

DOI: 10.17122/ntj-oil-2019-3-95-101

УДК 528.4;621.438

Р.А. Эминов (Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, г. Баку, Азербайджанская Республика),

Э.И. Гусейнли (Государственный институт водных проблем, г. Баку, Азербайджанская Республика)

ОБЩАЯ КОНЦЕПЦИЯ СОЗДАНИЯ УНИВЕРСАЛЬНЫХ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ЛАЗЕРНЫХ СКАНЕРОВ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

Ramiz A. Eminov (Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Republic of Azerbaijan), **Elmir I. Huseynli** (State Research Institute of Water Problems, Baku, Republic of Azerbaijan)

GENERAL CONCEPT OF CREATING UNIVERSAL DIAGNOSTIC LASER SCANNERS FOR CONSTRUCTION AND OPERATION OF MAIN GAS PIPELINES

Введение

Статья посвящена выработке общей концепции создания диагностико-геодезических лазерных сканеров для строительства и эксплуатации магистральных газопроводов.

Цели и задачи

Целью работы является разработка общей модели диагностики магистральных газопроводов с целью обнаружения газового облака с помощью лазерного сканера и поиск возможности определения оптимальных режимов такой диагностики.

Результаты

С целью использования при строительстве и эксплуатации газопроводов сформулирована общая задача создания лазерных сканеров, работающих в инфракрасном диапазоне

Background

The article is devoted to common concept development for the creation of diagnostic geodesic laser scanners for the construction and operation of main gas pipelines.

Aims and Objectives

The aim of work is to develop a general model for diagnosing gas pipelines to detect a gas cloud using a laser scanner and to search for the possibility of determining the optimal modes of such diagnostics.

Results

In order to be used in the construction and operation of gas pipelines, the general task of creating laser scanners operating in the infrared range was formulated.

Осуществлена оптимизация режима функционирования лазерного сканера, работающего в режиме обнаружения утечек газа в магистральных газопроводах.

Выполнен синтез специализированного лазерного сканера, способного реализовать функции геодезического лазерного сканера в период построения газопровода, а также функции диагностики газопровода с целью обнаружения утечек газа при его эксплуатации.

The optimization of operation mode of the laser scanner for detecting gas leaks in gas pipelines is fulfilled.

The synthesis of a specialized laser scanner, capable of realizing the geodetic laser scanner functions during gas pipeline construction, as well as diagnosing gas pipeline functions in order to detect gas leaks during its operation, was performed.

Ключевые слова: лазерный сканер; лидар; утечка газа; диагностика; газопровод; оптимизация

Key laser scanner; lidar; gas leak; diagnostics; gas pipeline; optimization

Известно, что метан (CH_4) является вторым по значимости парниковым газом после CO_2 . Его доля в образовании парникового эффекта составляет 20 % [1].

С доиндустриального периода количество метана в атмосфере увеличилось в 2,5 раза вследствие антропогенных и природных факторов. Общее количество метана измеряется спутниковыми приборами типа SCIAMACHY, COSAT и др. пассивными мето-

дами, а также лидаром на длине волны $\approx 1,64 \text{ мкм}$. Что касается обнаружения газовых облаков, возникших из-за утечек углеводородного газа из газопроводов, то здесь широко применяются сканирующие лазерные измерители активного типа на базе перестраиваемых диодных лазерных излучателей.

Функционирование таких сканирующих устройств схематически представлено на рисунке 1.

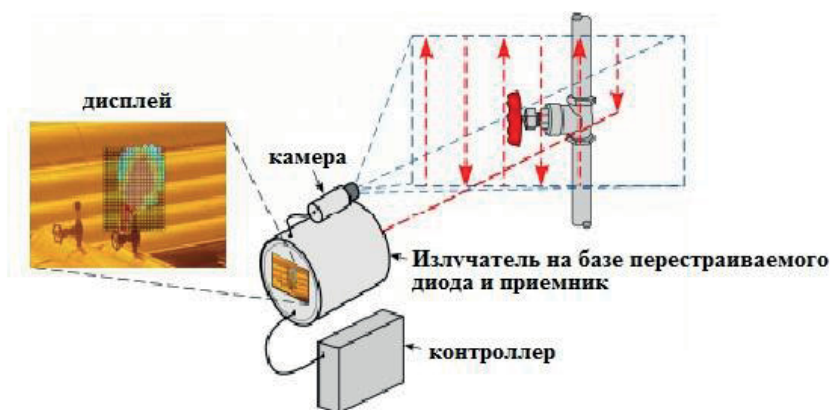


Рисунок 1. Схематическое представление обнаружения утечки газа с газопровода с использованием лидарного обнаружителя на базе перестраиваемых диодных излучателей на длине волны $\approx 1,64 \text{ мкм}$ [2]

В общем случае метановое газовое облако может быть обнаружено с помощью лазерных сканеров на длинах волн $\approx 3,27 \text{ мкм}$ и $\approx 1,6 \text{ мкм}$ [3]. Здесь уместно отметить, что существующие самолетные лазерные сканеры геодезического назначения имеют длины волн 1064 мкм и $1,55 \text{ мкм}$, что указывает на возможность создания универсальных геодезических лазерных сканеров, способных выполнить как геодезические задачи, так и задачи по обнаружению метановых газовых облаков, т.е. эксплуатироваться как в период строительства, так и при эксплуатации магистральных газопроводов.

Подробно рассмотрим процесс обнаружения утечек из газовых трубопроводов.

При технической реализации обнаружения утечек газа из магистральных трубопроводов необходимо учесть следующие закономерности образования и распространения газового облака на месте утечки:

1. газовое облако распространяется в направлении ветра;
2. происходит расширение фронта газового облака по координатам Y, Z при распространении облака по координате X под воздействием ветра;
3. при использовании лазера в сканирующем режиме лидара для обнаружения утечки газа необходимо учесть, что интенсивность отраженного лазерного луча обратно пропорциональна расстоянию между приемником отраженного луча и газового облака.

Первые два положения регулируются моделью Паскуилла-Гиффорда газового облака над местом утечки, согласно которой [4]:

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

где $C(x, y, z)$ - концентрация газа в точке x, y, z ;

Q - скорость утечки газа (кг/с);

$\pi = 3,14$;

U - скорость ветра (м/с);

σ_y, σ_z - дисперсионные коэффициенты, зависящие от x по следующему выражению:

$$\sigma_y = a_1 \cdot x^{a_2}, \quad (2)$$

$$\sigma_z = b_1 \cdot x^{b_2}, \quad (3)$$

где $a_i, b_i, i = \overline{1,2}$ - постоянные коэффициенты, зависящие от скорости ветра U .

Третье положение определяется существенным ослаблением интенсивности и отраженного лазерного луча. Как отмечено в работе [5], мощность приемного сигнала лидара, состоящего из лазерного излучателя и приемной аппаратуры, определяется как

$$P_1 = \frac{P_0 \cdot A \cdot c \cdot \tau_a}{8\pi r^2} \cdot \sigma(r) \cdot x(\pi r) e^{-2\tau(r)}, \quad (4)$$

где P_1 - мощность приемного сигнала;

P_0 - мощность посылаемого в атмосферу излучения;

A - площадь приемной апертуры лидара;

c - скорость света в воздухе;

τ_a - длительность импульса излучения лазера;

$x(\pi r)$ - индикатриса рассеяния;

$\tau(r)$ - оптическая толщина на участке трассы от 0 до r [5].

Как видно из выражения (4), мощность отраженного сигнала лазера обратно пропорциональна квадрату расстояния r . В качестве примера на рисунке 2 приведены графики зависимости мощности отраженного сигнала от расстояния [6].

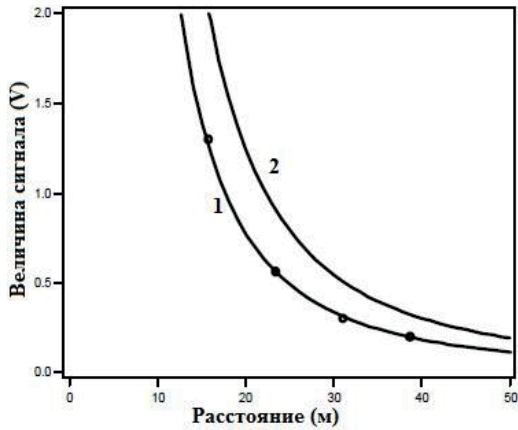
Что касается шумов оптоэлектронного тракта, то согласно [6] величина шумового сигнала определяется по формуле

$$U_n = \frac{4\lambda \cdot f_B}{\tau \cdot d}, \quad (5)$$

где λ - длина волны;

f_B - верхняя частота приемного сигнала;

d - диаметр детектора.



1 - экспериментальная кривая;
2 - теоретическая кривая [6]

Рисунок 2. Графики зависимости мощности отраженного сигнала лидара от расстояния

Как видно из выражения (5), при проведении измерений на фиксированной длине волны шумы можно считать неизменной величиной.

Целью настоящей статьи с учетом вышеизложенного являются разработка общей модели диагностики магистральных газопроводов с целью обнаружения газового облака с помощью лазерного сканера и поиск возможности выработки оптимальных режимов такой диагностики.

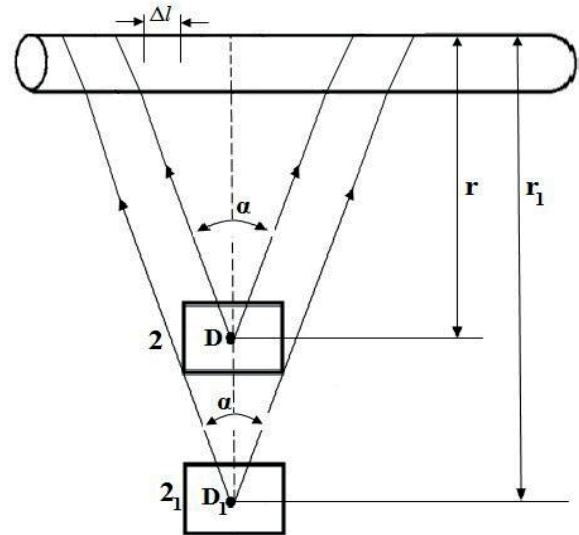
Для анализа возможностей оптимизации диагностической процедуры предлагается следующая упрощенная модель отраженного сигнала сканирующего лазера:

$$U = \frac{B}{r^2} e^{-\tau(r)}, \quad (6)$$

где U - величина отраженного сигнала;

$$B = const.$$

Процедура измерений с помощью сканирующего лазера схематически показана на рисунке 3.



1 - трубопровод;
2 - сканирующий лазер;
 α - угол обзора;
 r, r_1 - расстояния от точек D и D_1 соответственно до трубопровода;
 Δl - дискрета длины трубопровода

Рисунок 3. Схематическое представление диагностики газопровода с помощью сканирующего лазера

Сформулируем следующую задачу информационной оптимизации.

1. Следует вычислить оптимальную функциональную зависимость

$$V = V(r), \quad (7)$$

при которой количество вырабатываемой информации при проводимых серийных диагностических измерениях достигло бы максимального значения с учетом интегрального ограничения, налагаемого на искомую функцию.

Количество информации, извлекаемое при проведении измерений с фиксированного расстояния r , определим как

$$M = \frac{r}{\Delta l} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \cdot \log_2 \frac{B(r) e^{-\tau(r)}}{r^2 \sigma_m}, \quad (8)$$

где σ_m - среднеквадратическое отклонение (СКО) шумов в системе.

Интегральное ограничительное условие, налагаемое на функцию $B(r)$, имеет вид

$$\int_0^{r_{max}} B(r) dr = C; \quad C = const. \quad (9)$$

Условие (9) в частном случае означает ограниченность энергоресурсов лазерного излучателя.

Если допустить, что измерения проводятся при различных расстояниях r_i , $i = \overline{1, n}$ (при этом множество $R = \{r_i\}$ является упорядоченным, т.е. имеет место соотношение

$$r_{i+1} = r_i + \Delta r; \quad \Delta r = const), \quad (10)$$

то в пределе, рассматривая случай $\Delta r \rightarrow 0$, интегральное количество информации, добываемой при таких многодистанционных измерениях, определим как

$$M_1 = \int_0^{r_{max}} \frac{r}{\Delta l} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \cdot \log_2 \frac{B(r) e^{-\tau(r)}}{r^2 \sigma_m} \cdot dr \quad (11)$$

С учетом выражений (9) и (11) составим математическую задачу безусловной вариационной оптимизации:

$$M_2 = \int_0^{r_{max}} \frac{r}{\Delta l} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \cdot \log_2 \frac{B(r) e^{-\tau(r)}}{r^2 \sigma_m} dr + \gamma \left[\int_0^{r_{max}} B(r) dr - C \right], \quad (12)$$

где γ - множитель Лагранжа.

Для нахождения оптимальной функции $B(r)$, при которой функционал (12) достиг бы экстремальной величины, воспользуемся уравнением Эйлера-Лагранжа, согласно которому оптимальная функция $B(r)$ должна удовлетворять следующему условию:

$$\frac{d \left\{ \int_0^{r_{max}} \frac{r}{\Delta l} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \cdot \log_2 \frac{B(r) e^{-\tau(r)}}{r^2 \sigma_m} + \gamma \cdot B(r) \right\}}{dB(r)} = 0. \quad (13)$$

Из выражения (13) получаем

$$\frac{r}{(\ln 2) \Delta l} \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \cdot \left(\frac{1/r^2}{B(r)/2} \right) \cdot \frac{e^{-\tau(r)}}{\sigma_m} + \gamma = 0. \quad (14)$$

Из (14) имеем

$$B(r) = - \frac{r \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \cdot e^{-\tau(r)}}{\gamma \cdot (\ln 2) \cdot \Delta l \cdot \sigma_m}. \quad (15)$$

С учетом (15) и (9) получим

$$- \int_0^{r_m} \frac{r \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \cdot e^{-\tau(r)}}{\gamma \cdot (\ln 2) \cdot \Delta l \cdot \sigma_m} dr = C. \quad (16)$$

Из выражения (16) получим

$$\gamma = - \int_0^{r_m} \frac{r \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \cdot e^{-\tau(r)}}{C \cdot (\ln 2) \cdot \Delta l \cdot \sigma_m} dr. \quad (17)$$

В случае малых расстояний, когда $r_{max} < 100$, можем считать, что $e^{-\tau(r)} \approx 1$. В этом случае из (17) получаем

$$\gamma = - \frac{r_m \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}{C \cdot (\ln 2) \cdot \Delta l \cdot \sigma_m}. \quad (18)$$

С учетом (15) и (18) получим

$$B(r)_{opt} = \frac{r \cdot C}{r_m}. \quad (19)$$

Таким образом, при условии (19) функционал (12) достигнет экстремального значения.

Очевидно, что этот экстремум является максимумом, т.к. при повторном дифференцировании выражения (14) по $B(r)$ получим выражение с отрицательным знаком.

Техническая реализация оптимальной взаимосвязи (19) между показателями B и r может быть осуществлена при проведении серийных измерений при различных значени-

ях r путем организации адаптивного управления мощностью излучаемого лазерного луча в зависимости от расстояния между измерителем и газопроводом. Для этого может быть использован отдельный лазерный даль-

номер, который должен быть введен в состав системы обнаружения утечек газа, работающей в адаптивном режиме.

Блок-схема такой системы показана на рисунке 4.

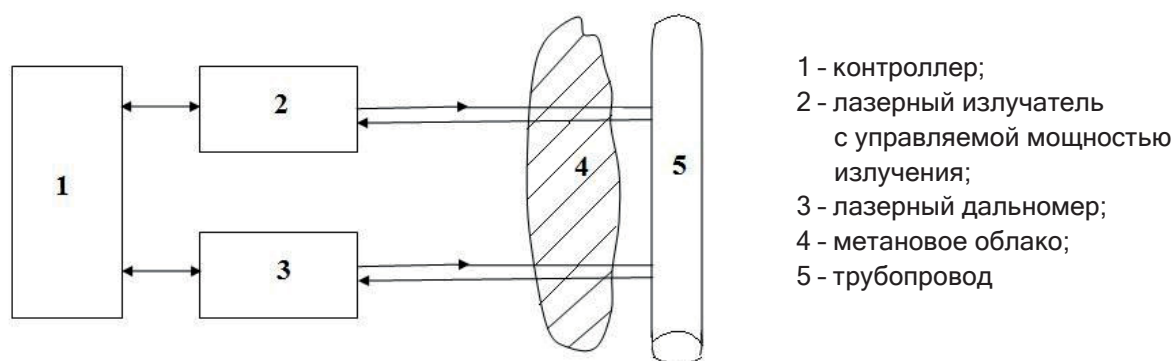


Рисунок 4. Блок-схема адаптивной системы обнаружения утечки метана

Очевидно, что функцию дальномера в принципе может выполнить и сканирующий лазер 2 при условии внесения соответствующих изменений в устройство управления лазером. Таким образом, необходимо создание универсальных диагностико-геодезических лазерных сканеров, способных осуществить выполнение следующих задач в период как строительства, так и эксплуатации газопроводов:

1. диагностика магистральных газопроводов в процессе эксплуатации в смысле обнаружения утечек;
2. геодезический контроль процессов построения газопроводов;
3. выполнение функции дальномера.

Техническая реализация изложенной концепции создания универсального лазерного сканера для магистральных газопроводов позволила бы решить задачу не только диагностики состояния трубных газовых ли-

ний, но и осуществить необходимые геодезические измерения в процессе построения газопроводов.

Выводы

1. Сформулирована общая задача создания лазерных сканеров, работающих в инфракрасном диапазоне, с целью использования их при строительстве и эксплуатации газопроводов.

2. Осуществлена оптимизация режима функционирования лазерного сканера, работающего в режиме обнаружения утечек газа в магистральных газопроводах.

3. Выполнен синтез специализированного лазерного сканера, способного реализовать функции геодезического лазерного сканера в период строительства газопровода, а также функции диагностики при эксплуатации газопровода с целью обнаружения утечек газа.

Список литературы

1. Delahaye T., Maxwell S.E., Reed Z.D., Lin H., Hodges J.T., Sung K., Devi V.M., Warneke T., Spietz P., Tran H. Precise Methane Absorption Measurements in the 1.64 m Spectral Region for the MERLIN Mission // *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. June, 2016. DOI:10.1002/2016JD025024. <https://www.nist.gov/publications/precise-methane-absorption-measurements-164-micron-spectral-region-merlin-mission>.
2. Wainner R.T., Aubut N.F., Laderer M.C., Frish M.B. Scanning, Stand off TDLAS Leak Imaging and Quantification. Physical Sciences Inc., 20 New England Business Center, Andover, MA, USA 01810. <http://www.psicorp.com/sites/psicorp.com/files/articles/SR-2017-6-SPIE-Wainner.pdf>.
3. Bakula K. Multispectral Airborne Laser Scanning - a New Trend in the Development of LiDAR Technology. December, 2015. DOI: 10.14681/afkit.2015.002. https://www.researchgate.net/publication/296486863_Multispectral_airborne_laser_scanning_-_a_new_trend_in_the_development_of_LiDAR_technology.
4. Hodgkinson J.Ac., van Wellb B., Padgett M., Pride R.D. Modeling and Interpretation of Gas Detection Using Remote Laser Pointers. *Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc.* 2006, Apr. No. 63(5). P. 929-939. <https://core.ac.uk/download/pdf/138078.pdf>.
5. Брюханова В.В., Григорьев С.М. Моделирование лидарного сигнала в приближении двукратного рассеяния от неоднородного капельного облака. http://www.mivlgu.ru/conf/armand2012/pdf/S3_6.pdf.
6. Reichardt Th.A., Devdas S., Kulp Th.J. Evaluation of Active and Passive Gas Imagers for Transmission Pipeline Remote Leak Detection. Final Report. December 2002. https://www.researchgate.net/publication/237326248_Evaluation_of_Active_and_Passive_Gas_Imagers_for_Transmission_Pipeline_Remote_Leak_Detection

Авторы

- Эминов Рамиз Ахмед оглы, канд. техн. наук, Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности
Доцент кафедры «Поиск и разведка месторождений нефти и газа»
Азербайджанская Республика, Az1010, Баку, пр. Азадлыг, 20
e-mail: Eminovramiz@mail.ru
- Гусейнли Эльмир Имран оглы
Докторант Государственного института водных проблем
Азербайджанская Республика, AZ 1010, Баку, пр. Азадлыг, 20
e-mail: elmir-huseynov_91@mail.ru

References

1. Delahaye T., Maxwell S.E., Reed Z.D., Lin H., Hodges J.T., Sung K., Devi V.M., Warneke T., Spietz P., Tran H. Precise Methane Absorption Measurements in the 1.64 m Spectral Region for the MERLIN Mission. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. June, 2016. DOI:10.1002/2016JD025024. <https://www.nist.gov/publications/precise-methane-absorption-measurements-164-micron-spectral-region-merlin-mission>.
2. Wainner R.T., Aubut N.F., Laderer M.C., Frish M.B. *Scanning, Stand off TDLAS Leak Imaging and Quantification*. Physical Sciences Inc., 20 New England Business Center, Andover, MA, USA 01810. <http://www.psicorp.com/sites/psicorp.com/files/articles/SR-2017-6-SPIE-Wainner.pdf>.
3. Bakula K. *Multispectral Airborne Laser Scanning - a New Trend in the Development of LiDAR Technology*. December, 2015. DOI: 10.14681/afkit.2015.002. https://www.researchgate.net/publication/296486863_Multispectral_airborne_laser_scanning_-_a_new_trend_in_the_development_of_LiDAR_technology.
4. Hodgkinson J.Ac., van Wellb B., Padgett M., Pride R.D. Modeling and Interpretation of Gas Detection Using Remote Laser Pointers. *Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc.* 2006, Apr. No. 63(5). P. 929-939. <https://core.ac.uk/download/pdf/138078.pdf>.
5. Bryukhanova V.V., Grigor'ev C.M. Modelirovanie lidarnogo signala v priblizhenii dvukratnogo rasseyaniya ot neodnorodnogo kapel'nogo oblaka [Simulation of the Lidar Signal in the Double Scattering Approximation from an Inhomogeneous Droplet Cloud]. http://www.mivlgu.ru/conf/armand2012/pdf/S3_6.pdf. [in Russian].
6. Reichardt Th.A., Devdas S., Kulp Th.J. *Evaluation of Active and Passive Gas Imagers for Transmission Pipeline Remote Leak Detection*. Final Report. December 2002. https://www.researchgate.net/publication/237326248_Evaluation_of_Active_and_Passive_Gas_Imagers_for_Transmission_Pipeline_Remote_Leak_Detection.

The Authors

- Eminov Ramiz A., Candidate of Engineering Sciences
Azerbaijan State Oil and Industry University
Assistant Professor of Search and Survey of Oil and Gas Deposits Department
20, Azadliq ave., Baku, Az1010, Republic of Azerbaijan
e-mail: Eminovramiz@mail.ru
- Huseynli Elmir Imran oglu
Doctorant of State Research Institute of Water Problems
20, Azadliq ave., Baku, Republic of Azerbaijan, AZ 1010
e-mail: Elmir-Huseynov_91@mail.ru