

УДК 551.501

Анализ возможности дистанционного лазерного обнаружения утечек пропана

Белов М.Л.^{1,*}, Титаренко К.С.¹,
Городничев В.А.¹

[*belov@bmsu.ru](mailto:belov@bmsu.ru)

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Проведен анализ возможностей дистанционного лазерного метода обнаружения утечек пропана из трубопроводов. Приведена оценка информационного параметра, измеряемого лидаром в полосе поглощения пропана около 3,3 мкм. Математическое моделирование проводилось для длин волн зондирования 3370 нм и 3550 нм. Считалось, что мониторинг утечек пропана проводится лидаром, установленным на летательном аппарате в моностатической схеме зондирования. Использовался метод дифференциального поглощения с рассеянием от земной поверхности. Показано, что при содержании пропана в утечке не менее 0,17 % (на порядок меньше концентрационного предела распространения пламени) задача дистанционного обнаружения утечек пропана может быть решена с вероятностью правильного обнаружения более 0,999 и вероятностью ложных тревог менее 0,001 при толщине слоя пропана на земной поверхности не менее 20 см.

Ключевые слова: дистанционный метод, обнаружение утечек пропана

Введение

В настоящее время пропан (C_3H_8) используют в качестве автомобильного топлива, топлива переносных электрогенераторов, на производстве и в быту (резка, сварка, при дорожных работах, для обогрева помещений, для газовых плит и т.п.). Несмотря на более высокую цену, пропан во многом удобнее природного газа (метана), так как в отличие от метана сжижается при комнатной температуре и сравнительно невысоком давлении.

Пропан является также одним из основных компонентов широкой фракции легких углеводородов (ШФЛУ), которая является продуктом переработки попутного нефтяного газа и газового конденсата. ШФЛУ относится к сжиженным углеводородным газам и представляет собой легкокипящую и легковоспламеняющуюся, пожаро- и взрывоопасную жидкость (у пропана нижний концентрационный предел распространения пламени равен 1,7% объемной доли). ШФЛУ используется в качестве основного сырья нефтехимических

предприятий для производства таких продуктов как каучук, пластмасса, растворители, компоненты высокооктановых бензинов и других (см., например, [1,2]).

На сегодняшний день существуют стационарные газоанализаторы утечек пропана (полупроводниковые, термokatалитические, инфракрасные и др.), предназначенные для постоянных измерений (в автоматическом режиме) дозрывоопасной концентрации пропана в смеси с воздухом и сигнализации о превышении максимально-допустимых дозрывоопасных концентраций пропана (см., например, [3]).

Пропан тяжелее воздуха, и поэтому при утечке газ стремится в низкие места - на пол комнаты, в углубления, подвалы, канализационные колодцы, овраги на местности и т.п. В помещениях стационарные газоанализаторы пропана устанавливаются на вертикальной стене ниже мест возможной утечки газа на высоте не более 0,25 м от пола.

Переносные газоанализаторы пропана позволяют контролировать наличие в воздухе этого химического вещества и его концентрацию в разных местах. На сегодняшний день эти устройства активно используются на производстве и в коммунальном хозяйстве.

Большой объем ШФЛУ транспортируется до нефтехимических предприятий по трубопроводам. Утечки таких трубопроводов приносят не только экономические потери, но и чрезвычайно опасны. Контроль за трубопроводами, транспортирующими ШФЛУ осуществляется с помощью внутритрубных датчиков давления. Однако, они неэффективны для обнаружения утечек небольшой интенсивности.

Для обнаружения утечек пропана небольшой интенсивности из трубопроводов перспективным представляется использование дистанционного газоанализатора, установленного на летательном аппарате (ЛА).

Оптические методы являются наиболее перспективными для оперативного дистанционного обнаружения утечек газопроводов и газоанализа загрязнений атмосферы (см., например, [4-9]).

1. Постановка задачи

Принцип действия оптического дистанционного газоанализатора в большинстве случаев основан на избирательном поглощении излучения молекулами детектируемого газа.

Метод дифференциального поглощения использует две длины волны излучения. Одна длина волны зондирования λ_1 , выбирается в максимуме полосы поглощения детектируемого газа, а вторая длина волны зондирования λ_2 - на краю или вне полосы поглощения газа [4].

Спектр сечения поглощения пропана в инфракрасной области известен [10]. Самое большое поглощения у пропана наблюдается вблизи длины волны 3,3 мкм. В других спек-

тральных областях поглощение значительно меньше по сравнению с этим пиком. Поэтому в статье будем использовать пик поглощения вблизи 3,3 мкм.

Более подробный спектр сечения поглощения пропана в области 3250-3570 нм [10] показан на рисунке 1.

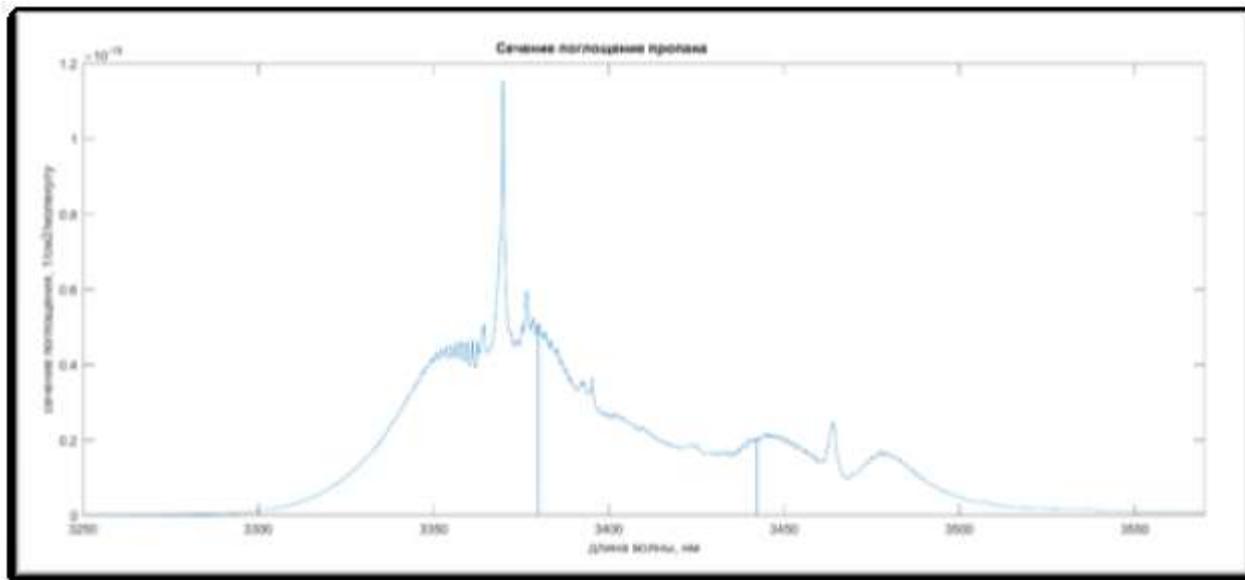


Рис. 1. Сечение поглощения пропана в области 3250-3570 нм

Для длины волны зондирования λ_1 логично выбрать длину волны в диапазоне 3350 – 3380 нм. Отметим, что выбранная длина волн лежит в потенциально безопасном для зрения спектральном диапазоне с длинами волн более 1,4 мкм [11].

В настоящее время разработаны детекторы для контроля утечек пропана (см., например, [12-15]). Однако, ранее исследование возможностей оптических дистанционных газоанализаторов (лидаров) для мониторинга утечек пропана не проводилось.

Доклад посвящен анализу возможностей дистанционного обнаружения утечек пропана.

2. Обнаружение утечек пропана на атмосферной трассе «лидар – земная поверхность - лидар»

При выборе конкретных значений длин волн зондирования λ_1 и λ_2 необходимо учитывать спектр поглощения пропана и спектр поглощения атмосферных газов. На рисунках 2-4 представлены графики сечения поглощения основных атмосферных газов, имеющих поглощение в интересующем нас спектральном диапазоне [10].

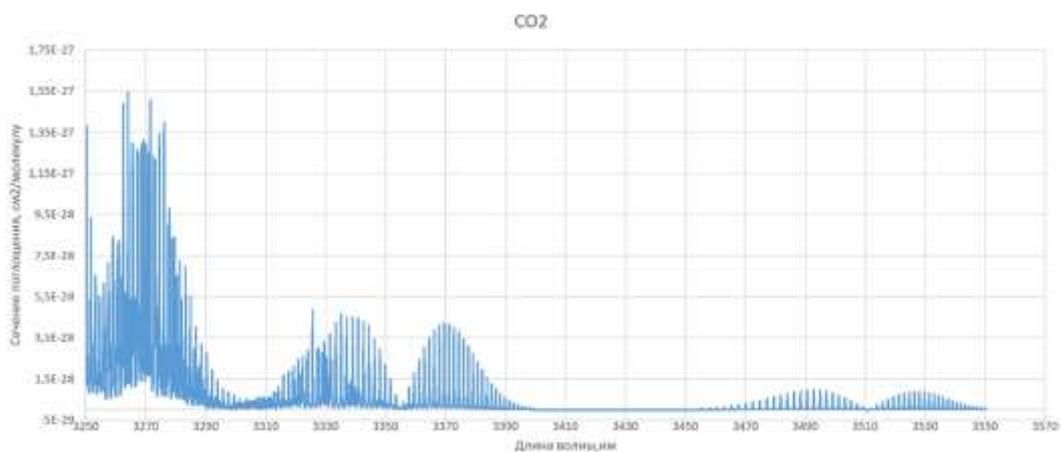


Рис. 2. Сечение поглощения углекислого газа в области 3250-3550 нм

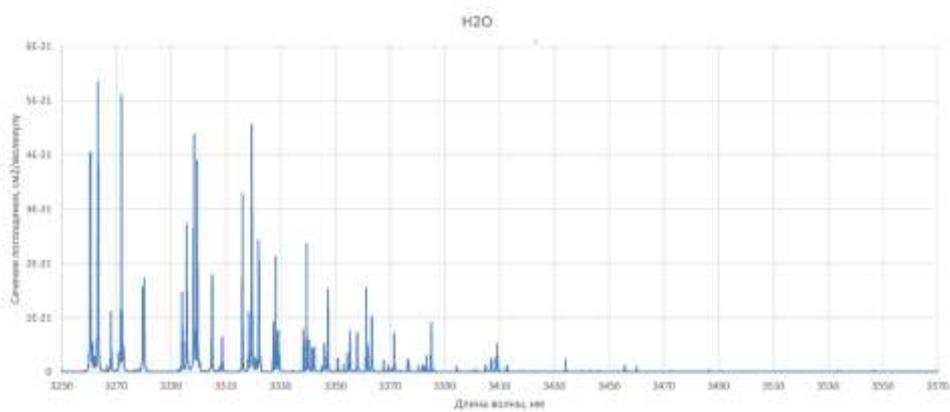


Рис.3. Сечение поглощения паров воды в области 3250-3550 нм

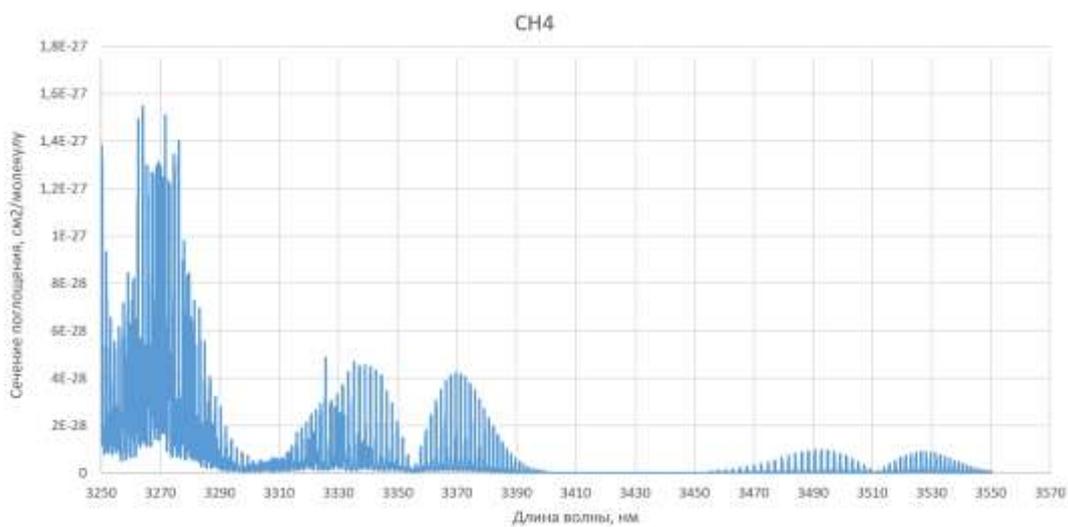


Рис.4. Сечение поглощения метана в области 3250-3550 нм

На основе данных о поглощении атмосферных газов и поглощения пропана для проведения расчетов в качестве длины волны зондирования λ_1 выберем 3370 нм, а для λ_2 - 3550 нм.

Считаем, что мониторинг утечек пропана проводится лидаром, установленным на летательном аппарате, в моностатической схеме зондирования (источник и приемник и их оптические оси совмещены - см. рисунок 5).

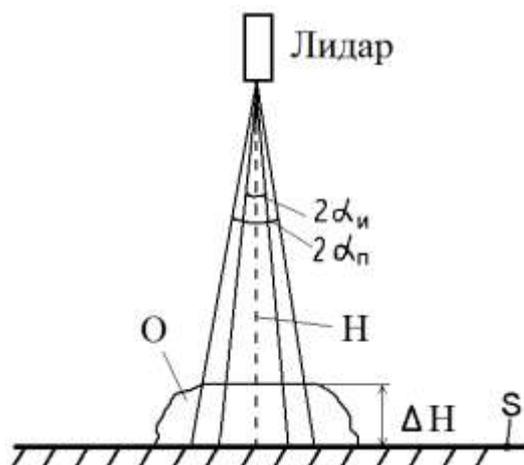


Рис.5. Схема вертикального моностатического зондирования. $2\alpha_{и}$, $2\alpha_{п}$ - углы расходимости лазерного источника и поля зрения приемника; O – слой пропана на земной поверхности; H – высота расположения авиационного носителя; ΔH – толщина слоя пропана; S - земная поверхность

При использовании для мониторинга утечек пропана метода дифференциального поглощения с рассеянием от земной поверхности выражения для мощности сигналов $P(\lambda_1)$ и $P(\lambda_2)$, принимаемых лидаром имеют вид (отражающую поверхность полагаем ламбертовской, земную атмосферу считаем прозрачной) [16]:

$$P(\lambda_1); \frac{a_{и}(\lambda_1)a_{п}T_{п}T_{и}T_aA}{H^2(\alpha_{и}^{-2} + \alpha_{п}^{-2})} \exp\{-2H\kappa_{атм}(\lambda_1) - 2\Delta H\kappa_{пр}(\lambda_1)\} \quad (1)$$

$$P(\lambda_2); \frac{a_{и}(\lambda_2)a_{п}T_{п}T_{и}T_aA}{H^2(\alpha_{и}^{-2} + \alpha_{п}^{-2})} \exp\{-2H\kappa_{атм}(\lambda_2)\} \quad (2)$$

где:

$$a_{и}(\lambda) = \frac{P_o(\lambda)}{\pi\alpha_{и}^2}; a_{п} = \pi r_{п}^2; C_{и,п} = (\alpha_{и,п}H)^{-2}; T_a = \exp\left(-2 \int_0^H \varepsilon(\lambda, z) dz\right);$$

A - альbedo земной поверхности; T_a - пропускание слоя аэрозольной атмосферы на трассе «лидар – земная поверхность -лидар»; $P_o(\lambda)$ – мощность лазерного источника на длине волны λ ; $T_{п}, T_{и}$ - коэффициенты пропускания приемной и передающей оптических систем лидара; $r_{п}$ - эффективный радиус приемного объектива лидара; $2\alpha_{и}, 2\alpha_{п}$ - угол рас-

ходимости источника излучения и угловое поле зрения приемной оптической системы ли-
дара; $k_{\text{атм}}(\lambda)$ – показатель поглощения атмосферы на трассе зондирования на длине вол-
ны λ ; $k_{\text{пр}}(\lambda)$ – показатель поглощения пропана в слое ΔH на земной поверхности на
длине волны λ .

Для обнаружения утечки пропана будем использовать информационный параметр,
который равен соотношению регистрируемых приемником мощностей на длинах волн
3370 нм и 3550 нм (считая для простоты, что $P_o(\lambda_1)$; $P_o(\lambda_2)$; при необходимости отли-
чие $P_o(\lambda_1)$ от $P_o(\lambda_2)$ можно учесть):

$$R = \frac{P(\lambda_1)}{P(\lambda_2)} ; \frac{\exp\{-2Hk_{\text{атм}}(\lambda_1) - 2\Delta Hk_{\text{пр}}(\lambda_1)\}}{\exp\{-2Hk_{\text{атм}}(\lambda_2)\}}$$

Для расчета информационного параметра примем длину трассы зондирования H ,
равной 300 м; давление 1 атмосфера, температура 15 °С, спектральная ширина источника
излучения ~ 8 нм (например, параметрический генератор света Ekspla NT377A [17]).

Тогда, для коэффициентов поглощения атмосферы на длинах волн λ_1 и λ_2 имеем:

$$k_{\text{атм}}(\lambda_1) = 2,978 \cdot 10^{-6} \text{ см}^{-1} ; k_{\text{атм}}(\lambda_2) = 5,088 \cdot 10^{-7} \text{ см}^{-1}.$$

Значение информационного параметра было рассчитано для разной высоты слоя
пропана на земной поверхности и разной концентрации пропана в слое. В таблице 1 пред-
ставлены рассчитанные значения информационного параметра R для разной высоты слоя
пропана и разных значений концентрации пропана. Фоновое значение информационного
параметра $R_{\text{фон}} = 0,852$.

Таблица 1 -Значения информационного параметра R

Содержание пропана, %	Высота слоя пропана, см				
	20	40	60	80	100
0,01	0,800	0,752	0,706	0,663	0,623
0,02	0,752	0,663	0,585	0,517	0,456
0,04	0,663	0,517	0,402	0,313	0,244
0,06	0,585	0,402	0,276	0,190	0,131
0,08	0,517	0,313	0,190	0,115	0,070
0,1	0,456	0,244	0,131	0,070	0,037
0,17	0,307	0,111	0,040	0,014	0,005

Сравнение результатов расчета информационного параметра R с фоновым инфор-
мационным параметром $R_{\text{фон}}$ показывает возможность обнаружения утечки пропана.

Для количественной оценки эффективности дистанционного обнаружения утечек
пропана проводилось статистическое моделирование.

3. Обнаружение утечек пропана на атмосферной трассе «лидар – земная поверхность - лидар»

В работе проводилось вычисление вероятности правильного обнаружения утечки пропана $P_{пр}$ (обнаружение утечки, когда она есть в действительности) и вероятности ложных тревог $P_{лт}$ (обнаружение утечки, когда ее в действительности нет). Моделирование было проведено по 10^5 шумовых реализаций. Полагалось, что шум измерения распределен по гауссовскому закону со средним значением равным нулю и относительным среднеквадратическим отклонением в диапазоне от 1 до 5 %.

Решение об обнаружении утечек пропана принималось, когда значение информационного параметра R было меньше порогового (пороговое значение принималось равным среднему между значениями $R_{фон}$ и R).

Результаты математического моделирования вероятностей $P_{пр}$ и $P_{лт}$ приведены в таблицах 2 и 3 при разной толщине слоя пропана и разном содержании пропана для шума измерения 5 %.

Таблица 2. Значение вероятности правильного обнаружения

Содержание пропана, %	Высота слоя пропана, см				
	20	40	60	80	100
0,01	0,673	0,819	0,917	0,969	0,991
0,02	0,819	0,969	0,998	>0,999	>0,999
0,04	0,969	>0,999	>0,999	>0,999	>0,999
0,06	0,998	>0,999	>0,999	>0,999	>0,999
0,08	>0,999	>0,999	>0,999	>0,999	>0,999
0,1	>0,999	>0,999	>0,999	>0,999	>0,999
0,17	>0,999	>0,999	>0,999	>0,999	>0,999

Таблица 3. Значение вероятности ложных тревог

Содержание пропана, %	Высота слоя пропана, см				
	20	40	60	80	100
0,01	0,333	0,197	0,104	0,049	0,021
0,02	0,197	0,049	0,008	0,001	0
0,04	0,049	0,001	<0,001	<0,001	<0,001
0,06	0,008	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
0,08	0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
0,1	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
0,17	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001

Результаты, приведенные в Таблицах 2 и 3, показывают, что при содержании пропана в утечке не менее 0,17 % (на порядок меньше концентрационного предела распространения пламени) задача дистанционного обнаружения утечек пропана из трубопровода может быть решена с вероятностью правильного обнаружения более 0,999 и вероятностью

ложных тревог менее 0,001 при толщине слоя пропана на земной поверхности не менее 20 см.

Заключение

Проведен анализ возможностей дистанционного лазерного метода обнаружения утечек пропана из трубопроводов. Приведена оценка информационного параметра, измеряемого лидаром в полосе поглощения пропана около 3,3 мкм. Показано, что при содержании пропана в утечке не менее 0,17 % (на порядок меньше концентрационного предела распространения пламени) задача дистанционного обнаружения утечек пропана может быть решена с вероятностью правильного обнаружения более 0,999 и вероятностью ложных тревог менее 0,001 при толщине слоя пропана на земной поверхности не менее 20 см.

Список литературы

1. Devold H. Oil and gas production handbook. ABB Oil and Gas. Oslo. 2013. 162 p.
2. Uses of LPG. Available at: <https://www.elgas.com.au/blog/1681-what-is-lpg-used-for-liquefied-petroleum-gas-propane-applications>, accessed 02.12.2020.
3. Yunusa Z., Hamidon M.N., Kaiser A., Awang Z. Gas Sensors: A Review. // Sensors & Transducers. 2014. V. 168, Issue 4, P. 61-75.
4. Demtredner V. Laser Spectroscopy. Springer-Verlag: Berlin Heidelberg New York. 2003. 917 p.
5. Park H., Lee K., Kang G., Song S., Jung Y., Kim K., Bae J., Lee J., Park H. Reliable optical measurement of water vapor in highly scattering environment // Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc. 2009. 72(3). P. 510-514.
6. Persson L., Lewander M., Andersson M., Svanberg K., Svanberg S. Simultaneous detection of molecular oxygen and water vapor in the tissue optical window using tunable diode laser spectroscopy // Appl Opt. 2008. 47(12). P. 2028-2034.
7. Mei L, Somesfalean G, Svanberg S. Pathlength determination for gas in scattering media absorption spectroscopy // Sensors (Basel). 2014. 14(3). P. 3871-3890
8. Druy M., Frish M.B., Kessler W.J. From Laboratory Technique to Process Gas Sensor - The Maturation of Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy // Spectroscopy. 2006. 21(3). P. 14-18.
9. Berezin A.G., Ershov O.V., Nadezhdinskii A.J. Trace complex-molecule detection using near-IR diode lasers // Appl. Phys.B. 2002. V. 75, N. 2-3. P. 203-214.
10. Absorption Cross Sections. HITRAN. Available at: <https://hitran.org/>, accessed 02.12.2020.
11. Corbett J., Woods M. UV laser radiation: skin hazards and skin protection controls. // International Laser Safety Conference. 2013. Paper #303. P. 1-8.
12. Infrared Point Detector for Hydrocarbon Gas Detection. Available at: <https://ru.scribd.com/document/81260678/Ir2100-Data>, accessed 02.12.2020.

13. Kluczynski P., Lundqvist S., Belahsene S., Rouillard Y., Nähle L., Fischer M. and Koeth J. Detection of propane using tunable diode laser spectroscopy at 3.37 μm // Applied Physics B. 2012. V. 108. P.183–188.
14. Zhang G., Li Y. and Li Q. A miniaturized carbon dioxide gas sensor based on infrared absorption // Optics and Lasers in Engineering. 2010. V. 48, No. 12. P.1206–1212.
15. Kasai N., Tsuchiya C., Fukuda T., Sekine K., Sano T. and Takehana T. Propane gas leak detection by infrared absorption using carbon infrared emitter and infrared camera // NDT & E International. 2011. V. 44, No. 1. P. 57–60.
16. Zuev V.E. Signals and noise in laser ranging // Journal of Russian Laser Research. 1987. V. 8. P. 283-426.
17. Nano tunable lasers. NT370 серия. Available at:
https://www.czl.ru/netcat_files/userfiles/pdf/nano_tunable_lasersnt370.pdf, accessed 02.12.2020.

Analysis of the Possibility of Remote Laser Detection of Propane Leaks

M.L. Belov^{1,*}, K.S. Titarenko¹,
V.A. Gorodnichev¹

[*belov@bmstu.ru](mailto:belov@bmstu.ru)

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: laser remote sensing method, detection of propane leak

Propane is one of the main components of the wide fraction of light hydrocarbons (WLHF). A large volume of WLHF is transported to petrochemical plants via pipelines. Control of pipelines is carried out by means of in-line pressure sensors. However, they are ineffective for detecting low-intensity leaks.

To detect low-intensity propane leaks from pipelines, it is promising to use a remote laser gas analyzer installed on an aircraft.

The article is devoted to the analysis of the possibilities of remote laser detection of propane leaks.

Based on the data on the absorption of propane and atmospheric gases, the wavelengths of 3370 nm (in the maximum absorption of propane) and 3550 nm (in the spectral region where there is no absorption of propane) were chosen as the sounding wavelengths.

It was believed that the monitoring of propane leaks is carried out by a lidar installed on the aircraft in a monostatic sensing scheme. The method of differential absorption with scattering from the earth's surface is used.

To detect propane leaks, an information parameter was used, which is equal to the ratio of the power recorded by the receiver at wavelengths of 3370 nm and 3550 nm. The value of the information parameter was calculated for different heights of the propane layer on the earth's surface and different concentrations of propane in the layer.

Statistical modeling was performed to quantify the effectiveness of remote detection of propane leaks.

In the work, the probability of correct detection of a propane leak (detection of a leak when it is in reality) and the probability of false alarms (detection of a leak when it is not in reality) were calculated.

The decision to detect propane leaks was made when the value of the information parameter was less than the threshold.

The results of mathematical modeling show that for a propane content in the leak of at least 0.17 % (an order of magnitude less than the concentration limit of flame propagation), the problem of remote detection of propane leaks from the pipeline can be solved with a probability of correct detection of more than 0.999 and a probability of false alarms of less than 0.001 with a thickness of the propane layer on the earth's surface of at least 20 cm.

References

1. Devold H. Oil and gas production handbook. ABB Oil and Gas. Oslo. 2013. 162 p.
2. Uses of LPG. Available at: <https://www.elgas.com.au/blog/1681-what-is-lpg-used-for-liquefied-petroleum-gas-propane-applications>, accessed 02.12.2020.
3. Yunusa Z., Hamidon M.N., Kaiser A., Awang Z. Gas Sensors: A Review. // Sensors & Transducers. 2014. V. 168, Issue 4, P. 61-75.
4. Demtredner V. Laser Spectroscopy. Springer-Verlag: Berlin Heidelberg New York. 2003. 917 p.
5. Park H., Lee K., Kang G., Song S., Jung Y., Kim K., Bae J., Lee J., Park H. Reliable optical measurement of water vapor in highly scattering environment // Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc. 2009. 72(3). P. 510-514.
6. Persson L., Lewander M., Andersson M., Svanberg K., Svanberg S. Simultaneous detection of molecular oxygen and water vapor in the tissue optical window using tunable diode laser spectroscopy // Appl Opt. 2008. 47(12). P. 2028-2034.
7. Mei L, Somesfalean G, Svanberg S. Pathlength determination for gas in scattering media absorption spectroscopy // Sensors (Basel). 2014. 14(3). P. 3871-3890
8. Druy M., Frish M.B., Kessler W.J. From Laboratory Technique to Process Gas Sensor - The Maturation of Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy // Spectroscopy. 2006. 21(3). P. 14-18.
9. Berezin A.G., Ershov O.V., Nadezhdinskii A.J. Trace complex-molecule detection using near-IR diode lasers // Appl. Phys.B. 2002. V. 75, N. 2-3. P. 203-214.
10. Absorption Cross Sections. HITRAN. Available at: <https://hitran.org/>, accessed 02.12.2020.
11. Corbett J., Woods M. UV laser radiation: skin hazards and skin protection controls. // International Laser Safety Conference. 2013. Paper #303. P. 1-8.
12. Infrared Point Detector for Hydrocarbon Gas Detection. Available at: <https://ru.scribd.com/document/81260678/Ir2100-Data>, accessed 02.12.2020.
13. Kluczynski P., Lundqvist S., Belahsene S., Rouillard Y., Nähle L., Fischer M. and Koeth J. Detection of propane using tunable diode laser spectroscopy at 3.37 μm // Applied Physics B. 2012. V. 108. P.183–188.
14. Zhang G., Li Y. and Li Q. A miniaturized carbon dioxide gas sensor based on infrared absorption // Optics and Lasers in Engineering. 2010. V. 48, No. 12. P.1206–1212.

15. Kasai N., Tsuchiya C., Fukuda T., Sekine K., Sano T. and Takehana T. Propane gas leak detection by infrared absorption using carbon infrared emitter and infrared camera // NDT & E International. 2011. V. 44, No. 1. P. 57–60.
16. Zuev V.E. Signals and noise in laser ranging // Journal of Russian Laser Research. 1987. V. 8. P. 283-426.
17. Nano tunable lasers. NT370 серия. Available at:
https://www.czl.ru/netcat_files/userfiles/pdf/nano_tunable_lasersnt370.pdf, accessed 02.12.2020.