

УДК 528.711: 528.835

**НОВЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТ УТЕЧЕК ИЗ ГАЗОВЫХ
ТРУБОПРОВОДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕСПИЛОТНЫХ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

**NEW METHOD FOR GAS PIPELINES LEAKAGE PLACES
DETERMINING USING UNMANNED AERIAL VEHICLES**

Н.З. Мурсалов

Институт водных проблем, г. Баку, Азербайджанская Республика

Nemat Z. Mursalov

Institute of Water Problems, Baku, Azerbaijan Republic

e-mail: mursalovnemat@mail.ru

Аннотация. Обзор научно-технической литературы по применению беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) с целью обнаружения утечек из газовых трубопроводов показал, что используются только оптические сенсоры, установленные на БПЛА. Это объясняется в основном сильным поглощением ультразвука в воздухе (по экспоненциальному закону), а также собственным акустическим излучением БПЛА. Вместе с тем, проведенный анализ показывает, что собственные акустические излучения БПЛА в диапазоне свыше 4 кГц уменьшаются до 0, ультразвуковое излучение потока газа, вытекающего из места утечки, в диапазоне 10 кГц может быть зарегистрировано на расстоянии до 50–60 м.

Автором предлагается метод обнаружения крупных утечек углеводородного газа с помощью пары низколетящих БПЛА, оснащенных ультразвуковыми датчиками и средствами GPS/Ins навигации. Дано теоретическое обоснование предлагаемого метода парного использования БПЛА для определения места утечки на основе определения

ультразвукового излучения газового потока, исходящего из места утечки. Разработан алгоритм реализации предложенного метода, основанный на применении корреляционно-экстремального метода для определения задержки распространения сигнала до второго БПЛА по сравнению со временем достижения сигналом первого БПЛА.

Abstract. A review of scientific and technical literature on the use of unmanned aerial vehicles (UAV) in order to detect leaks from gas pipelines has shown that only optical sensors mounted on UAV are used. This is mainly due to the strong absorption of ultrasound in the air (exponentially), as well as the own acoustic radiation of the UAV. At the same time, the analysis performed shows that the UAV own acoustic emissions in the range above 4 kHz are reduced to 0, and the ultrasonic radiation of the gas stream flowing out of the leak in the range of 10 kHz can be detected at a distance of 50–60 m.

The author proposes a method for detecting large hydrocarbon gas leaks using a pair of low-flying UAV equipped with ultrasonic sensors and GPS/Ins navigation tools. A theoretical justification is given for the proposed method of pairwise use of UAV to determine the location of a leak based on the definition of ultrasonic radiation from a gas stream coming from the point of leakage. An algorithm has been developed for implementing the proposed method, based on the application of a correlation-extremal method for determining the signal propagation delay to the second UAV compared to the time it reaches the first UAV signal.

Ключевые слова: трубопровод, утечка, ультразвук, БПЛА, задержка сигнала

Key words: pipeline, leak, ultrasound, UAV, signal delay

Как отмечается в работе [1], глобальная сеть трубопроводов транспортировки нефти и газа имеет суммарную длину более 3 млн км и

оценивается в 8,7 млрд долларов США по состоянию на 2014 г. Согласно данным Управления Консервации Энергоресурсов (ERCБ), количественная оценка утечек из трубопроводов в виде числа утечек на каждые 1000 км в течение года (длина трубопроводов, умноженная на интервал времени) в Канаде равна 1,5 (2012 г.), а в России этот показатель доходит до значения 110-140. В Европе данный показатель достаточно низкий: 1,2 (1970 г.); 0,23 для нефтепроводов (2015 г.) и 0,33 (2013 г.).

Трубопроводы, включая трубы, компрессоры и насосы, часто располагаются в такой местности, где трудно осуществить их мониторинг. Авария указанного оборудования может нанести непоправимый урон окружающей среде и чревата большими экономическими потерями. Вышеуказанное подчеркивает важность и актуальность разработки более совершенных методов контроля состояния нефтегазовых трубопроводов.

Традиционные процедуры мониторинга часто ограничиваются методами визуального (оптического) наблюдения, методами анализа акустических волн и методами масс-балансных измерений. Углеводороды могут быть проанализированы как в видимом (0,4-0,8 мкм), так и в термальном (8-14 мкм) диапазонах. При спектральном разрешении 0,1 нм можно идентифицировать специфические характеристики углеводородов, для чего также пригодны методы флуоресцентной эмиссии. Однако, безусловно, наибольший эффект от контроля состояния трубопроводов можно получить проведя on-line мониторинг состояния трубопроводов.

Как отмечается в работе [2], такие методы обнаружения утечек из трубопроводов разделяются на две группы.

1. прерывистые методы;
2. непрерывные методы.

К прерывистым методам относятся такие, как инспектирование с помощью вертолета, размещение внутри трубы передвигаемого датчика, использование специально натренированных собак и т.д. К непрерывным методам относят две подгруппы методов: а) вычислительные методы

мониторинга, или внутренние методы; (б) внешние методы обнаружения утечек. При внутреннем методе при вычислениях используют такие физические параметры для обнаружения утечек, как поток, давление и температура. При внешнем методе указанные показатели определяются с помощью внешней системы мониторинга.

Согласно работе [3], основными методами, применяемыми для обнаружения утечек, являются оптические и акустические методы. Оптические методы сильно подвержены негативному влиянию фонового излучения. Основным принципом акустического метода является то, что при возникновении утечки происходит нарушение баланса давления и силы трения, что приводит к образованию акустического сигнала. Акустические волны распространяются, подвергаясь таким физическим эффектам, как отражение, интерференция, рефракция, дифракция и абсорбция.

Как отмечается в работе [3], акустические датчики в основном устанавливаются вне трубопровода. В последние десятилетия сформировалось особое направление в мониторинге трубных линий, заключающееся в использовании беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в этих целях [3, 4].

Согласно [1], для обнаружения утечек углеводородов из трубопровода на БПЛА могут быть установлены такие технические средства, как мультиспектрометры видимого диапазона, термальные радиометры, включающие диапазон ближней ИК-области, гиперспектрометры, лидары, радары, лазерные флуоресцентные сенсоры, а также акустические датчики. Как отмечается в работе [4], для повышения геометрической точности проводимого мониторинга целесообразно использовать пару взаимосвязанных сенсоров, осуществляющих сканирование трубопровода, двигаясь в направлении прокладки трубы (рисунок 1).

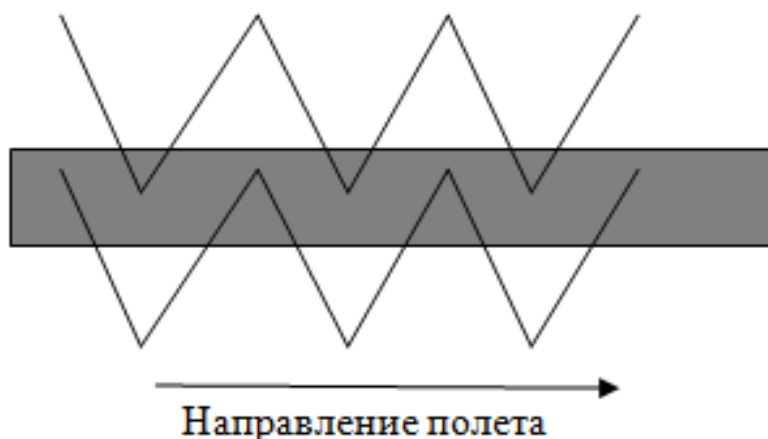


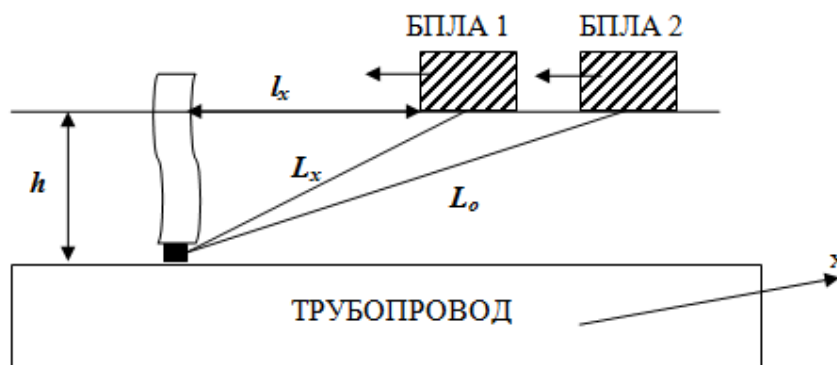
Рисунок 1. Использование пары сенсоров для увеличения пространственного разрешения проводимого мониторинга трубопроводов

Обзор литературы, посвященной применению БПЛА для обнаружения утечек из газовых трубопроводов, показал, что для данной цели используются только оптические сенсоры, установленные на БПЛА. Это в основном объясняется сильным поглощением ультразвука в воздухе по экспоненциальному закону [5], а также собственным акустическим излучением БПЛА.

Вместе с тем, проведенный анализ показывает, что собственные акустические излучения БПЛА в диапазоне свыше 4 кГц уменьшаются до нуля, ультразвуковое излучение потока газа, вытекающего из места утечки в диапазоне 10 кГц, может быть зарегистрировано на расстоянии до 50–60 м [5].

Учитывая вышесказанное, предлагается метод обнаружения крупных утечек углеводородного газа с помощью пары низколетящих БПЛА, оснащенных ультразвуковыми датчиками и средствами GPS/Ins навигации.

На рисунке 2 представлена схема, объясняющая принцип работы предлагаемого метода.



h – высота полета БПЛА; l_x – расстояние между первым БПЛА и перпендикуляром, нанесенным на точку утечки; L_x – расстояние между БПЛА 1 и местом возникновения утечки; L_o – расстояние между БПЛА 2 и местом утечки

Рисунок 2. Схематическое объяснение предлагаемого метода обнаружения утечки с помощью пары низколетящих БПЛА, оснащенных ультразвуковыми сенсорами

Алгоритм предлагаемого метода заключается в следующем.

1. При помощи корреляционно-экстремального метода устанавливается показатель ΔT , определяющий задержку распространения сигнала до БПЛА 2 по сравнению со временем достижения сигналом БПЛА 1.
2. С помощью бортовых GPS определяются координаты БПЛА 1 и БПЛА 2 по оси x .
3. По специально выведенной формуле вычисляется величина l_x .

Несколько подробнее рассмотрим вышеуказанные пункты алгоритма реализации предлагаемого метода.

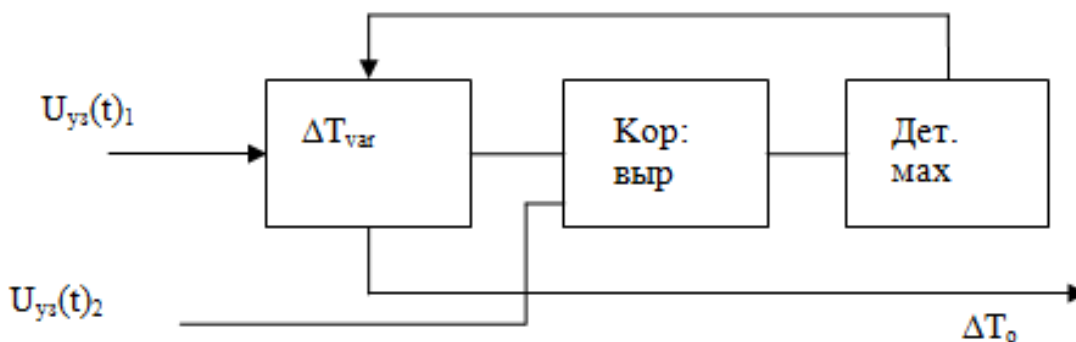
Блок-схема устройства, реализующего корреляционно-экстремальный метод, показана на рисунке 3.

Во втором пункте алгоритма реализации предлагаемого метода реализуются два подпункта:

- определяются координаты БПЛА 1, БПЛА 2, используя для этого показания GPS, находящихся на борту беспилотников;
- вычисляется величина Δl – расстояние между двумя беспилотниками по формуле:

$$\Delta l = GPS(\text{БПЛА 1}) - GPS(\text{БПЛА 2}), \quad (1)$$

где $GPS(\text{БПЛА 1})$, $GPS(\text{БПЛА 2})$ – показания GPS беспилотников по координате x .



ΔT_{var} – устройство управления задержкой сигнала $U_{yz}(t)_1$, поступающего на вход БПЛА 1;
 «Кор. выч» – устройство корреляционного вычислителя;
 «Дет. макс» – устройство обнаружения максимального сигнала на выходе корреляционного вычислителя $U_{k.b}$.

Рисунок 3. Блок-схема корреляционно-экстремального вычислителя задержки распространения ультразвука до БПЛА 2 по сравнению с моментом прихода сигнала на БПЛА 1

В *третьем пункте* алгоритма вычисляется величина l_x по специальной формуле, вывод которой приводится ниже.

Время T_1 достижения ультразвука БПЛА 1 определим как

$$T_1 = \frac{L_x}{V_s}, \quad (2)$$

где V_s – скорость распространения ультразвука.

Согласно (2), время T_2 достижения ультразвуком БПЛА 2 определим как

$$T_2 = \frac{L_0}{V_s}. \quad (3)$$

С учетом (2) и (3) промежуток времени ΔT определим как

$$\Delta T = \frac{L_0}{V_s} - \frac{L_x}{V_s} = \frac{L}{V_s} (L_0 - L_x). \quad (4)$$

Расстояния L_x и L_0 определим как

$$L_x = \sqrt{h^2 + l_x^2}, \quad (5)$$

$$L_0 = \sqrt{h^2 + l_0^2}. \quad (6)$$

С учетом (4)–(6) получаем:

$$\Delta T = \frac{1}{V_s} \sqrt{h^2 + (l_x + \Delta l)^2} - \sqrt{h^2 + l_x^2}. \quad (7)$$

Нетрудно показать, что выражение (7) может быть преобразовано в алгебраическое уравнение 4-ой степени в отношении l_x .

Следовательно, при наличии данных о величинах ΔT , h , V_s и Δl значение l_x может быть вычислено согласно известным процедурам решения алгебраического уравнения 4-ой степени.

Блок-схема алгоритма реализации метода показана на рисунке 4.

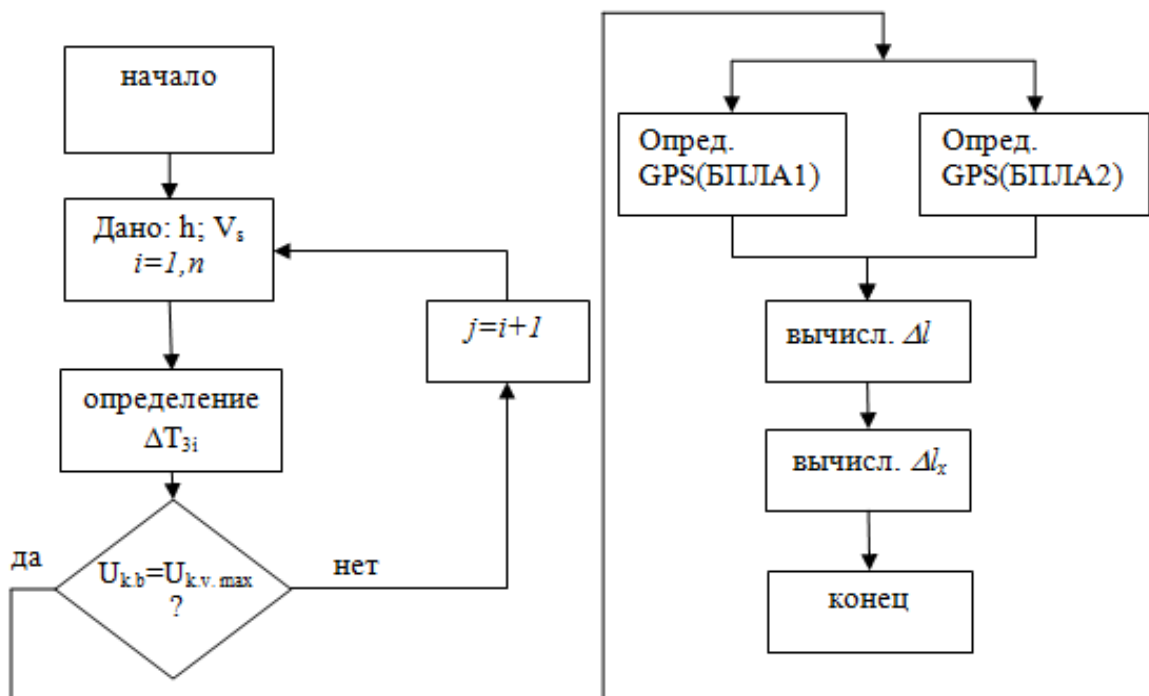


Рисунок 4. Блок-схема алгоритма реализации предлагаемого метода

Выводы

1. Предложен метод парного использования низколетящих БПЛА для определения места утечки с использованием ультразвукового излучения газового потока, исходящего из место утечки.
2. Разработан алгоритм реализации предлагаемого метода, основанный на применении корреляционно-экстремального метода для определения задержки распространения сигнала до второго БПЛА по сравнению со временем достижения сигналом первого БПЛА.
3. Дано теоретическое обоснование предлагаемого метода.

Список используемых источников

1. Gomez C., Green D.R. Small Unmanned Airborne Systems to Support Oil and Gas Pipeline Monitoring and Mapping // Arabian Journal of Geosciences. May, 2017. № 10. P. 202-214.
2. Boaz L., Kaijage Sh., Sinde R. An Overview of Pipeline Leak Detection and Location Systems // Pan African International Conference on Information Science, Computing and Telecommunications. 2014.
3. Adnan N.F., Ghazali V.F., Amin M.M., Hamat A.M.A. Leak Detection in Gas Pipeline by Acoustic and Signal Processing – Review // 3rd International Conference of Mechanical Engineering Research (ICMER 2015) IOP Publishing, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 100. 2015, 012013. doi:10.1088/1757-899X/100/1/012013.
4. Bretschneider T.R., Shetti K. UAV-Based Gas Pipeline Leak Detection.
5. Vetreno J.R. A Thesis Submitted to the Graduate Faculty of North Carolina State University in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science // Analytic Models for Acoustic Wave Propagation in Air. Electrical Engineering. Raleigh, NC. 2007.

References

1. Gomez C., Green D.R. Small Unmanned Airborne Systems to Support Oil and Gas Pipeline Monitoring and Mapping. *Arabian Journal of Geosciences*, May, 2017, No. 10, pp. 202-214.
2. Boaz L., Kaijage Sh., Sinde R. An Overview of Pipeline Leak Detection and Location Systems. *Pan African International Conference on Information Science, Computing and Telecommunications*, 2014.
3. Adnan N.F., Ghazali V.F., Amin M.M., Hamat A.M.A. Leak Detection in Gas Pipeline by Acoustic and Signal Processing – Review. *3rd International Conference of Mechanical Engineering Research (ICMER 2015) IOP Publishing, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 100*, 2015, 012013. doi:10.1088/1757-899X/100/1/012013.
4. Bretschneider T.R., Shetti K. *UAV-Based Gas Pipeline Leak Detection*.
5. Vetreno J.R. A Thesis Submitted to the Graduate Faculty of North Carolina State University in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science. *Analytic Models for Acoustic Wave Propagation in Air. Electrical Engineering*. Raleigh, NC, 2007.

Сведения об авторе

About the author

Мурсалов Немат Закир оглы, Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, инженер кафедры «Поиск и разведка месторождений нефти и газа», докторант Института водных проблем, г. Баку, Азербайджанская Республика

Nemat Z. Mursalov, Azerbaijan State Oil and Industrial University, Engineer of Search and Survey of Oil and Gas Deposits Department, Doctorant of Institute of Water Problems, Baku, Republic of Azerbaijan

e-mail: mursalovnemat@mail.ru