

УДК 622.6:662.769.21:535.14

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА В КАЧЕСТВЕ ОСНОВНОГО ТОПЛИВА ДЛЯ СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК И ПРОБЛЕМА КОНТРОЛЯ ВЫБРОСОВ МЕТАНА

Краевой Алексей Игоревич¹, аспирант

e-mail: kraevoy@mail.ru

Воробец Игорь Алексеевич¹, аспирант

e-mail: vorobecz00@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. Использование судами сжиженного природного газа (СПГ) приводит к уменьшению выбросов CO₂, NO_x, SO_x и твердых частиц. Однако здесь недостатком является проскок метана: выброс остатков газового топлива, не полностью сгоревшего в двигателях. Для обнаружения проскока основного компонента СПГ – метана, предложено использовать метод обнаружения молекул метана в газо-воздушной среде лидаром комбинационного рассеяния света. Показано, что на длине волны лазерного излучения 405 нм можно получить минимальное время обнаружения проскока метана с отработавшими газами судовых дизельных двигателей, работающих на СПГ.

Ключевые слова: судовой дизельный двигатель, топливо, сжиженный природный газ, проскок метана, обнаружение, лидар, комбинационное рассеяние света.

USE OF LIQUEFIED NATURAL GAS AS THE MAIN FUEL FOR MARINE POWER PLANTS AND THE PROBLEM OF METHANE EMISSION CONTROL

Alexey I. Kraevoy¹, Doctoral Student

e-mail: kraevoy@mail.ru

Igor A. Vorobets¹, Doctoral Student

e-mail: vorobecz00@gmail.com

Vladimir A. Turkin¹, Professor, Doctor of Technical Sciences

e-mail: turvla@mail.ru

¹ Admiral Ushakov Maritime State University, Novorossiysk, Russia

Abstract. The use of liquefied natural gas (LNG) by ships reduces emissions of CO₂, NO_x, SO_x and particulate matter. However, methane slip is a disadvantage: the release of residual gas fuel that is not completely burned in the engines. To detect the slip of the main component of LNG - methane, it is proposed to use a method for detecting methane molecules in a gas-air environment using a

Raman lidar. It is shown that at a laser wavelength of 405 nm, it is possible to obtain the minimum detection time for methane slip with exhaust gases of marine diesel engines running on LNG.

Keywords: marine diesel engine, fuel, liquefied natural gas, methane slip, detection, lidar, Raman scattering.

С целью снижения воздействия на окружающую среду судоходство подчиняется все более строгим правилам, установленным Международной морской организацией (ИМО) в отношении содержания серы в топливе, используемом судами, а также выбросов оксидов азота. Начиная с мая 2025 года весь район Средиземноморья станет зоной контроля выбросов серы (SECA), где содержание серы в топливе ограничено 0,1 %. Кроме того, международные воды также включают зоны контроля выбросов NO_x (NECA) [1, 2].

Сжигание природного газа в двухтопливных двигателях позволяет соблюдать самые строгие ограничения по NO_x (нормативы TIER III) [3].

Кроме того, СПГ является практически не содержащим серы топливом, и при его сгорании образуется на 90 – 99 % меньше SO_x и на 90 % меньше твердых частиц (PM), чем в двигателях на тяжелом топливе (HFO). Кроме того, в контексте сокращения выбросов CO_2 , СПГ, который в основном состоит из метана (CH_4), выделяет меньше CO_2 , чем традиционное судовое топливо: при сгорании СПГ выделяется примерно на 20 – 25 % меньше CO_2 по сравнению с HFO (тяжелым топливом) и MGO (судовым газойлем) из-за более высокого соотношения водорода к углероду [4].

Однако, основной компонент СПГ – метан является мощным парниковым газом, и ключевым недостатком этих двигателей является выброс части несгоревшего газа в атмосферу. Это так называемое явление «проскока метана» в первую очередь возникает из-за неполного сгорания при низких нагрузках, щелевого захвата и потерь на продувку при перекрытии клапанов [5].

На борту судна выбросы метана могут происходить из двух источников: неконтролируемые выбросы, связанные с вентиляцией резервуаров, или проскок метана при неполном сгорании в двигателях. Однако правила (Кодекс IGF; ИМО, 2022) ограничивают выброс паров СПГ-топлива чрезвычайными ситуациями. При нормальной работе испаряющаяся фракция СПГ должна либо сжигаться в двигателях или котлах, либо перерабатываться путем повторного сжижения или повторного сжатия для хранения.

В современных морских двухтактных двигателях используются два основных цикла сгорания: цикл Дизеля и цикл Отто. Двигатели с непосредственным впрыском высокого давления (HPDI), использующие цикл Дизеля, работают при высоких температурах и давлениях, обеспечивая полное сгорание и минимизируя проскок метана.

Напротив, двигатели, использующие цикл Отто, работают с более низкими степенями сжатия и температурой сгорания, что особенно присуще двигателям с большим диаметром цилиндра, где распространение пламени к стенке цилиндра приводит к снижению температур и потенциальному эффекту гашения.

В двигателях с циклом Отто с более низкой температурой сгорания метан может не сгореть полностью, что может привести к вытеканию несгоревшего метана из цилиндра и зазора цилиндра при открытии выпускного клапана. Следовательно, анализ этих двигателей чрезвычайно важен.

Метан, хотя и нетоксичен для человека, представляет собой значительную экологическую проблему из-за его мощного парникового эффекта. Таким образом, сокращение выбросов метана из двигателей, является обязательным условием для смягчения парникового эффекта.

Проскок метана в двухтактных двигателях может происходить в нескольких ситуациях: несгоревшее топливо, утечки выхлопных газов, холодный запуск и работа при низких температурах. При этом несгоревшее топливо является основным видом проскока метана. Исследования показали, что выбросы метана из обычных двигателей могут составлять от 10 % до 50 % в зависимости от условий эксплуатации. Этот процент, как правило, выше в условиях низкой нагрузки.

Решение проблемы проскока метана имеет решающее значение для двигателей, особенно потому, что он является значительным источником выбросов метана. Хотя исследования выбросов загрязняющих веществ дали существенные результаты, все еще наблюдается явный недостаток внимания к проскоку метана.

Были выявлены различные стратегии для снижения проскока метана, включая регулировку времени закрытия клапанов, добавление водорода в топливо, стратегию впрыска топлива, циклы Миллера, установку проницаемых мембран, изменение формы поршня и использование топливных присадок. Учитывая, что устройства последующей обработки обычно используют катализаторы, содержащие драгоценные металлы, которые являются дорогостоящими, более практично отдать приоритет изучению характеристик сгорания внутри цилиндра. Сосредоточившись на сгорании внутри цилиндра, исследователи могут разработать более эффективные и экономичные методы снижения проскока метана.

Для обнаружения проскока метана в судовых дизельных двигателях лазерным методом авторами данной статьи предложено использовать лидар комбинационного рассеяния света (КРС), схема которого показана на Рисунке 1 [6].

В качестве зондирующего используется излучение второй гармоники Nd-YAG-лазера с длиной волны 532 нм и полупроводниковых лазеров с длинами волн 405, 450 и 785 нм и параметрами импульсов: длительностью – 10 нс, энергией – до 1 мДж, частоте следования f – до 1 кГц [7].

Лазер характеризуется числом фотонов n_0 в импульсе посылаемого в газоход излучения длительностью τ_0 . Линию генерации лазера считаем Гауссовой с максимумом на частоте ν_0 и полушириной Γ_0 . Тогда число фотонов $n(\nu, z)$ излучения КРС молекулами метана с концентрацией $N(z)$ на фотоприемнике получаем из лидарного уравнения для КРС в режиме счета фотонов в виде интеграла в интервале от $(\nu_0 - \Gamma_0)$ до $(\nu_R + \Gamma_R)$:

$$n(\nu, z) = n_0 c \tau_1 G(z) f t S_0 N(z) (d\sigma/d\Omega) \int_{\nu_0 - \Gamma_0}^{\nu_R + \Gamma_R} T_0(\nu_0, z) \cdot T(\nu_R, z) \cdot \Phi(\nu) A(\nu) d\nu / 2z^2 \quad (1)$$

где $n(\nu, z)$ – число фотонов, зарегистрированное фотоприемником на частоте ν_R КРС с расстояния z ;

n_0 – число фотонов на частоте ν_0 излучения;

S_0 – площадь апертуры телескопа;

$0 < G(z) < 1$ – геометрическая функция лидара;

$N(z)$ – концентрация молекул метана;

t – время измерения сигнала;

$(d\sigma/d\Omega)$ – дифференциальное сечение КРС молекулами CH_4 .



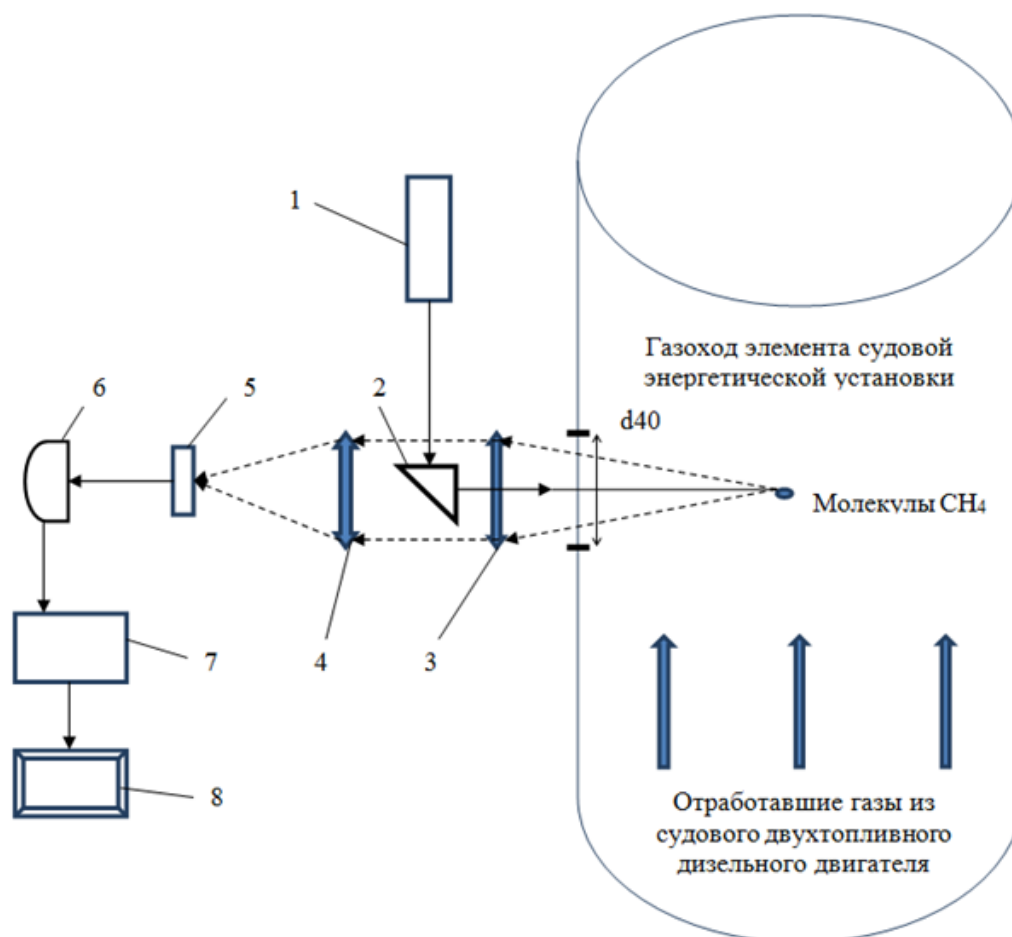


Рисунок 1 – Лидар КРС: 1 – лазер; 2 – призма; 3, 4 – линзы; 5 – светофильтр; 6 – фотоприемник; 7 – плата сбора данных, 8 – компьютер

Используя допущения, изложенные в литературе [8], получим лидарное уравнение (2):

$$t = \frac{n(\nu, z)z^2}{BI(\nu, z)N(z)}. \quad (2)$$

Далее будем рассматривать однократное комбинационное рассеяние света и однородную газо-воздушную среду. Результаты компьютерного моделирования уравнения (2) показаны на Рисунке 2. Полученные графики позволяют оценить время измерения заданной концентрации молекул CH_4 в функции расстояния.

Использованием описанных выше параметров зондирования молекул метана в потоке газовой смеси, решаем задачу обнаружения проскока метана, возможного при эксплуатации дизельных двигателей, работающих на СПГ.

Решение уравнения (1) осуществлялось в предположении, что концентрация молекул метана $N(z) = 2,60 \times 10^{23} \text{ м}^{-3}$ и за время измерения t будут зарегистрированы 200 фотонов.

Графики на рисунке 2, показывают, что на длине волны 405 нм можно получить минимальное время обнаружения проскока метана с отработавшими газами двигателя. На этой длине волны для измерения концентрации молекул метана $N(z) = 2,60 \times 10^{23} \text{ м}^{-3}$ требуется на расстоянии 1,0 м всего 2,0 мс, а на расстоянии 2,0 м – 32,0 мс.

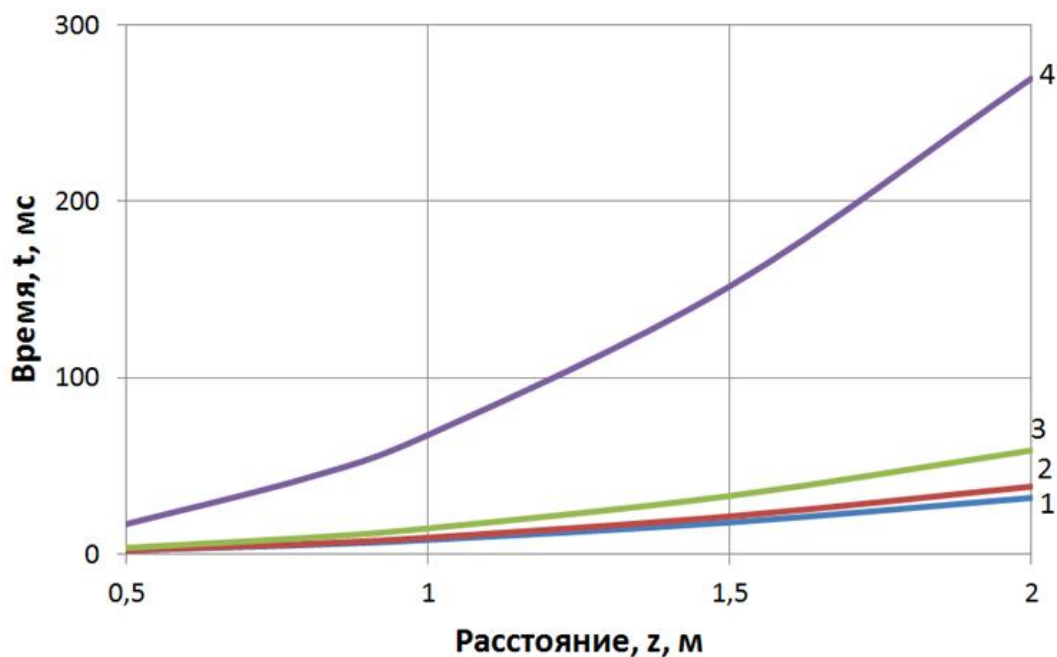


Рисунок 2 – Зависимость времени измерения от расстояния зондирования для длин волн 405 (1), 450 (2), 532 (3) и 785 нм (4)

При эксплуатации дизельных двигателей, работающих на СПГ, представляет интерес измерение концентрации молекул метана в потоке газа на расстояниях зондирования до 2-х метров.

Для этого примем диапазон расстояний зондирования до 2-х метров и по уравнению (5) получим показанные на Рисунке 3 зависимости концентрации молекул метана $N(z)$ от расстояния зондирования z .

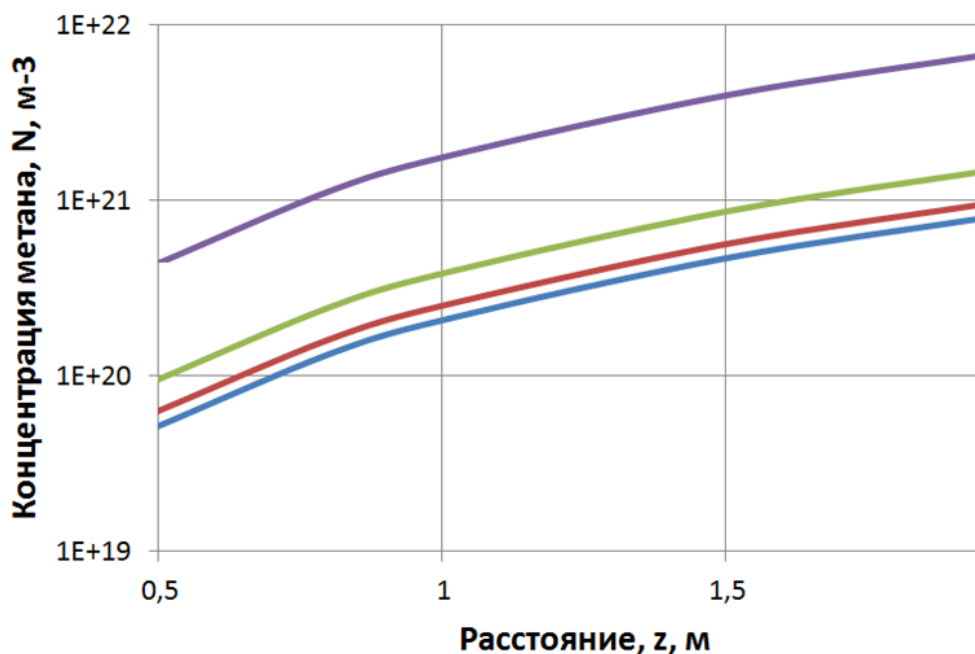


Рисунок 3 – Зависимость концентрации молекул метана от расстояния зондирования для длин волн 405 (1 и 2), 450(3) и 532 (4) нм при времени измерения $t=100$ с (1) и $t=10$ с (2)

Графики на рисунке 3 показывают, что зондирование молекул CH_4 методом КРС на расстояниях до 2-х м на длине волны 405 нм дает значение минимально детектируемой концентрации молекул метана в потоке отработавших газов судовых дизельных двигателей на расстоянии зондирования 1 м за время измерения 10 с – $2,08 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$, а на расстоянии 2 м за то же время измерения 10 с – $8,33 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$.

Список литературы:

1. Sagot B., Giraudier G., Decuniac F., et al. On-Board measurement of emissions on a dual fuel LNG powered cruise ship: A sea trial study // *Atmospheric Environment: X*. – 2025. – № 25. – P. 100313.
2. 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. – P. 012104.
3. Aakko-Saksa P.T., Lehtoranta K., Kuittinen N., et al. Reduction in greenhouse gas and other emissions from ship engines: Current trends and future options // *Progress in Energy and Combustion Science*. – 2023. – № 94. – P. 101055.
4. Fun-sang Cereda M.A., Pereira N.N., Kahn S., et al. A review of the use of LNG versus HFO in maritime industry // *Marine Systems & Ocean Technology*. – 2019. – № 14. – P. 75-84.
5. Stenersen D., Thonstad O. GHG and NO_x emissions from gas fuelled engines. Report. OC2017F-108. SINTEF. – 2017. – 52 p.
6. Туркин В.А., Шеманин В.Г., Игнатенко Г.В., Беляев В.В., Зубко С.С. Лазерный измеритель концентрации вредных веществ в потоке отработавших газов судовых энергетических установок. Патент 2817734 Российская Федерация, МПК G01N 21/3504, B63H 21/17. – № 2023125184; заявл. 16.06.2023; опубл. 19.04.2024, Бюл. № 11.
7. Веремьев Р. Н., Привалов В. Е., Шеманин В. Г. Оптимизация лида ра с полупроводниковыми лазерами для зондирования молекулярного йода и водорода в атмосфере // *Журнал технической физики*. – 2000. – Т. 70. – № 5. – С. 115-118.
8. Привалов В. Е., Шеманин В. Г. Лидарное уравнение с учетом конечной ширины линии генерации лазера // *Известия Российской академии наук. Серия Физическая*. – 2015. – Т. 79. – № 2. – С. 170-180.

