

**ВОПРОСЫ РАЗРАБОТКИ
ОПТОВОЛОКОННОГО КЮВЕТНОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТАНА
В ВОЗДУХЕ В НЕФТЕГАЗОВОМ ПРОИЗВОДСТВЕ**И. Г. ЧОБАНЗАДЕ^{*1}, А. Э. БАБАХАНОВ²¹ *Национальное аэрокосмическое агентство Азербайджанской Республики,
Баку, Азербайджан
ichobanzada@slb.com*² *Государственная нефтяная компания Азербайджанской Республики,
Баку, Азербайджан
babakhan2000@yahoo.com*

Аннотация. Статья посвящена разработке оптоволоконного кюветного измерителя концентрации метана в нефтегазовом производстве. Предметом исследования является разработка теоретических основ оптимизации конструкции такого измерителя, при которой основной режимный показатель измерителя достигает экстремальной величины. Цель работы заключается в исследовании возможности нахождения оптимальной взаимосвязи между основными режимными показателями, при которой выбранный критерий оптимизации достигает максимального значения. Составлена задача безусловной оптимизации, в которой дополнительно используемое условие присоединяется к функционалу оптимизации с помощью множителя Лагранжа. Получена такая форма функциональной связи между основными режимными показателями, при которой функционал цели достигает минимальной величины. Обнаруженная взаимосвязь между основными показателями охарактеризована как наихудшая, которой на практике следует избегать.

Ключевые слова: измеритель, концентрация, метан, кювета, оптимизация, функционал

Ссылка для цитирования: Чобанзаде И. Г., Бабаханов А. Э. Вопросы разработки оптоволоконного кюветного измерителя концентрации метана в воздухе в нефтегазовом производстве // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 4. С. 335—341. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-4-335-341.

**ISSUES OF DEVELOPING A FIBER-OPTIC CUVETTE METER
FOR THE CONCENTRATION OF METHANE
IN THE AIR IN OIL AND GAS INDUSTRY**I. G. Chobanzade^{*1}, A. E. Babakhanov²¹ *National Aerospace Agency of the Azerbaijan Republic, Baku, Azerbaijan
ichobanzada@slb.com*² *State Oil Company of the Azerbaijan Republic, Baku, Azerbaijan
babakhan2000@yahoo.com*

Abstract. The article is devoted to the development of a fiber-optic cuvette meter of methane concentration at oil and gas enterprises. The subject of the study is the development of theoretical foundations for optimizing the design of such a meter in which the main operating indicator of the meter reaches an extreme value. The purpose of the work is to investigate the possibility of finding the optimal relationship between the main regime indicators, at which the selected optimization criterion reaches the maximum value. An unconstrained optimization problem is formulated, in which an additional condition is added to the optimization functional using the Lagrange multiplier. A form of functional connection between the main regime indicators has been obtained, in which the goal functional reaches a minimum value. The found relationship between the main indicators is characterized as the worst, which should be avoided in practice.

Keywords: meter, concentration, methane, cuvette, optimization, functional

For citation: Chobanzade I. G., Babakhanov A. E. Issues of developing a fiber-optic cuvette meter for the concentration of methane in the air in oil and gas industry. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 4. P. 335—341 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-4-335-341.

Введение. Хорошо известно, что метан является основным компонентом природного газа и в то же время фактором, вызывающим парниковый эффект. Средства оптического измерения концентрации метана могут быть разделены как по области применения этих измерителей, так и по используемому спектральному диапазону (известны конструкции, использующие эффект поглощения на длине волны 1653,7 нм) [1—4]. Измерители концентрации могут использоваться в сельском хозяйстве [5], при исследовании различных резервуаров [6], при изучении подводных просачиваний метана в озерах [7], в земледелии [8], в коммунальном хозяйстве [9], на предприятиях по сбору и обработке газа [10].

Как отмечается в работе [10], исследование промышленных предприятий по сбору и обработке газа показало, что эмиссия метана на предприятиях сбора изменяется в пределах 0,7—700 кг/ч, в то время как на предприятиях по обработке этот показатель изменялся в пределах 3—600 кг/ч. Исследовались газовые трубопроводы, компрессоры, двигатели внутреннего сгорания, турбины, системы дегидратации, системы удаления сульфида водорода и иное оборудование. Полученные результаты показывают, что соответствующие промышленные предприятия все еще являются основными источниками эмиссии метана в атмосферу и оценка объема таких выбросов остается актуальной задачей, для решения которой могут быть использованы измерители метана разной конструкции. Анализ литературы по оптоэлектронным абсорбционным измерителям со встроенной кюветой [11—15] показывает, что развитие данного направления характеризуется широким применением оптоволоконных элементов и перестраиваемых лазеров. Например, в работе [11] предложена конструкция измерителя концентрации метана, в которой для калибровки показаний используется внутренняя калибрационная кювета, заполненная газом. В работе [12] представлена конструкция измерителя утечек метана в инфракрасном диапазоне (1,64 мкм). Отмечается, что использование светоизлучающих диодов и диода Шоттки типа NiSi/n-Si позволяет обнаруживать концентрацию метана на уровне 3 %.

В работах [13—15] предложены различные модификации лазерных измерителей метана с использованием газовых кювет. Так, в [13] использована наполненная исследуемым газом многоходовая кювета, через которую многократно проходит лазерный луч. В статье [14] показано, что использование полостного оптоволокна типа HC-PBF позволяет проводить измерения метана на длине волны 1670 нм. В работе [15] для измерения концентрации метана используется метод модуляции длины волны лазерного излучателя. Метод основан на законе Ламберта—Бера, согласно которому интенсивность оптического сигнала I , прошедшего через кювету, наполненную газом, определяется как

$$I = I_0 \exp(-\alpha CL), \quad (1)$$

где I_0 — исходная интенсивность оптического сигнала; α — коэффициент поглощения газа; C — концентрация газа; L — длина пути сигнала.

В статье [15] показано: если модулировать частоту лазера по косинусоидальному закону, то вторая гармоника Фурье составляющих сигнала на выходе кюветы будет иметь амплитуду, пропорциональную по величине коэффициенту абсорбции:

$$H_2 = I_0 \alpha CL. \quad (2)$$

Вместе с тем, очевидно, что модулировать частоту лазерного излучателя технически намного сложнее, чем изменить интенсивность исходного лазерного луча. При этом также требуется синхронизация приемной стороны по частоте с узлами частотной модуляции луча.

С учетом вышесказанного нами предлагается принцип амплитудной модуляции исходного лазерного луча по интенсивности, в зависимости от длины хода оптического луча в кювете, заполненной газом. При этом предлагается изготовить кювету в виде неравнобедренной трапеции, длина хода луча в которой различается. Цель настоящей статьи — найти взаимосвязь

интенсивности лазерного луча и длины хода луча при наложении общего ограничения на суммарную длину хода луча по всем каналам.

Предлагаемый метод предусматривает оперативное изменение интенсивности лазерного излучателя с помощью управляющего драйверного узла. На рис. 1 приведена схема драйверного управления интенсивностью лазерного излучения (1 — диодный лазер; 2 — матрица резисторов; 3 — группа переключателей; 4 — узел управления; 5 — блок питания).

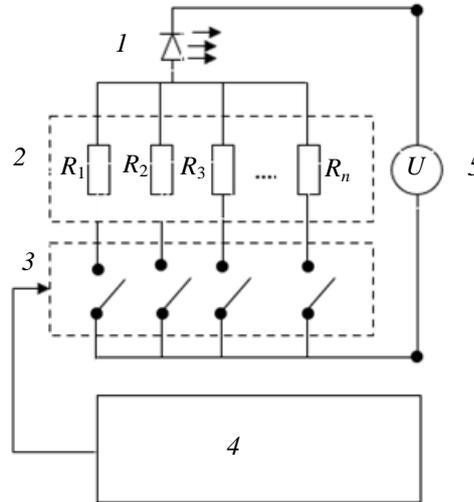


Рис. 1

В основе предлагаемого метода лежит принцип использования многосекционной газовой кюветы в виде неравносторонней трапеции с числом входов и выходов n . На рис. 2 приведена трапециевидальная конструкция газовой кюветы, в которой длина хода луча изменяется от L_1 до L_n .

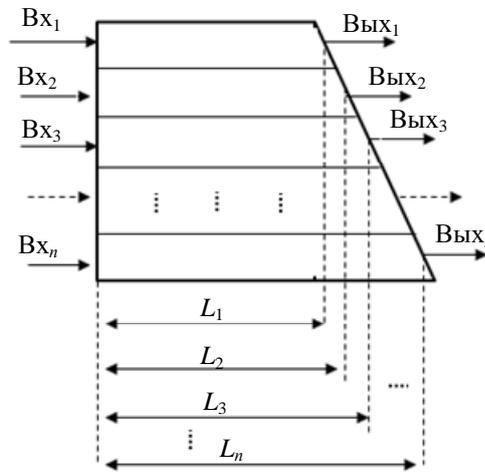


Рис. 2

Задачей оптимизации в предлагаемом измерителе концентрации метана с использованием кюветы является нахождение такого порядка подачи элементов множества

$$I_0 = \{I_{01}, I_{02}, I_{03}, \dots, I_{0n}\} \tag{3}$$

на входы $\{Вх_i\}$ кюветы трапециевидальной формы, при котором суммарный сигнал на выходах $\{Вых_2\}$ кюветы достиг бы максимума. В этом случае имеем

$$\Psi_{\Sigma} = \frac{\sum_{i=1}^n I_{0i}}{\sigma_{\text{шум}}}; \quad \Psi_{\Sigma} \rightarrow \max, \tag{4}$$

где ψ_{Σ} — суммарное отношение сигнал/шум; $\sigma_{\text{шум}}$ — суммарные шумы в системе; $\sigma_{\text{шум}} = \text{const}$. Следовательно, (4) представляет собой общий критерий оптимизации. Очевидно, что чем выше ψ_{Σ} , тем с большей достоверностью может быть вычислена величина C .

Второй задачей является ограничение на суммарную длину хода луча, т.е.

$$\sum_{i=1}^n L_i = C_1; \quad C_1 = \text{const}. \quad (5)$$

Покажем, что задачи (4) и (5) могут быть решены путем оптимизации порядка подключения лазерных лучей разной интенсивности по входам кюветы трапецеидальной формы.

Оптимизация лазерного измерителя метана с трапецеидальной многосекционной кюветой. Введем в рассмотрение функциональную зависимость

$$L = f(I_0). \quad (6)$$

В этом случае выражение (1) перепишем как

$$I = I_0 \exp(-\alpha C \cdot f(I_0)). \quad (7)$$

Допускаем, что I_0 в линейном порядке изменяется от нуля до $I_{0\text{max}}$ с соблюдением условия (5). Суммируя по всем i , получим

$$I_{\Sigma g} = \sum_{i=1}^n I_i = \sum_{i=1}^n I_{0i} \exp(-\alpha C \cdot f(I_{0i})). \quad (8)$$

Непрерывные аналоги (5) и (8) соответственно будут иметь следующий вид:

$$\int_0^{I_{0\text{max}}} L(I_0) dI_0 = C_2, \quad (9)$$

$$I_{\Sigma \text{H}} = \int_0^{I_{0\text{max}}} I_0 \exp(-\alpha C \cdot f(I_0)) dI_0. \quad (10)$$

С учетом (9) и (10) составим следующую задачу оптимизации:

$$I_{\Sigma \text{H}} = \int_0^{I_{0\text{max}}} I_0 \exp(-\alpha C \cdot f(I_0)) dI_0 + \lambda \left[\int_0^{I_{0\text{max}}} f(I_0) dI_0 - C_2 \right], \quad (11)$$

где λ — множитель Лагранжа.

Решим задачу (11) согласно методу Эйлера:

$$-I_0 \alpha C \exp(-\alpha C \cdot f(I_0)) + \lambda = 0, \quad (12)$$

откуда находим

$$I_0 \alpha C \exp(-\alpha C \cdot f(I_0)) = \lambda. \quad (13)$$

Из (13) получим

$$f(I_0) = \frac{1}{\alpha C} \ln \left[\frac{I_0 \alpha C}{\lambda} \right]. \quad (14)$$

С учетом (9) и (14) найдем

$$\frac{1}{\alpha C} \int_0^{I_{0\max}} \ln(I_0 \alpha C) dI_0 - \frac{1}{\alpha C} \ln \lambda = C_1. \quad (15)$$

Из выражения (15) легко можно вычислить:

$$\lambda = \exp \left[\int_0^{I_{0\max}} \ln(I_0 \alpha C) dI_0 - \alpha C C_1 \right] = \lambda_0. \quad (16)$$

Следовательно, из (14) и (16) имеем

$$f(I_0) = \frac{1}{\alpha C} \ln(I_0 \alpha C) - C_4, \quad (17)$$

где $C_4 = \frac{1}{\alpha C} \left[\int_0^{I_{0\max}} \ln(I_0 \alpha C) dI_0 - \alpha C C_1 \right]; C_4 = \text{const}.$

Таким образом, выражение (17) позволяет найти условия достижения $I_{\Sigma H}$ экстремума. Однако проверка подынтегрального выражения в (12) на вторую производную показывает, что этот экстремум является минимумом.

Следовательно, для получения достаточно достоверного результата проводимых измерений на практике следует максимально избегать логарифмической зависимости L от I_0 , которая, согласно проведенному выше анализу, может привести к минимальному значению измеряемого сигнала, а следовательно, и к малой величине отношения сигнал/шум на выходе системы.

Заключение. Таким образом, в статье сформулирована и решена задача оптимизации оптоволоконного измерителя в воздухе концентрации метана в инфракрасном диапазоне с использованием газовой кюветы. Предложена конструкция многоходовой кюветы в виде трапеции, каналы прохождения луча в которой имеют разную длину, а на вход этих каналов подается лазерное излучение разной интенсивности. Проведенная оптимизация работы многоканального измерителя с учетом некоторых ограничительных условий показала, что результат измерений с помощью такой конструкции будет минимально достоверным при наличии логарифмической зависимости длины хода луча в кювете от интенсивности соответствующего лазерного луча. Для исключения этого рекомендуется на практике избегать такой зависимости между указанными показателями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Xian Q., Lv H., Yao Y., Cheng C., Zhou Z. Fabrication and application of 1653.7 nm methane sensor // IEEE Photonics journal. 2022. Vol. 14, N 5. October.
2. Cheng W., Han J., Wu Y. Design of a methane concentration detector based on spectrum absorption // Sensors. Switzerland. 2012. Vol. 12. P. 12729—12740. DOI:10.3390/s120912729.
3. Xu S., Chen M. Design and modeling of non-linear infrared transducer for measuring methane using cross-correlation method // Meas. J. Intern. Meas. Confed. 2012. Vol. 45. P. 325—332. DOI:10.1016/j.measurement.2011.11.015.
4. Gao Q., Zhang Y., Yu J., Wu S., Zhang Z., Zheng F. Tunable multi-mode diode laser absorption spectroscopy for methane detection // Sensors Actuators A Phys. 2013. Vol. 199. P. 106—110. DOI:10.1016/j.sna.2013.05.012.
5. Bekele W., Guinguina A., Zegeye A., Simachew A., Ramin M. Contemporary methods of measuring and estimating methane emission from ruminants // Methane. 2022. Vol. 1. P. 82—95. <https://doi.org/10.3390/methane1020008>
6. Lomov V. A. Methods for instrumental assessment of methane emission in reservoirs // IOP. Conf. Series: Earth and environmental science. 2021. Vol. 834. P. 012032. DOI:10.1088/1755-1315/834/1/012032.

7. Thalasso F., Anthony K. W., Irzak O., Chaleff E., Barker L., Anthony P., Hanke P., Gonzalez-Valencia R. Technical note: Mobile open dynamic chamber measurement of methane macroseeps in lakes // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2020. Vol. 24. P. 6047—6058. <https://doi.org/10.5194/hess-24-6047-2020>.
8. Siegenthaler A., Welch B., Pangala S. R., Peacock M., Gauci V. Technical note: Semi-rigid chambers for methane gas flux measurements on tree stems // *Biogeosciences*. 2016. Vol. 13. P. 1197—1207 [Электронный ресурс]: <www.biogeosciences.net/13/1197/2016/>.
9. Riddick S. N., Ancona R., Mbua M., Bell C. S., Duggan A., Vaughn T. L., Bennett K., Zimmerle D. J. A quantitative comparison of methods used to measure smaller methane emissions typically observed from superannuated oil and gas infrastructure // *Atmos. Meas. Tech.* 2022. Vol. 15. P. 6285—6296. <https://doi.org/10.5194/atm-15-6285-2022>.
10. Mitchell A. L., Tkacik D. S., Roscioli J. R., Herndon S. C., Yacovitch T. I., Martinez D. M., Vaughn T. L., Williams L. L., Sullivan M. R., Floerchinger C., Omara M., Subramanian R., Zimmerle D., Marchese A. J., Robinson A. L. Measurements of methane emissions from natural gas gathering facilities and processing plants: Measurement results // *Environmental Science & Technology*. 2015. Vol. 49, N 20. P. 12602. DOI: 10.1021/acs.est.5b04018.
11. Schoonbaert S. B., Tyner D. R., Johnson M. R. Remote ambient methane monitoring using fiber-optically coupled optical sensors // *Applied Phys. B*. 2015. Vol. 119. P. 133—142. DOI:10.1007/s00340-014-6001-0.
12. Roy S., Desikan R., Duttagupta S. P. A novel, compact optical device for estimating the methane emissions in geological environment. November 2016 [Электронный ресурс]: <<https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1611/1611.08797.pdf>>.
13. Cao F., Liu D., Lin J., Hu B., Liu D. Absorption measurement of methane gas with broadband light source using fiber sensor system // *Front. Optoelectron. China*. 2010. Vol. 3, N 4. P. 394—398.
14. Cubillas A. M., Lopez M. S., Lazaro J. M., Conde O. M., Petrovich M. N., Higuera J. M. L. Detection of methane at 1670-nm band with a hollow-core photonic bandgap fiber // *Photonic Crystal Fibers II*. 2008. Proc. SPIE. Vol. 6990. DOI:10.1117/12.780587.
15. Wen-Qing W., Lei Z., Wei-Hua Z. Analysis of optical fiber methane gas detection system // *Procedia Engineering*. 2013. Vol. 52. P. 401—407.

Сведения об авторах

Имран Гора Оглы Чобанзаде

— Национальное аэрокосмическое агентство Азербайджанской Республики; менеджер; E-mail: ichobanzada@slb.com

Аслан Эльдар Бабаханов

— аспирант; Государственная нефтяная компания Азербайджанской Республики; E-mail: babakhan2000@yahoo.com

Поступила в редакцию 23.11.2021; одобрена после рецензирования 06.07.2021; принята к публикации 28.02.23.

REFERENCES

1. Xian Q., Lv H., Yao Y., Cheng C., Zhou Z. *IEEE Photonics journal*, 2022, no. 5(14), October.
2. Cheng W., Han J., Wu Y. *Sensors*, 2012, vol. 12, pp. 12729–12740, DOI:10.3390/s120912729.
3. Xu S., Chen M. *Meas. J. Intern. Meas. Confed.*, 2012, vol. 45, pp. 325–332, DOI: 10.1016/j.measurement.2011.11.015.
4. Gao Q., Zhang Y., Yu J., Wu S., Zhang Z., Zheng F. *Sensors Actuators A Phys.*, 2013, vol. 199, pp. 106–110, DOI:10.1016/j.sna.2013.05.012.
5. Bekele W., Guinguina A., Zegeye A., Simachew A., Ramin M. *Methane*, 2022, vol. 1, pp. 82–95, <https://doi.org/10.3390/methane1020008>.
6. Lomov V.A. *IOP. Conf. Series: Earth and environmental science*, 2021, vol. 834, pp. 012032, DOI:10.1088/1755-1315/834/1/012032.
7. Thalasso F., Anthony K.W., Irzak O., Chaleff E., Barker L., Anthony P., Hanke P., Gonzalez-Valencia R. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2020, vol. 24, pp. 6047–6058, <https://doi.org/10.5194/hess-24-6047-2020>.
8. Siegenthaler A., Welch B., Pangala S.R., Peacock M., Gauci V. *Biogeosciences*, 2016, vol. 13, pp. 1197–1207, www.biogeosciences.net/13/1197/2016/.
9. Riddick S.N., Ancona R., Mbua M., Bell C.S., Duggan A., Vaughn T.L., Bennett K., Zimmerle D.J. *Atmos. Meas. Tech.*, 2022, vol. 15, pp. 6285–6296, <https://doi.org/10.5194/atm-15-6285-2022>.
10. Mitchell A.L., Tkacik D.S., Roscioli J.R., Herndon S.C., Yacovitch T.I., Martinez D.M., Vaughn T.L., Williams L.L., Sullivan M.R., Floerchinger C., Omara M., Subramanian R., Zimmerle D., Marchese A.J., Robinson A.L. *Environmental Science & Technology*, 2015, no. 20(49), pp. 12602, DOI: 10.1021/acs.est.5b04018.
11. Schoonbaert S.B., Tyner D.R., Johnson M.R. *Applied Phys. B*, 2015, vol. 119, pp. 133–142, DOI:10.1007/s00340-014-6001-0.

12. Roy S., Desikan R., Duttagupta S.P. *A novel, compact optical device for estimating the methane emissions in geological environment*, November 2016, <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1611/1611.08797.pdf>.
13. Cao F., Liu D., Lin J., Hu B., Liu D. *Front. Optoelectron. China*, 2010, no. 3(4), pp. 394–398.
14. Cubillas A.M., Lopez M.S., Lazaro J.M., Conde O.M., Petrovich M.N., Higuera J.M.L. *Photonic Crystal Fibers II*, 2008, Proc. SPIE, vol. 6990, DOI:10.1117/12.780587.
15. Wen-Qing W., Lei Z., Wei-Hua Z. *Procedia Engineering*, 2013, vol. 52, pp. 401–407.

Data on authors

- Imran G. Chobanzade** — National Aerospace Agency of the Azerbaijan Republic, Manager;
E-mail: ichobanzada@slb.com
- Aslan E. Babakhanov** — Post-Graduate Student; State Oil Company of the Azerbaijan Republic;
E-mail: babakhan2000@yahoo.com

Received 23.11.2021; approved after reviewing 06.07.2021; accepted for publication 28.02.23.