с содержанием в своем составе токсичных компонентов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Парижское соглашение по климату. URL: <http://docs.cntd.ru/document/542655698> (дата обращения: 24.10.2020).
2. Постановление «О принятии Парижского соглашения» от 21 сентября 2019 года № 1228. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/72661694/> (дата обращения: 24.10.2020).
3. Стратегия долгосрочного развития российской федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года. URL: https://www.economy.gov.ru/material/file/babacbb75d32d90e28d3298582d13a75/proekt_strategii.pdf (дата обращения: 24.10.2020).
4. De Oliveira Melo R., Costa M.G.F. Detecting natural gas leaks using digital images and novelty filters Filho C.F.F.C. // Lecture Notes in Computer Science. – 2012. – V. 7326 LNAI. – P. 242–249.

Выводы

1. Разработан и изготовлен экспериментальный стенд, позволяющий моделировать утечки газа различной интенсивности. На стенде производятся количественные измерения объема утечек счетчиком расхода газа и линейной концентрации метана в области утечки лазерным детектором метана.
2. На экспериментальном стенде получены эмпирические данные по объему утечек и линейной концентрации метана в области утечки в зависимости от площади отверстия, моделирующего утечку различной интенсивности.
3. Разработаны аналитические зависимости расхода газа с утечкой от избыточного давления газа в источнике утечки и линейной концентрации метана в области утечки для двух режимов истечения газа, определяемых давлением газа $P_{и}=0-0,1$ МПа и $P_{и}=0,1-10,0$ МПа. Установлено, что относительная погрешность моделей не превышает 5 %.
4. Произведено сравнение расчетных данных с экспериментальными, полученными в промышленных условиях. Результаты сравнения расчетных данных с экспериментальными показывают, что различие в результатах не превышает 14 %.
5. Investigation of the spatial distribution of methane sources in the greater toronto area using mobile gas monitoring systems / S. Ars, F. Vogel, C. Arrowsmith, E. Knuckey, J Lavoie., C. Lee, N.M. Pak, J.L. Phillips, D. Wunch, S. Heerah // Environmental Science and Technology. – 2020. – V. 54. – № 24. – P. 15671–15679.
6. Аколова Г.С., Дорохова Е.В., Попов П.В. Оценка объемов потерь метана с утечками от технологического оборудования газотранспортных объектов ОАО «Газпром» // Охрана окружающей среды, энергосбережение и охрана окружающей среды в нефтегазовом комплексе: инновации, технологии, перспективы. – 2013. – № 2. – С. 63–67.
7. Лурье М.В., Мусайлов И.Т., Лысенко Н.О. Эффективный метод расчета утечек газа через сквозные отверстия в стенках газопроводов и сосудов высокого давления // Территория Нефтегаз. – 2020. – № 3–4. – С. 110–116.

8. Математическое моделирование утечки природного газа из трубопровода низкого давления / А.А. Паранук, П.С. Кунина, М.А. Меретуков, Р.Б. Кохужева, Е.В. Рябухин // Перспективы науки. – 2020. – № 11 (134). – С. 215–222.
9. Эминов Р.А., Мурсалов Н.З. Разработка новых методов обнаружения мест утечек углеводородного газа // Контроль. Диагностика. – 2019. – № 5. – С. 60–64.
10. СТО Газпром 027-2006. Типовая программа оценки эмиссии природного газа на объектах ОАО «Газпром». – М.: ООО «ИРЦ Газпром», 2006. – 43 с.
11. СТО Газпром 031-2007. Методика проведения измерений объемов эмиссии метана в атмосферу на объектах ОАО «Газпром». – М.: ООО «ИРЦ Газпром», 2007. – 39 с.
12. Natural gas leaks and tree death: a first-look case-control study of urban trees in Chelsea, MA USA / C. Schollaert, E. Polka, M.K. Scammell, R.C. Ackley, A. de Santis // Environmental Pollution. – 2020. – V. 263. – P. 114464.
13. Investigation of the spatial distribution of methane sources in the greater Toronto area using mobile gas monitoring systems / S. Ars, F. Vogel, C. Arrowsmith, E. Knuckey, J. Lavoie, C. Lee, N.M. Pak, J.L. Philips, D. Wunch, S. Heerah // Environmental Science and Technology. – 2020. – V. 54. – № 24. – P. 15671–15679.
14. Hou Q., Zhu W. An ekf-based method and experimental study for small leakage detection and location in natural gas pipelines // Applied Sciences (Switzerland). – 2019. – V. 9. – № 15. – P. 3193.
15. Lukonge A.B., Cao X., Pan Z. Experimental study on leak detection and location for gas pipelines based on acoustic waves using improved Hilbert–Huang transform // Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice. – 2021. – V. 12. – № 1. – P. 40–45.
16. A review of methane gas detection sensors: recent developments and future perspectives / T. Aldhafeeri, M.-K. Tran, R. Vrolyk, M. Pope, M. Fowler // Inventions. – 2020. – V. 5. – № 3. – P. 1–18.
17. Gas leak detection by diode laser absorption spectrometry / R. Uhl, T. Reinhardt, U. Haas, J. Franzke // Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy. – 1999. – V. 54. – № 12. – P. 1737–1741.
18. Иванов Э.С., Китаев С.В. Ресурсосберегающая технология отключения участка магистрального газопровода в ремонт с выработкой газа компрессорной станцией на ГПА и потребителя через газораспределительную станцию // Территория Нефтегаз. – 2015. – № 6. – С. 40–46.
19. Гадельшина А.Р., Китаев С.В., Галикеев А.Р. Практическое решение задачи экономии природного газа путем выработки его разнотипными газоперекачивающими агрегатами, работающими по схеме в параллель // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2016. – № 1. – С. 5–8.
20. Ридель И.А., Дудин А.В. Инновационные методы реализации программы оценки объема эмиссии природного газа на объектах дочерней компании // Газовая промышленность. – 2019. – № 3 (781). – С. 114–119.

Поступила 02.09.2021 г.

Информация об авторах

Байков И.Р., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой промышленной теплоэнергетики Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Китаев С.В., доктор технических наук, профессор, профессор кафедры транспорта и хранения нефти и газа Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Шаммазов А.М., доктор технических наук, академик академии наук Республики Башкортостан; президент Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Зубаилов Г.И., кандидат технических наук, директор Научно-Технического центра «Оценка соответствия» АО «Гипрониигаз».

UDC 622.691.24

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR DETERMINING INORGANIZED EMISSIONS OF NATURAL GAS TO THE ATMOSPHERE

Igor R. Baykov¹,
pte@rusoil.net

Sergey V. Kitaev¹,
svkitaev@mail.ru

Airat M. Shammazov^{2,1},
info@rusoil.net

Gadzhiakhmed I. Zubailov³,
adk_gadzi@niigaz.ru

¹ Ufa State Petroleum Technical University,
1, Kosmonavtov street, Ufa, 450062, Russia.

² Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan,
15, Kirov street, Ufa, 450008, Russia

³ Leading Research and Planning Institute on gas distribution, Giproniigaz PLC,
54, Kirov avenue, Saratov, 410012, Russia.

The relevance of research. Natural gas is currently the uncontested hydrocarbon resource used primarily as a fuel. The main component of natural gas is methane, its content in gas exceeds 95 %. When natural gas is transported through pipelines, fugitive emissions inevitably appear through detachable connections. Methane is a greenhouse gas and leads to climate warming. The Paris Agreement, ratified by Russia, provides for the reduction of greenhouse gas emissions to reduce the burden on the environment. The results discussed in the article are relevant, since these recommendations will improve the efficiency of control over fugitive emissions of methane into the environment.

The purpose of the research was to develop a method for determining the volume of natural gas leaks into the atmosphere through detachable leaky joints on gas pipelines using a laser methane detector that records the amount of leakage. The method involves the development of analytical models for converting the linear methane concentration in the area of the leak into volumetric values.

Objects: an experimental setup designed to simulate natural gas leaks into the atmosphere. The stand allows simulating leaks of varying intensity using special replaceable plugs with holes of different diameters.

Methods. To substantiate the proposed provisions, the methods of least squares, asymptotic coordinates, and order statistics were used.

Results. A technique for quantitative determination of methane emissions through detachable connections of a gas transmission system is presented. To develop the methodology, a laboratory stand was specially designed and manufactured, with the help of which empirical data were obtained for analytical models for converting the linear concentration of methane in the leakage area into volume concentration.

Key words:

Pipeline gas transportation, natural gas leaks, methane emission, laser detector, leak monitoring.

REFERENCES

1. *Parizhskoe soglasenie po klimatu* [The Paris Climate Agreement]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/542655698> (accessed 24 October 2020).
2. *Postanovlenie «O prinyatii Parizhskogo soglasheniya» ot 21 sentyabrya 2019 goda № 1228* [Resolution «On the adoption of the Paris Agreement», September 21, 2019, no. 1228]. Available at: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/72661694/> (accessed 24 October 2020).
3. *Strategiya dolgosrochnogo razvitiya rossiyskoy federatsii s nizkim urovнем vybrosov parnikovyykh gazov do 2050 goda* [Strategy for the long-term development of the Russian Federation with a low level of greenhouse gas emissions until 2050]. Available at: https://www.economy.gov.ru/material/file/babacbb75d32d90e28d3298582d13a75/proekt_strategii.pdf (accessed 24 October 2020).
4. De Oliveira Melo R., Costa M.G.F. Detecting natural gas leaks using digital images and novelty filters Filho C.F.F.C. *Lecture Notes in Computer Science*, 2012, vol. 7326 LNAI, pp. 242–249.
5. Ars S., Vogel F., Arrowsmith C., Knuckey E., Lavoie J., Lee C., Pak N.M., Phillips J.L., Wunch D., Heerath S. Investigation of the spatial distribution of methane sources in the greater toronto area using mobile gas monitoring systems. *Environmental Science and Technology*, 2020, vol. 54, no. 24, pp. 15671–15679.
6. Akopova G.S., Dorokhova E.V., Popov P.V. Estimation of methane losses with leaks from technological equipment of Gazprom gas transportation facilities. *Environmental protection, energy saving and environmental protection in the oil and gas complex: innovations, technologies, prospects*, 2013, no. 2, pp. 63–67. In Rus.
7. Lurie M.V., Musailov I.T., Lysenko N.O. An effective method for calculating gas leaks through through holes in the walls of gas pipelines and high-pressure vessels. *Territory Neftegaz*, 2020, no. 3–4, pp. 110–116. In Rus.
8. Paranuk A.A., Kunina PS, Meretukov M.A., Kokhuzheva R.B., Ryabukhin E.V. Mathematical modeling of natural gas leakage from a low-pressure pipeline. *Prospects for science*, 2020, no. 11 (134), pp. 215–222. In Rus.
9. Eminov R.A., Mursalov N.Z. Development of new methods for detecting leaks of hydrocarbon gas. *Control. Diagnostics*, 2019, no. 5, pp. 60–64. In Rus.
10. *STO Gazprom 027-2006. Tipovaya programma otsenki emissii prirodnoogo gaza na obektakh OAO «Gazprom»* [STO Gazprom 027-2006. A standard program for assessing natural gas emissions at Gazprom facilities]. Moscow, LLC «IRC Gazprom» Publ., 2006. 43 p.
11. *STO Gazprom 031-2007. Metodika provedeniya izmerenij obemov emissii metana v atmosferu na obektakh OAO «Gazprom»* [STO Gazprom 11-2005. Methodological guidelines for the calculation

- of gross emissions of hydrocarbons (in total) into the atmosphere in JSC «Gazprom»]. Moscow, LLC «IRC Gazprom» Publ., 2005. 39 p.
12. Schollaert C., Polka E., Scammell M.K., Ackley R.C., DeSantis A. Natural gas leaks and tree death: a first-look case-control study of urban trees in Chelsea, MA USA. *Environmental Pollution*, 2020, vol. 263, pp. 114464.
 13. Ars S., Vogel F., Arrowsmith C., Knuckey E., Lavoee J., Lee C., Pak N.M., Philips J.L., Wunch D., Heerah S. Investigation of the spatial distribution of methane sources in the greater toronto area using mobile gas monitoring systems. *Environmental Science and Technology*, 2020, vol. 54, no. 24, pp. 15671–15679.
 14. Hou Q., Zhu W. An ekf-based method and experimental study for small leakage detection and location in natural gas pipelines. *Applied Sciences (Switzerland)*, 2019, vol. 9, no. 15, pp. 3193.
 15. Lukonge A.B., Cao X., Pan Z. Experimental study on leak detection and location for gas pipelines based on acoustic waves using improved Hilbert–Huang transform. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 2021, vol. 12, no. 1, pp. 40–45.
 16. Aldhfeeri T., Tran M.-K., Vrolyk R., Pope M., Fowler M. A review of methane gas detection sensors: recent developments and future perspectives. *Inventions*, 2020, vol. 5, no 3, pp. 1–18.
 17. Uhl R., Reinhardt T., Haas U., Franzke J. Gas leak detection by diode laser absorption spectrometry. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 1999, vol. 54, no. 12, pp. 1737–1741.
 18. Ivanov E.S., Kitaev S.V. Resource-saving technology of the main gas pipeline section in repair with the production of gas compressor station on the GPU and consumer through a gas distribution station. *Territory Neftegaz*, 2015, no. 6, pp. 40–46. In Rus.
 19. Gadelshina A. R., Kitaev S. V., Galikeev A. R. Practical solution of the problem of saving natural gas by producing it with different types of gas pumping units operating according to the scheme in parallel. *Transportation and storage of petroleum products and hydrocarbon raw materials*, 2016, no. 1, pp. 5–8. In Rus.
 20. Ridel I.A., Dudin A.V. Innovative methods for implementing the program for assessing the volume of natural gas emissions at the facilities of a subsidiary company. *Gas Industry*, 2019, no. 3 (781), pp. 114–119. In Rus.

Received: 2 September 2021.

Information about the authors

Igor R. Baykov, Dr. Sc., professor, head of the Industrial Heat Power Engineering Department, Ufa State Petroleum Technical University.

Sergey V. Kitaev, Dr. Sc., professor, Ufa State Petroleum Technical University.

Airat M. Shammazov, Dr. Sc., academician, Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan; president, Ufa State Petroleum Technical University.

Gadziakhmed I. Zubailov, Can. Sc., director, Scientific and Technical Center «Conformity Assessment» of JSC «Gipronigaz».