

УДК 622.6:662.769.21:535.14

**ИНФРАКРАСНАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ С
ОТРАБОТАВШИМИ ГАЗАМИ СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК****Зубко Сергей Сергеевич¹**, аспирант*e-mail:* 1992sergeyz@mail.ru**Краевой Алексей Игоревич¹**, аспирант*e-mail:* kraevoy@mail.ru**Неустроев Захар Александрович¹**, аспирант*e-mail:* ZakharNeustroev@gmail.com**Туркин Владимир Антонович¹**, профессор, доктор технических наук*e-mail:* turvla@mail.ru

¹ Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, Новороссийск, Россия

Аннотация. При эксплуатации судовых двигателей, работающих на сжиженном природном газе, возникает проблема проскока метана. Для его мониторинга предлагается использовать инфракрасное излучение. Экспериментальная проверка допустимости такого подхода проверена по интегральному сечению поглощения молекулы н-гексана. Показано, что использование градуировочного графика по одному компоненту является допустимым для контроля выбросов метана с погрешностью порядка 25 %. Предлагаемая ИК-система отличается малыми массогабаритными характеристиками и может быть встроена в существующее оборудование судовых энергетических установок.

Ключевые слова: судовые двигатели, сжиженный природный газ, проскок метана, мониторинг, инфракрасный детектор, калибровка, молекулы н-гексана.

**INFRARED SYSTEM FOR MONITORING HARMFUL EMISSIONS IN EXHAUST
GASES OF MARINE POWER PLANTS****Sergey S. Zubko¹**, Doctoral Student*e-mail:* 1992sergeyz@mail.ru**Alexey I. Kraevoy¹**, Doctoral Student*e-mail:* kraevoy@mail.ru**Zakhar A. Neustroev¹**, Doctoral Student*e-mail:* ZakharNeustroev@gmail.com**Vladimir A. Turkin¹**, Professor, Doctor of Technical Sciences*e-mail:* turvla@mail.ru

¹ Admiral Ushakov Maritime State University, Novorossiysk, Russia

Abstract. Methane leakage is a problem that arises when operating marine engines powered by liquefied natural gas. It is proposed to use infrared radiation for monitoring this leakage. The feasibility of this approach was experimentally verified using the integrated absorption cross-section of the n-hexane molecule. It was shown that using a calibration curve for a single component is acceptable for monitoring methane emissions with an error of approximately 25%. The proposed IR system is compact in size and weight and can be integrated into existing marine power plant equipment.

Keywords: marine engines, liquefied natural gas, methane slip, monitoring, infrared detector, calibration, n-hexane molecules.

Вопросы экологичности и энергосбережения становятся одной из наиболее актуальных проблем современной морской отрасли. В настоящее время тяжелое топливо остается основным видом топлива для большинства судов благодаря своей экономической эффективности, однако его сгорание сопровождается значительными выбросами оксидов азота, серы, углерода и твердых частиц [1–2]. В связи с этим Международная морская организация (ИМО) инициировала стратегию по сокращению выбросов парниковых газов к 2050 году на 50 % по сравнению с уровнем 2008 года, что требует внедрения альтернативных видов судового топлива.

В качестве перспективных низкоуглеродных и безуглеродных видов топлива рассматриваются сжиженный природный газ (СПГ), аммиак, метанол, водород, биотопливо и топливные элементы [3]. Среди них СПГ является наиболее широко используемым альтернативным топливом для судовых энергетических установок благодаря высокой энергетической эффективности, технической отработанности и развитой инфраструктуре [4]. Использование СПГ позволяет сократить выбросы NO_x до 90 %, выбросы SO_x и твердых частиц практически до 100 %, а выбросы CO_2 – до 30 % по сравнению с традиционным мазутом [5].

Однако применение СПГ сопровождается проблемой проскока метана – выброса части несгоревшего топлива с отработавшими газами судовых двигателей. Метан является мощным парниковым газом, поэтому контроль его концентрации в потоке выхлопных газов представляет собой важную экологическую и техническую задачу.

Для мониторинга выбросов углеводородов перспективным является использование методов инфракрасной (ИК) спектроскопии, основанных на поглощении ИК-излучения молекулами алканов в области колебательных переходов связей C–H. Измерение концентрации молекул углеводородов по спектрам инфракрасного поглощения широко применяется в промышленности [6].

Однако существующие методы анализа состава СПГ в основном ориентированы на лабораторные измерения и не обеспечивают оперативного контроля концентрации углеводородов в реальном времени [7].

В настоящее время для измерения концентрации углеводородов используются датчики, работающие на принципе поглощения ИК излучения [8–9]. Однако компактные системы мониторинга молекул с погрешностью не более 25 % не разработаны [10].

В связи с настоящей работа посвящена исследованию светодиодной ИК системы для определения зависимости оптической плотности молекул СПГ от их концентрации.

Параметры молекул приведены в таблице 1.

Анализ спектров инфракрасного поглощения молекул оксидов и алканов по данным спектральных библиотек [11–14] показал, что полосы ИК-поглощения оксидов и углеводородов имеют существенно различающиеся волновые числа максимумов. Это

позволяет проводить их количественный анализ в газовой среде с использованием параметров полос поглощения, приведенных в таблице 1.

Таблица 1. Параметры исследуемых молекул

Молекула	ν , см^{-1}	λ , мкм	Сечение ИК поглощения $\varepsilon \cdot 10^{18} \text{ см}^2$	ПДК, $\text{мг/м}^3; \text{см}^{-3}$
Оксид азота NO	1917,5	5,215	0,67	0,4; $7,8 \cdot 10^{12}$
Диоксид азота NO ₂	2605,4	3,838	2,68	0,2; $6,0 \cdot 10^{12}$
Диоксид серы SO ₂	2499,1	4,001	0,02	0,5; $4,7 \cdot 10^{12}$
Метан CH ₄	2914(сим)	3,391	0,6	7000; $2,6 \cdot 10^{17}$
Этан C ₂ H ₆	2954	3,348	1,14	50; $5,0 \cdot 10^{15}$
Гексан C ₆ H ₁₄	2886	3,369	1,72	60; $4,2 \cdot 10^{14}$

При этом полосы инфракрасного поглощения алканов располагаются в близких спектральных областях и могут частично перекрываться.

Поскольку содержание метана в СПГ превышает 90 %, рассмотрим его концентрацию как основной вклад.

Для определения концентрации метана используется закон Бугера–Ламберта–Бера:

$$I = I_0 \exp(-kl) \quad (1)$$

где $\ln(I_0/I)$ – оптическая плотность; $k = \sigma N$ – коэффициент ослабления; σ – показатель поглощения; l – толщина поглощающего слоя; N – концентрация молекул.

Оптическая плотность среды определяется выражением:

$$D = \ln(I_0/I) \quad (2)$$

Если полоса ИК-поглощения свободна от наложения полос других компонентов газовой смеси, концентрация исследуемого вещества может быть определена сравнением спектра исследуемой пробы со спектрами известных смесей [15, 16].

Данный метод предполагает решение задач: 1) определение показателя поглощения пропускания излучения с малой погрешностью; 2) определение положения линии 100 %-ного пропускания основы образца без молекул метана [15].

Для измерения концентрации молекул была разработана ИК система, работающая на измерении оптической плотности газовой среды при прохождении ИК излучения.

Система реализована с использованием полупроводникового светодиода в качестве источника излучения на длине волны 3,39 мкм и двух фотодиодов в качестве фотоприемников IoffeLed (Санкт-Петербург, РФ) [17].

Опорный канал предназначен для компенсации нестабильности мощности источника излучения, влияния внешних условий эксплуатации и загрязнения оптических элементов сенсора, включая возможную конденсацию паров метана на поверхности оптики. Использование отношения сигналов измерительного и опорного каналов позволяет уменьшить систематическую погрешность измерений.

В ходе лабораторных исследований были проведены измерения оптической плотности газовой смеси при различных концентрациях метана.

Значения объемной концентрации были пересчитаны в массовые C и счетные концентрации молекул N и рассчитаны счетные концентрации N_c на длине волны 3,39 мкм: $\sigma = 0,6 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2$.



Результаты измерений и расчетов представлены в Таблице 2 и на Рисунке 1.

Корреляционные зависимости между расчетными и измеренными значениями концентраций представлены на Рисунке 2.

Таблица 2. Массовая C и счетная N концентрации метана

Об. %	D , отн. единиц	C , кг/м ³	N , м ⁻³	N_c , м ⁻³
100	0,442			
90	0,442			
80	0,442	0,570	2,14E+25	2,14E+25
70	0,388	0,498	1,87E+25	1,88E+25
60	0,336	0,427	1,61E+25	1,63E+25
50	0,219	0,356	1,34E+25	1,31E+25
40	0,154	0,285	1,07E+25	8,95E+24
30	0,074	0,214	8,00E+24	7,12E+24
20	0,036	0,142	5,35E+22	1,76E+24
10	0,036			
0	0			

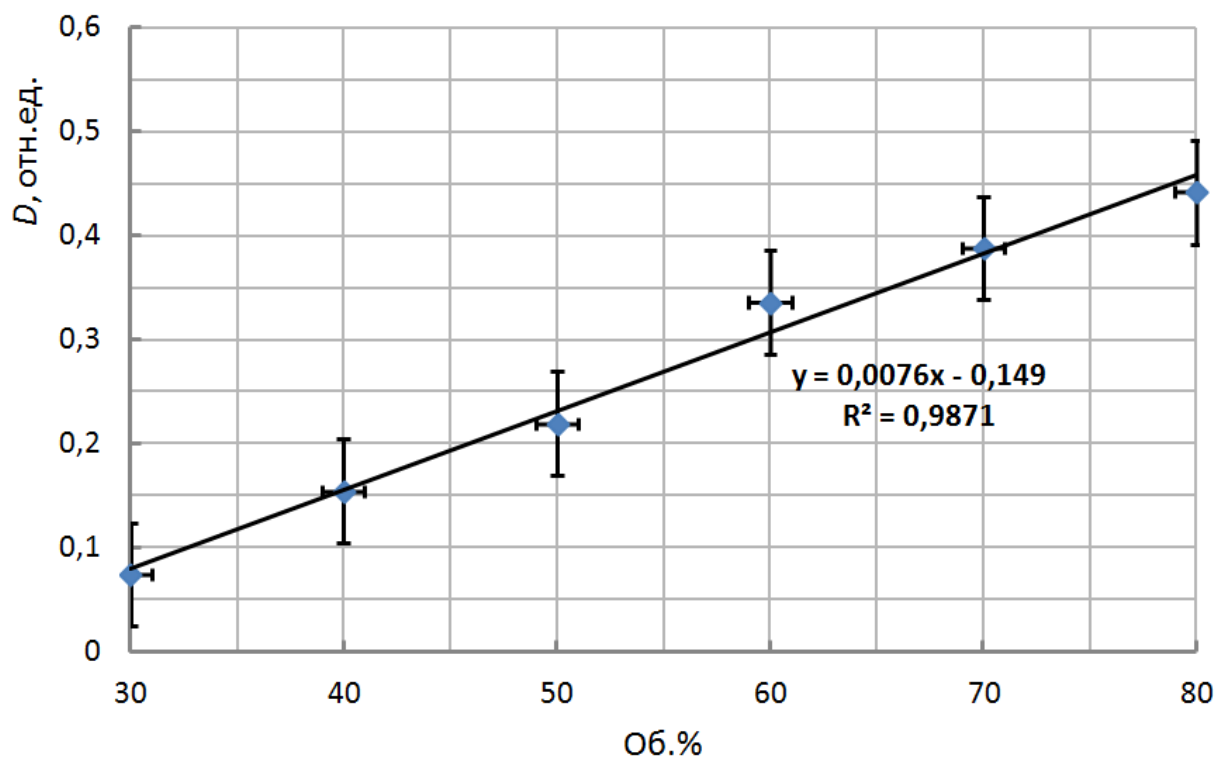


Рисунок 1 – Зависимости оптической плотности газовой смеси D от концентрации метана в смеси

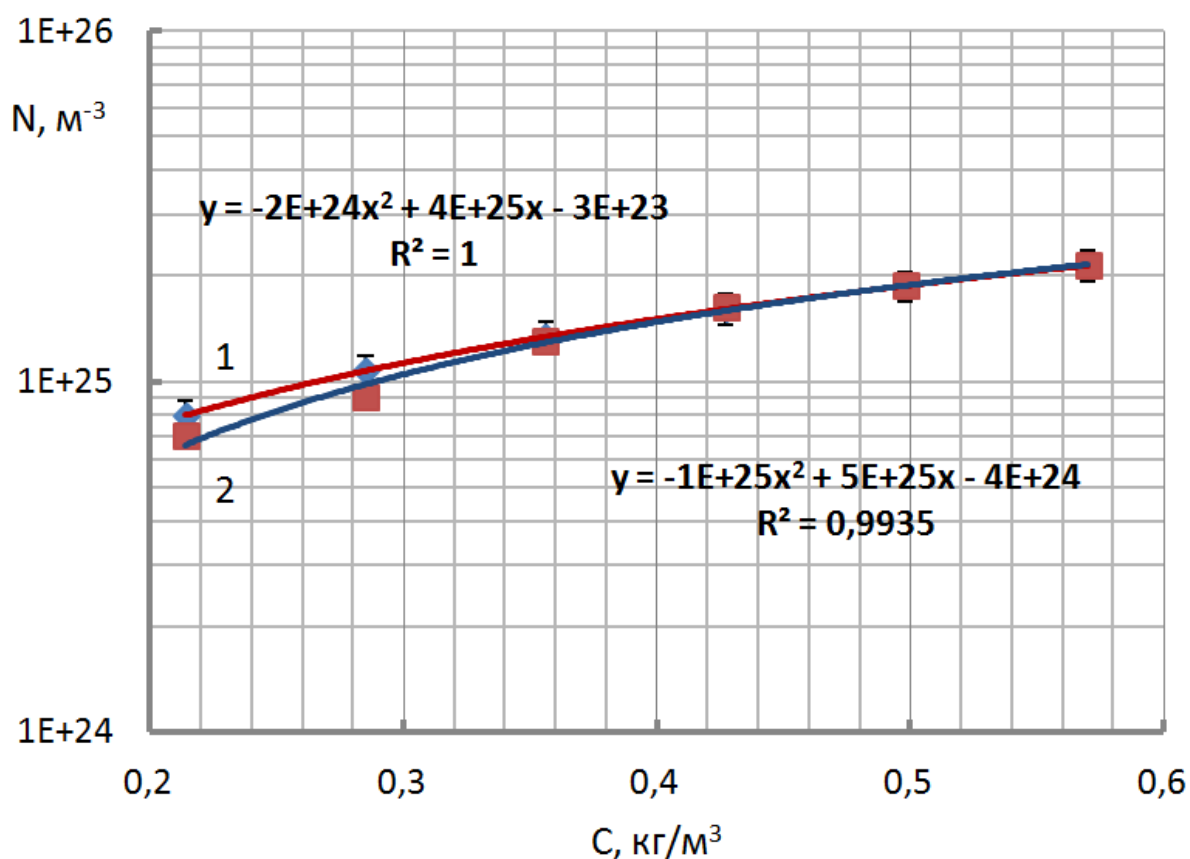


Рисунок 2 – Корреляционные зависимости между значениями N и N_c

Для оценки характеристик ИК-системы в качестве эталонного метода был использован метод газовой хроматографии [16]. В качестве калибровочного вещества была выбрана молекула н-гексана, для которой при концентрации 38 г/м³ было измерено интегральное сечение поглощения.

Согласно методике газохроматографического анализа систематическая погрешность составляет $\pm 23\%$, а случайная погрешность измерений – около 3 %.

С учетом систематической и случайной составляющих суммарная погрешность измерений составила 23,2 %, что удовлетворяет требованиям ГОСТ 12.1.005-88 для газоаналитического оборудования.

Полученные результаты показывают, что использование градуировочного графика по одному компоненту является допустимым для измерения концентрации алканов в исследуемой газовой смеси при относительной погрешности не более 25 %.

Предлагаемая инфракрасная система обладает малыми массогабаритными характеристиками, использует недорогие инфракрасные светодиоды и может быть встроена в существующее оборудование судовых энергетических установок для мониторинга выбросов метана и других углеводородов.

По сравнению с ранее разработанными лидарными системами мониторинга на основе комбинационного рассеяния света предлагаемая ИК-система отличается меньшей стоимостью и большей простотой практической реализации при сопоставимой погрешности измерений.

Список литературы:

1. Modina M.A., Kheckert E.V., Epikhin A.I., Voskanyan A.A., Shkoda V.V., Pismenskaya Yu.V. Ways to reduce harmful emissions from the operation of power plants in special environmental control areas. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021, 867. 012104.
2. Крстич С., Модина М.А., Кузнецова Ю.С., Хекерт Е.В., Епихин А.И., Козенкова Г.Л., Карапетян Г.А. Снижение токсичности отработавших газов морских судов // Эксплуатация морского транспорта. 2023. № 1 (106). С. 184-188.
3. Fan A., Wang J., He Y., et al. Decarbonising inland ship power system: alternative solution and assessment method, Energy. 2021. 226. 120266.
4. Deng J., Wang X., et al. A review of NO_x and SO_x emission reduction technologies for marine diesel engines and the potential evaluation of liquefied natural gas fuelled vessels. Sci. Total Environ. 2021. 766. 144319.
5. Balcombe P., Staffell I., Kerdan I.G., et al. How can LNG-fuelled ships meet decarbonisation targets? An environmental and economic analysis. Energy. 2021. 227. 120462.
6. Transportation of liquefied natural gas by sea (gas tankers). – URL: <https://shipshub.com/ru/article/1394-2.html> (дата обращения: 06.11.2025).
7. ПНД Ф 13.1:2:3.25-99 (Издание 2005 г.) Методика выполнения измерений массовых концентраций предельных углеводородов C₁–C₁₀ (суммарно в пересчете на углерод), непредельных углеводородов C₂–C₅ (суммарно в пересчете на углерод) и ароматических углеводородов (бензола, толуола, этилбензола, ксилолов, стирола) при их совместном присутствии в атмосферном воздухе, воздухе рабочей зоны и промышленных выбросах методом газовой хроматографии. М., 1999, 25 с.
8. Ахмедов Э.Р., Понуровский Я.Я. Газоанализатор дистанционного измерения концентрации метана на основе диодного лазера ближнего ИК диапазона и выносного оптоволоконного датчика. Вестник МГТУ МИРЭА. 2015, № 2 (7), С. 67-82.
9. Загнитько А.В., Мацуков И.Д. Сканирующий инфракрасный анализатор метана и паров углеводородов в атмосферном воздухе. Патент РФ на полезную модель RU 207026. Опубликовано 07.10.2021.
10. Щербакова С.Н., Венгеров А.С. Анализ методов детектирования утечек метана. Российский химический журнал. 2021. Т. LXV. № 4. С. 72-76.
11. National Institute of Standards and Technology. – URL: <http://www.webbook.nist.gov> (дата обращения: 25.11.2011).
12. Pacific Northwest National Laboratory. – URL: <http://www.pnl.gov/> (дата обращения: 01.12.2011).
13. HITRAN. – URL: <https://hitran.org/xsc/> (дата обращения: 01.12.2011).
14. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. – М.: Мир, 1987. – 550 с.
15. Сverdlov L.M., Kovner M.A., Krainov E.P. Колебательные спектры многоатомных молекул. – М.: Наука, 1970. – 559 с.
16. Смит А. Прикладная ИК-спектроскопия: Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 328 с.
17. Васильев А.О., Чартий П.В., Шеманин В.Г. Метрологическое обеспечение инфракрасного детектора выбросов углеводородов в атмосферу // Безопасность в техносфере. – 2012. – № 5. – С. 19-22.

