

УДК 528.7

**ВОПРОСЫ ОПТИМИЗАЦИИ ДИСТАНЦИОННОГО
ОБНАРУЖЕНИЯ УТЕЧЕК ГАЗА В ГАЗОПРОВОДАХ
С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ВЕТРА**

**ISSUES OF REMOTE DETECTION OPTIMIZATION
OF GAS LEAKAGE IN GAS PIPELINE
WITH ACCOUNT OF WIND INFLUENCE**

Н.З. Мурсалов

**Государственный институт водных проблем,
г. Баку, Азербайджанская Республика**

Nemat Z. Mursalov

**State Research Institute of Water Problems,
Baku, Republic of Azerbaijan**

e-mail: Nematmursalov@mail.ru

Аннотация. Для обнаружения утечек природного газа из трубопроводов перспективными техническими средствами являются инфракрасные дистанционные обнаружители, работающие по принципу преобразования Фурье. Рассмотрены вопросы оптимизации дистанционного обнаружения утечек газа в газопроводах с учетом влияния ветра. Проведенный анализ результатов известных исследований показал, что ветер является фактором, увеличивающим предельное значение обнаруживаемой величины концентрации газа. Осуществлена оптимизация нециклического режима измерений концентрации природного газа при наличии ветра с целью обнаружение утечки. Получено трансцендентное уравнение для вычисления оптимального по информационному критерию значения длительности проводимых измерений. Осуществлена

оптимизация циклического режима измерений концентрации газа с учетом влияния ветра. Получено уравнение, позволяющее определить наилучший режим проводимых измерений.

Abstract. For the natural gas leakage detection in pipelines, promising technical means are infrared remote detectors operating on the Fourier transform principle. The issues of remote detection optimization of gas leakage in gas pipeline with account of wind influence are considered. The analysis of the results of well-known studies showed that wind is a factor that increases the limiting value of a detectable gas concentration value. The optimization of the non-cyclic mode of measuring the concentration of natural gas in the presence of wind in order to detect leakage has been carried out. A transcendental equation for calculating the value of the duration of the measurements that is optimal according to the information criterion is obtained. The cyclic mode optimization of gas concentration measurements with account for wind effect has been carried out. An equation allowing to determine the best mode of measurements is obtained.

Ключевые слова: утечка газа, оптимизация, измерение, скорость ветра, функционал

Key words: gas leakage, optimization, measurement, wind speed, functional

Как отмечается в работе [1], одним из перспективных технических средств для обнаружения утечек природного газа из трубопроводов являются инфракрасные дистанционные обнаружители, работающие по принципу преобразования Фурье. Типичным представителем такого класса приборов является дистанционный обнаружитель «Therma CAM», работающий в диапазоне 3–5 мкм, являющийся достаточно чувствительным обнаружителем малых концентраций углеводородных газов. Соответствующие данные приведены в таблице 1.

Таблица 1. Дистанционный обнаружитель «Therma SAM»

Газы	Минимально обнаруживаемая утечка		
	Скорость утечки (г/ч)		
	при скорости ветра		
	0	0,8 м/с	2 м/с
Бензол	3,5	17,5	38,6
Этанол	0,7	3,5	14
Метанол	3,8	7,3	24,3
Пентан	3,0	6,1	17,7

Как видно из данных, приведенных в таблице 1, минимально обнаруживаемая скорость утечки существенно зависит от скорости ветра, что объясняется рассеянием утекшего газа в пространстве под воздействием ветра.

Вопросы моделирования рассеяния утекшего из трубопровода природного газа подробно рассмотрены в работе [2]. Согласно [2], распространение газа, вытекшего из поврежденного трубопровода, может быть исследовано на основе модели Паскуилла-Гиффорда, согласно которой концентрация газа может быть вычислена по формуле:

$$C(x, y, z) = \frac{2Q}{\pi\sigma_y\sigma_z \cdot v} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y^2}{\sigma_x^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2}\right)\right], \quad (1)$$

где C – концентрация, кг/м³;

Q – скорость утечки газа, кг/с;

σ_y и σ_z – дисперсионные коэффициенты, м;

x, y, z – направления, м;

v – скорость ветра, м/с.

Графическое отображение указанной модели показано на рисунке 1 [2].

Как видно из выражения (1), концентрация утекшего газа обратно пропорциональна скорости ветра.

При этом, согласно результатам исследований, проведенных в [2], значения коэффициентов σ_y и σ_z также зависят как от скорости ветра, так и от x , что приведено в таблице 2.

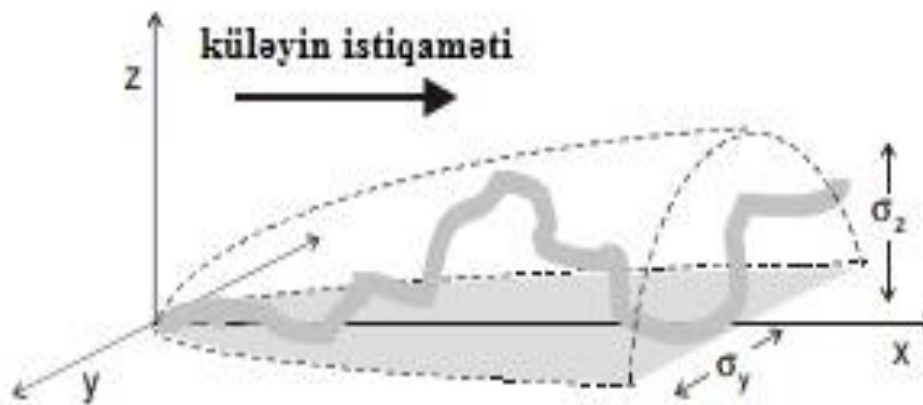


Рисунок 1. Графическое отображение модели Паскуилла-Гиффорда

Таблица 2. Значения коэффициентов σ_y и σ_z в зависимости от скорости ветра

Скорость ветра, м/с	σ_y , м	σ_z , м
1,0	$0,14 \cdot x^{0,098}$	$0,21 \cdot x^{0,97}$
1,8	$0,15 \cdot x^{0,39}$	$0,16 \cdot x^{0,93}$
2,5	$0,14 \cdot x^{0,54}$	$0,12 \cdot x^{0,94}$

Аналогичные исследования, проведенные в [3], выявили существенную зависимость концентрации газа в различных точках его распространения от скорости ветра. Так, в направлении Z в 5 м от места утечки концентрация газа при увеличении скорости от 1 до 10 м/с уменьшалась от 845 ppm – m до 84,5 ppm – m.

Более сложная модель, развитая в работе [4], показала изменение концентрации утекшего газа в зависимости от скорости ветра по его направлению.

Таким образом, с учетом вышеизложенного можно заключить, что в то время как минимально обнаруживаемая концентрация газа инфракрасным радиометром является постоянной величиной, минимально обнаруживаемая величина скорости утечки газа существенно зависит от скорости ветра. Указанное обстоятельство существенно влияет на информативность результатов серий диагностических измерений, проводимых инфракрасным

радиометром, в целях обнаружения утечек газа.

Очевидно, что для повышения достоверности проводимых диагностических работ необходимо оптимизировать всю процедуру проводимых измерений и добиться максимальной информативности результатов.

Целью настоящей статьи является исследование возможности оптимизации диагностических работ, проводимых инфракрасным дистанционным радиометром по обнаружению возможных утечек газа с магистральных газопроводов. Если учесть, что отсутствие всякой утечки газа из трубопровода эквивалентно отсутствию какой-либо фактической информации о скорости утечки, то далее рассматривается случай наличия такой утечки.

Рассмотрим наиболее простой случай, когда осуществляется зондирование газового облака в фиксированном направлении Y , что иллюстрируется на рисунке 2.

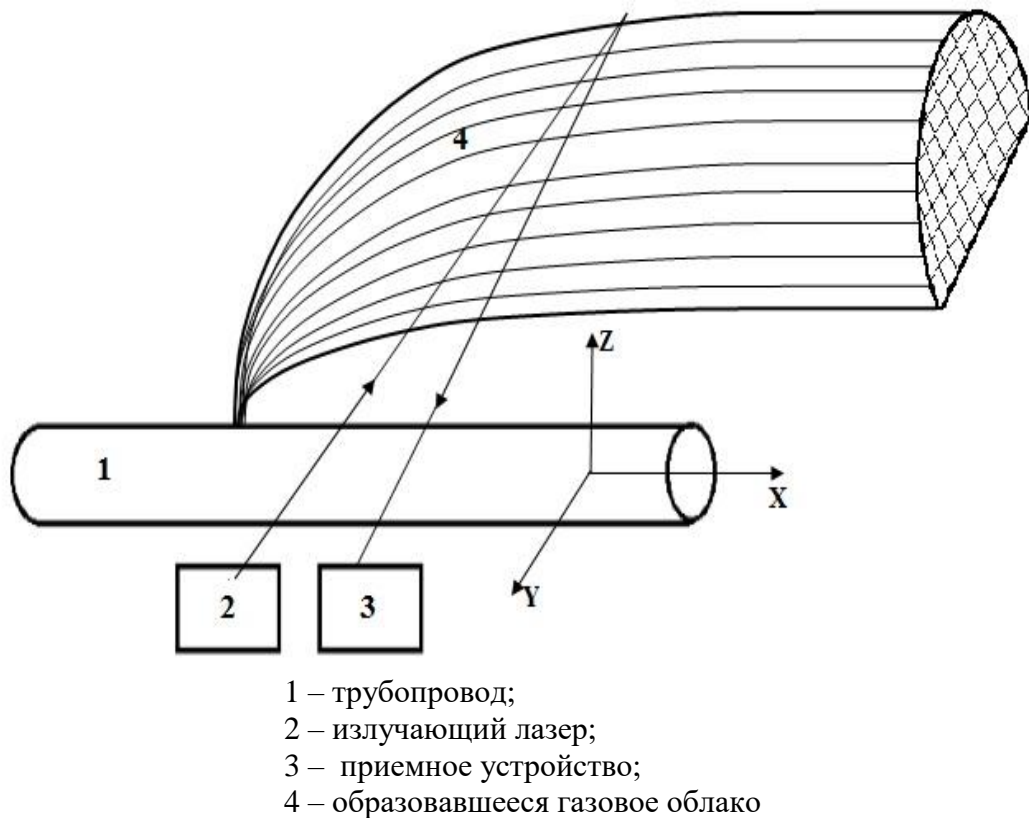


Рисунок 2. Зондирование газового облака в фиксированном направлении Y

Как видно из данных, приведенных в таблице 2, величина концентрации газа σ_y в направлении Y изменяется о зависимости от x и v (скорости ветра). Количество измеряемых градаций, т. е. отношение сигнал/шум при $x = const$ определим как

$$\psi = \frac{U_{max}}{k_1 \sigma_y(v(t))}, \quad (2)$$

где U_{max} – максимальный сигнал на выходе измерителя;

$v(t)$ – функция, обозначающая зависимость скорости ветра от времени;

k_1 – коэффициент, характеризующий зависимость шумоподобного сигнала на выходе измерителя от σ_y . Если допустить, что измерения проводятся в течение времени t , то количество информации, извлекаемой в результате проводимых измерений, может быть оценено как

$$M = \frac{t}{\Delta t} \cdot \log_2 \cdot \left[\frac{U_{max}}{k_1 \sigma_y(v(t))} + 1 \right], \quad (3)$$

где Δt – интервал времени, через которое проводятся измерения.

С учетом следующих допущений:

$$\frac{U_{max}}{\sigma_y(v(t)) \cdot k_1} \geq 1, \quad (4)$$

$$k_1 \sigma_y = \sigma_{y_0} + k_2 \cdot t, \quad (5)$$

где $k_2 = const$;

выражение (3) напомним как

$$M = \frac{t}{\Delta t} \cdot \log_2 \cdot \left[\frac{U_{max}}{\sigma_{y_0} + k_2 t} \right]. \quad (6)$$

Исследуем выражение (6) на экстремум от t . Имеем:

$$\frac{dM}{dt} = \frac{1}{\Delta t} \cdot \log_2 \left[\frac{U_{max}}{\sigma_{y_0} + k_2 t} \right] - \frac{t}{\Delta t} \frac{\frac{U_{max} \cdot k_2}{(\sigma_{y_0} + k_2 t)^2}}{\frac{U_{max}}{\sigma_{y_0} + k_2 t}} = 0. \quad (7)$$

Из выражения (7) получим:

$$\log_2 \frac{U_{max}}{\sigma_{y_0} + k_2 t} = \frac{t \cdot k_2}{\sigma_{y_0} + k_2 t}. \quad (8)$$

Обозначив $\frac{U_{max}}{k_2} = a_1$, $\frac{\sigma_{y_0}}{k_2} = a_2$, уравнение (8) перепишем как

$$\log_2 \frac{a_1}{a_2 + t} = \frac{t}{a_2 + t}. \quad (9)$$

Выражение (9) представляет собой трансцендентное уравнение, решение которого позволяет определить оптимальную величину времени проведения измерений t .

Рассмотрим случай проведения серии измерений, где длительности элементов серии t_i составляют множество $\{T\}$, где

$$T = \{t_1, t_2, t_i, t_n\} ; i = \overline{1, n}. \quad (10)$$

При этом

$$t_{i+1} = t_i + \Delta t ; \Delta t = const. \quad (11)$$

В выражении (3) $k_1 \cdot \sigma_y(v(t))$ в первом приближении выразим как

$$k_1 \cdot \sigma_y(v(t)) = k_1 \cdot \sigma_{y_0} + k_2 \cdot v(t), \quad (12)$$

где

$$k_2 = \frac{d[k_1 \sigma_y(v(t))]}{dv(t)}. \quad (13)$$

С учетом выражений (3), (4) и (13) получим

$$M = \frac{t}{\Delta t} \cdot \log_2 \cdot \left[\frac{U_{max}}{k_1 \sigma_y(v(t))} \right] = \frac{t}{\Delta t} \cdot \log_2 \cdot \left[\frac{U_{max}}{k_1 \sigma_{y_0} + k_2 v(t)} \right]. \quad (14)$$

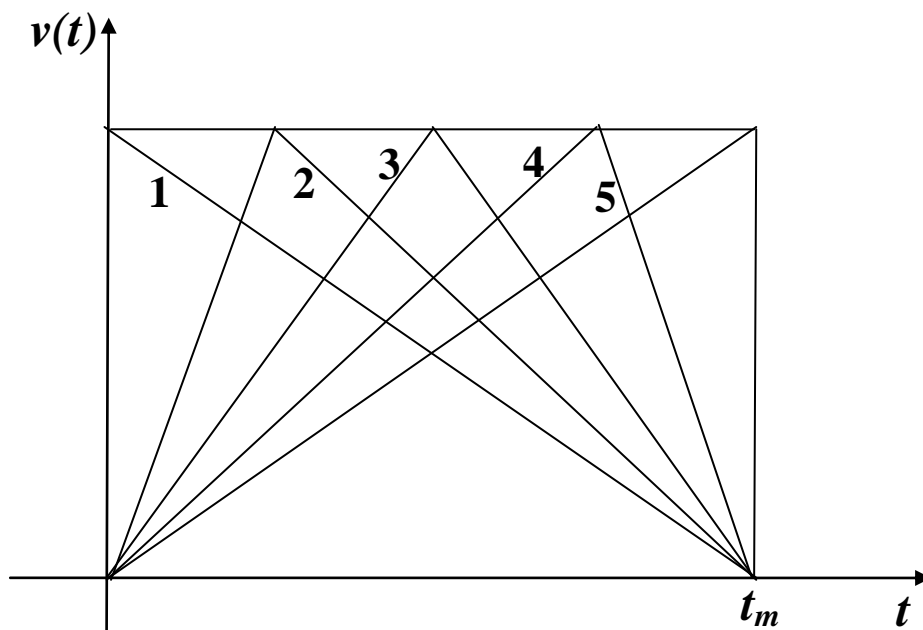
Переходя на условную непрерывную модель измерений, осуществив интегрирование выражения (14) по всем значениям t , получим

$$M_{ин} = \int_0^{t_{max}} \frac{t}{\Delta t} \cdot \log_2 \cdot \left[\frac{U_{max}}{k_1 \sigma_{y_0} + k_2 v(t)} \right] dt. \quad (15)$$

Примем следующую модель скорости ветра:

$$\int_0^t v(t)dt = c; \quad c = const. \quad (16)$$

Отметим, что в формулах (14)-(16) переменными интегрирования являются не текущее время, а длительности интервалов измерений, входящих в множество (10). Условие (16) физически означает, что функция $v(t)$ может быть выбрана из ограниченного набора всевозможных функций, некоторые из которых показаны на рисунке 3.



цифрами 1–5 обозначены пять возможных вариантов функции $v(t)$

Рисунок 3. Всевозможные варианты выбора функции $v(t)$, удовлетворяющие условию (16)

С учетом выражений (15) и (16) составим полный функционал безусловной вариационной оптимизации:

$$F = \int_0^{t_{max}} \frac{t}{\Delta t} \cdot \log_2 \cdot \left[\frac{U_{max}}{k_1 \sigma_{y0} + k_2 v(t)} \right] dt + \lambda \cdot \left[\int_0^{t_{max}} v(t)dt - c \right]. \quad (17)$$

Согласно условию уравнения Эйлера-Лагранжа [5], оптимальная функция $v(t)$ должна удовлетворить условию

$$\frac{d\left\{\frac{t}{\Delta t} \cdot \log_2 \left[\frac{U_{max}}{k_1 \sigma_{y_0} + k_2 v(t)} \right] + \lambda v(t) dt\right\}}{dv(t)} = 0. \quad (18)$$

Из условия (18) получим:

$$\frac{t \cdot k_2}{\Delta t (\ln 2) \cdot [k_1 \sigma_{y_0} + k_2 v(t)]} = \lambda. \quad (19)$$

Из выражения (19) находим:

$$v(t) = \frac{t}{\lambda \Delta t \ln 2} - \frac{k_1}{k_2} \sigma_{y_0}. \quad (20)$$

С учетом выражений (20) и (16) находим:

$$\int_0^{t_m} \frac{t}{\lambda \Delta t \ln 2} dt - \int_0^{t_m} \frac{k_1}{k_2} \sigma_{y_0} \cdot dt = c. \quad (21)$$

Из выражения (21) получим:

$$\lambda = \frac{t m^2 \cdot k_2}{2 \Delta t \ln 2 (k_2 c - t m \cdot k_1 \sigma_{y_0})}. \quad (22)$$

С учетом выражений (19) и (22) получим:

$$v(t) = \frac{2t(k_2 c - t m \cdot k_1 \sigma_{y_0})}{t m^2 \cdot k_2} - \frac{k_1 \sigma_{y_0}}{k_2}. \quad (23)$$

Таким образом, при условии (23) функционал (17) достигает экстремального значения. Для проверки типа экстремума достаточно вычислить вторую производную интегранта в (17) относительно $v(t)$ и убедиться, что она всегда положительна. Следовательно, экстремум является минимумом, и линия 5, указанная на рисунке 3, характеризует наихудший измеренный режим, когда максимальная величина скорости ветра подпадает на самый длительный интервал проводимых измерений.

Из вышеизложенного следует логический вывод о том, что наиболее оптимальным режимом измерений следует считать режим, характеризуемый на рисунке 3 линией 1, когда максимальная скорость ветра

подпадает на минимальный интервал проведения измерений, что в конечном счете приведет к минимизации шумов, создаваемых под влиянием ветра и снижающих информативность проводимых измерений для обнаружения утечек газа.

Выводы

1. Проведенный анализ результатов известных исследований показал, что ветер является фактором, увеличивающим предельное значение обнаруживаемой величины концентрации газа.

2. Осуществлена оптимизация нециклического режима измерений концентрации природного газа при наличии ветра с целью обнаружения утечки. Получено трансцендентное уравнение для вычисления оптимального по информационному критерию значения длительности проводимых измерений.

3. Осуществлена оптимизация циклического режима измерений концентрации газа с учетом влияния ветра. Получено уравнение, позволяющее определить наилучший режим проводимых измерений.

Список используемых источников

1. Tegstam J.F., Danjoux R. Gas Leak Detection in the Oil and Gas Industry Using Infrared Optical Imaging. URL: <https://www.ndt.net/article/dgzfp-irt-2007/Inhalt/v03.pdf> (дата обращения: 05.05.2019).

2. Hodgkinson J., B van Wellb, Padgett M., Pride R.D. Modelling and Interpretation of Gas Detection Using Remote Laser Pointers. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/138078.pdf> (дата обращения: 05.05.2019).

3. Thomas A. Reichardt, Sanjay Devdas, Thomas J. Kulp. Evaluation of Active and Passive Gas Imagers for Transmission Pipeline Remote Leak Detection. URL: https://www.researchgate.net/publication/237326248_Evaluation_of_Active_and_Passive_Gas_Imagers_for_Transmission_Pipeline_Remote_Leak_Detection (дата обращения: 05.05.2019).

4. Yun-Bin Zhang, Xu Zhao, Shu Wang, Zi-Yang He. Study of Wind Speed Effect on Laser Detection in Natural Gas Pipeline Leaking. URL: <http://dpi-proceedings.com/index.php/dtmse/article/view/10842/10395> (дата обращения: 05.05.2019).

5. Эльсгольц Л.Э. Дифференциальные уравнения и вариационные исчисления. М.: Наука, 1969. 424 с.

References

1. Tegstam J.F., Danjoux R. Gas Leak Detection in the Oil and Gas Industry using Infrared Optical Imaging. Available at: <https://www.ndt.net/article/dgzfp-irt-2007/Inhalt/v03.pdf> (accessed 05.05.2019).

2. Hodgkinson J., B van Wellb, Padgett M., Pride R.D. Modelling and Interpretation of Gas Detection using Remote Laser Pointers. Available at: <https://core.ac.uk/download/pdf/138078.pdf> (accessed 05.05.2019).

3. Thomas A. Reichardt, Sanjay Devdas, Thomas J. Kulp. Evaluation of Active and Passive Gas Imagers for Transmission Pipeline Remote Leak Detection. Available at: https://www.researchgate.net/publication/237326248_Evaluation_of_Active_and_Passive_Gas_Imagers_for_Transmission_Pipeline_Remote_Leak_Detection (accessed 05.05.2019).

4. Yun-Bin Zhang, Xu Zhao, Shu Wang, Zi-Yang He. Study of Wind Speed Effect on Laser Detection in Natural Gas Pipeline Leaking. Available at: <http://dpi-proceedings.com/index.php/dtmse/article/view/10842/10395> (accessed 05.05.2019).

5. El'sgol'ts L.E. *Differentsial'nye uravneniya i variatsionnoe ischisleniya* [Differential Equations and Calculus of Variations]. Moscow, Nauka, 1969. 424 p. [in Russian].

Сведения об авторе

About the author

Мурсалов Немат Закир оглы, докторант Государственного института водных проблем, г. Баку, Азербайджанская Республика

Mursalov Nemat Z., Doctorant of State Institute of Water Problems, Baku, Republic of Azerbaijan

e-mail: Nematmursalov@mail.ru