

УДК 621.431.74

**ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В РАЗВИТИИ КОНЦЕПЦИИ
СУДОВЫХ ДВУХТОПЛИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
МЕТОДОВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ РЕЦИРКУЛЯЦИИ ВЫХЛОПНЫХ
ГАЗОВ****Журавлев Андрей Дмитриевич,**

заведующий, кафедра судовой энергетики и электрооборудования, Морской институт имени вице-адмирала В.А. Корнилова (филиал), ФГОУ ВО «Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова», г. Севастополь

Хухарев Андрей Константинович,старший преподаватель, кафедра судовой энергетики и электрооборудования, Морской институт имени вице-адмирала В.А. Корнилова (филиал), ФГОУ ВО «Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова», г. Севастополь
A.xuharev@mail.ru**Аннотация**

В статье на основе конструктивного анализа рассмотрены особенности конструкции и технологические принципы повышения эффективности использования судовых двухтопливных двигателей. Предметом исследования являются двухтопливные дизельные двигатели, а объектом исследования – процессы смесеобразования топлива и воздуха в двигателях, использующих СПГ.

Ключевые слова: двухтопливные дизельные двигатели, сжиженный природный газ, рабочий цикл двигателя, цикл Отто, цикл Дизеля, состав выпускных газов.

**PROMISING TECHNOLOGIES IN THE DEVELOPMENT OF THE CONCEPT OF
MARINE DUAL-FUEL ENGINES USING INTELLIGENT EXHAUST GAS
RECIRCULATION METHODS****Zhuravlev Andrey Dmitrievich,**

Head, Department of Marine Power Engineering and Electrical Equipment Vice Admiral V.A. Kornilov Maritime Institute (branch), Federal State Educational Institution of Higher Education "State Maritime University named after Admiral F.F. Ushakov", Sevastopol

Khukharev Andrey Konstantinovich,Senior Lecturer, Marine Power Engineering and Electrical Equipment Vice Admiral V.A. Kornilov Maritime Institute (branch), Federal State Educational Institution of Higher Education "State Maritime University named after Admiral F.F. Ushakov", Sevastopol
A.xuharev@mail.ru

ABSTRACT

Based on a constructive analysis, the article examines the design features and technological principles for improving the efficiency of marine dual-fuel engines. The subject of the study is dual-fuel diesel engines, and the object of the study is the processes of mixing fuel and air in engines using LNG.

Keywords: dual-fuel diesel engines, liquefied natural gas, engine duty cycle, Otto cycle, Diesel cycle, exhaust gas composition.

Актуальность. В настоящий момент применения на судах 2-топливных двигателей является перспективным и набирающим темпы процессом. Но при явных преимуществах эти технологии имеют ряд недостатков. В статье рассмотрен один из вариантов повышения эффективности работы таких двигателей методом уменьшения количества неиспользуемого в рабочем цикле метана.

Цель исследования. Работа главного двигателя судна на сжиженном природном газе, несомненно, имеет ряд преимуществ. Основными из них являются уменьшение вредных выбросов и повышение эффективности работы двигателя путем снижения эксплуатационных затрат, достигаемых за счет применения газа – метана, как топлива. Но есть и существенные недостатки в использовании такого газа в качестве топлива в судовых дизелях.

Один из них – выброс несгоревшего топлива в выпускной коллектор: метану нужно больше времени на воспламенение и горение, чем жидкому топливу (дизельному или мазуту), поэтому часть газа оказывается в выпускном коллекторе, не совершив работу. Если в случае работы на мазуте с этим можно смириться, то при работе на СПГ, в котором метан занимает значительную долю, нет. То есть, СПГ горит медленнее. Как же снизить количество «потерянного» метана?

В данной статье приведен один из вариантов снижения выбросов метана с использованием традиционной технологии рециркуляции отработавших газов. Разработкой такого варианта снижения выброса метана занимаются в настоящее время конструкторы компании WinGD – одного из ведущих в мире разработчиков и производителей судовых двухтопливных двигателей.

Материалы и методы исследования

Технология использования СПГ низкого давления в качестве основного топлива в судовых ДВС разрабатывалась начиная с 2011 года и показала себя как надежная, эффективная и относительно недорогая в сравнении с технологией высокого давления.

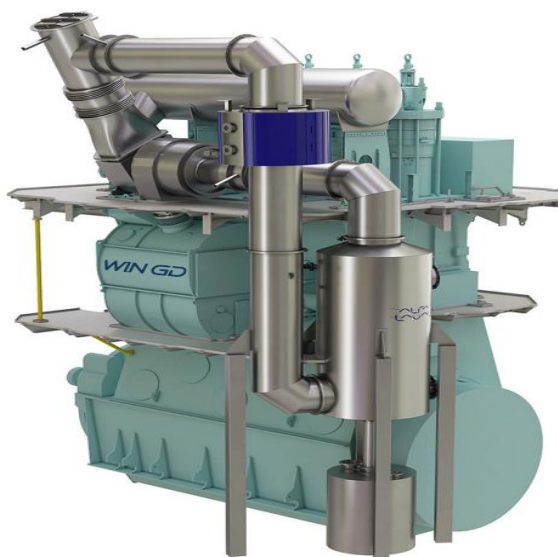


Рисунок 1. Двигатель WinGD с системой очистки и рециркуляции выпускных газов [6]

Первые ДВС на СПГ низкого давления были зарегистрированы в 2015 году, а первый агрегат из серии был введен в эксплуатацию в 2016-м.

К 2020 году мировой флот пополнился шестьюдесятью судами с такими главными двигателями, а компания WinGD получила заказ на производство еще 315 двигателей. Ну и самое главное - судовладельцы для своих новых газозовов часто заказывают именно эти двигатели.

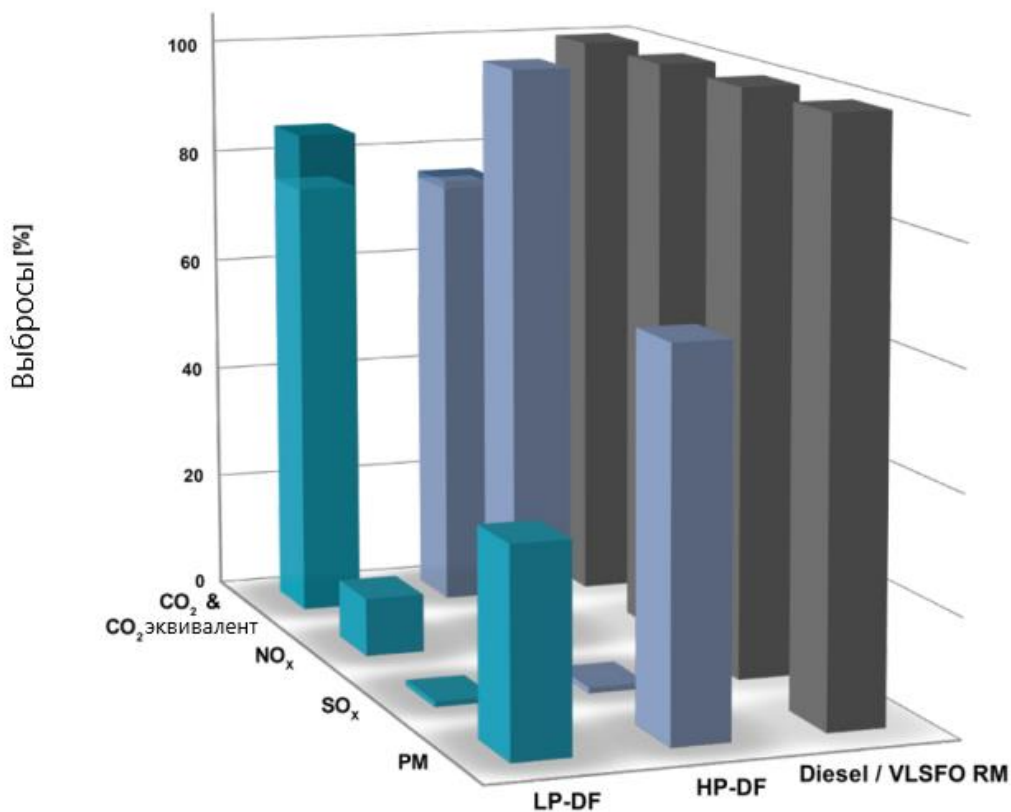


Рисунок 2. Сравнение разных видов выбросов для разных моделей двигателей [6]

На рисунке 2 показаны диаграммы сравнения разных видов выбросов для разных моделей двигателей: LP-DF - ДВС, работающий на СПГ по циклу Отто (работа на СПГ низкого давления); HP-DF - ДВС, работающий на СПГ по циклу Дизеля (работа на СПГ высокого давления); Diesel/VLSFO RM - традиционный дизельный двигатель, работающий на флотском мазуте с содержанием серы не более 0,5% [6]. То есть, здесь приведены данные по вредоносным выбросам для разных двигателей: для классического жидкотопливного, работающего на СПГ высокого давления и, работающего на СПГ низкого давления газа [2].

Очевидна большая разница в выбросах NOx, что говорит о том, что для соответствия допустимой концентрации оксидов азота (по норме Tier III) двигателю с СПГ низкого давления не нужно дополнительное оборудование (например, SCR реактор) [1]. По выбросам твердых частиц ДВС на СПГ низкого давления тоже лидирует. Таким образом – это наилучший вариант конструктивного решения многих проблем.

Но и для этого двигателя есть направления для модернизации, а именно:

повышение геометрической степени сжатия и, как следствие, повышение термодинамической эффективности;

снижение выбросов несгоревшего метана.

Как добиться снижения выбросов несгоревшего метана?

Результаты и их обсуждение

В качестве одного из вариантов решения этой проблемы предлагается технология рециркуляции выпускных газов, но не с целью снижения выбросов NOx, а с целью повышения полноты сгорания, что экономически целесообразно.

На сегодняшний день доступно всего две технологии двухтопливных судовых ДВС: работа по циклу Отто и работа по циклу Дизеля (рисунок 3).

Цикл Дизеля хорош и прост, но все проблемы в нем связаны с непосредственным впрыском газа под высоким давлением. Газ под высоким давлением необходимо подать в определенный момент в конце такта сжатия в камеру сгорания и рядом подать порцию дизельного запального топлива. Горение при этом "дизельное" диффузионное, то есть без предварительной подготовки. Именно поэтому дизель остается дизелем: мощным и приемистым. Но в самом конусе распыленного топлива практически нет воздуха, и неполнота сгорания будет выше, чем в ДВС, работающего по циклу Отто, где газ подается во время такта сжатия, и у него есть время как следует смешаться с воздухом, а потом смесь воспламенится запальной порцией дизельного топлива.

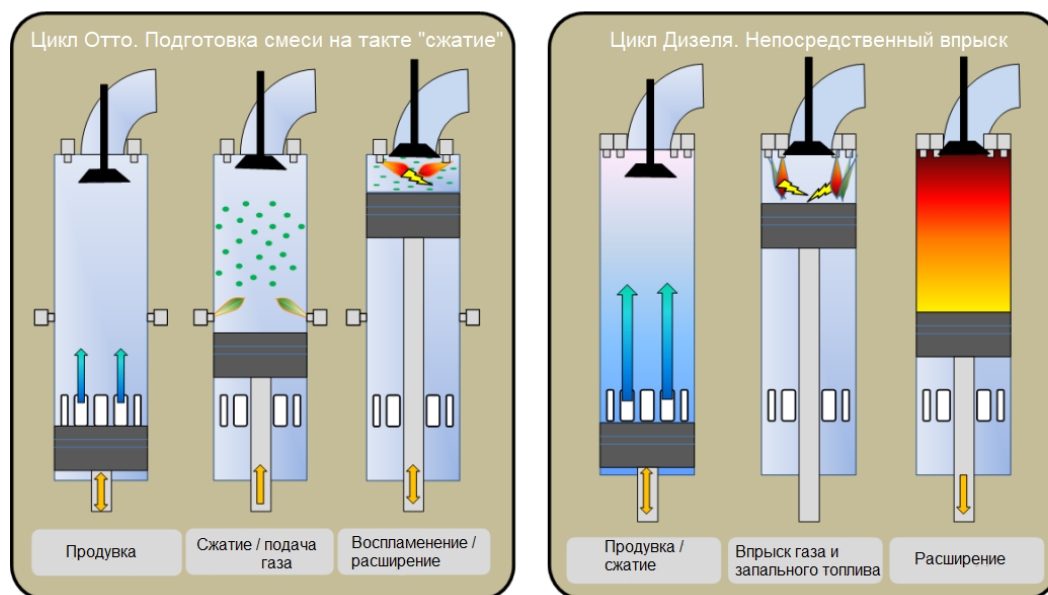


Рисунок 3. Схема работы ДВС по циклу Отто - слева) и Дизеля - справа (составлено автором).

Но тут тоже есть проблема. Если сравнивать ДВС, работающие по циклу Отто и Дизеля, то различие в степенях сжатия довольно быстро бросится в глаза. Двигатель Отто не может позволить себе дизельные степени сжатия, так как смесь в цилиндре воспламенится еще до достижения угла опережения "зажигания" (впрыска запального топлива). То есть, в этом случае, произойдет детонация – очень опасное и вредное для деталей цилиндропоршневой группы и кривошипно-шатунного механизма явление.

Степень сжатия непосредственно влияет на температуру заряда в конце сжатия. Именно поэтому при подаче газа на такте сжатия очень точно рассчитывается пропорция смешения газа с воздухом во избежание преждевременного воспламенения смеси.

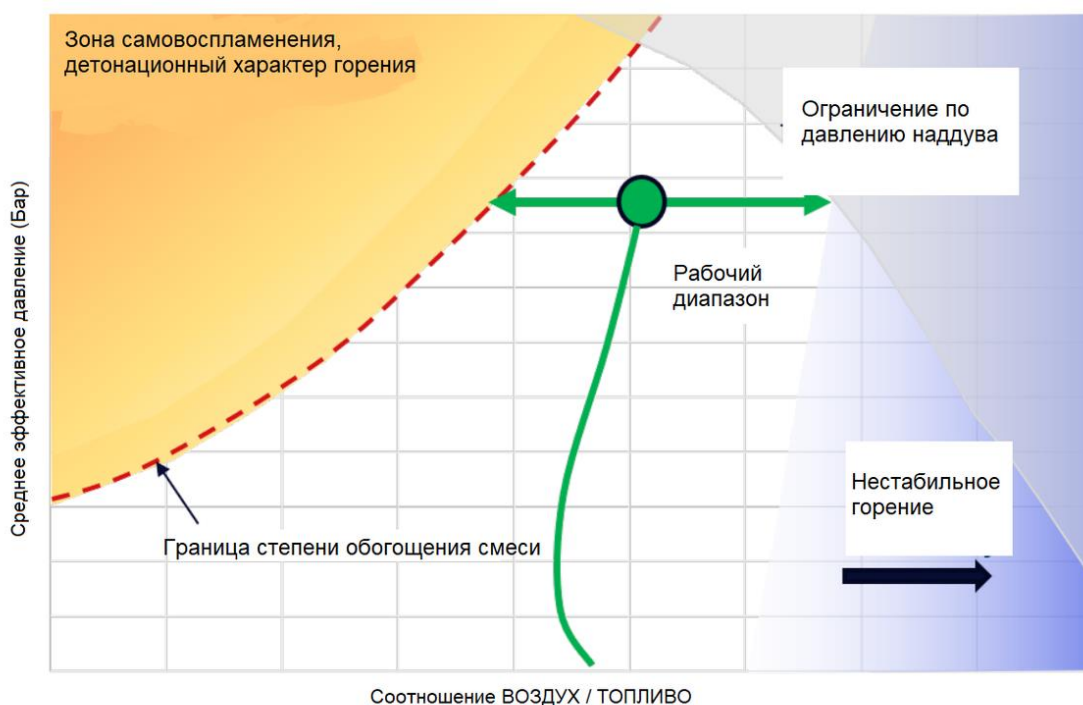


Рисунок 4. Изображение рабочего диапазона соотношения воздух-топливо для двигателей DF [6]

На рисунке 4 показаны диапазоны соотношения воздух-топливо для двигателей DF. Соотношение воздух-топливо должно быть близко к идеальному, то есть смесь должна быть и не слишком богатой, и не слишком бедной, практически совершенной. Смеси в желтой зоне будут нестабильны и склонны к самовоспламенению. Смеси из темно синей зоны в правом нижнем углу будут содержать слишком мало газа, что приведет к пропускам вспышек и нестабильной работе ДВС [4]. Идеальный вариант - работать точно по зеленой линии.

Один из вариантов добиться стабильности смеси - разбавить заряд свежего воздуха выпускными газами. Меняя пропорции воздуха и выпускных газов, можно регулировать устойчивость смеси к самовоспламенению. Горение при подмешивании газов более плавное и стабильное, а максимальная температура сгорания ниже.

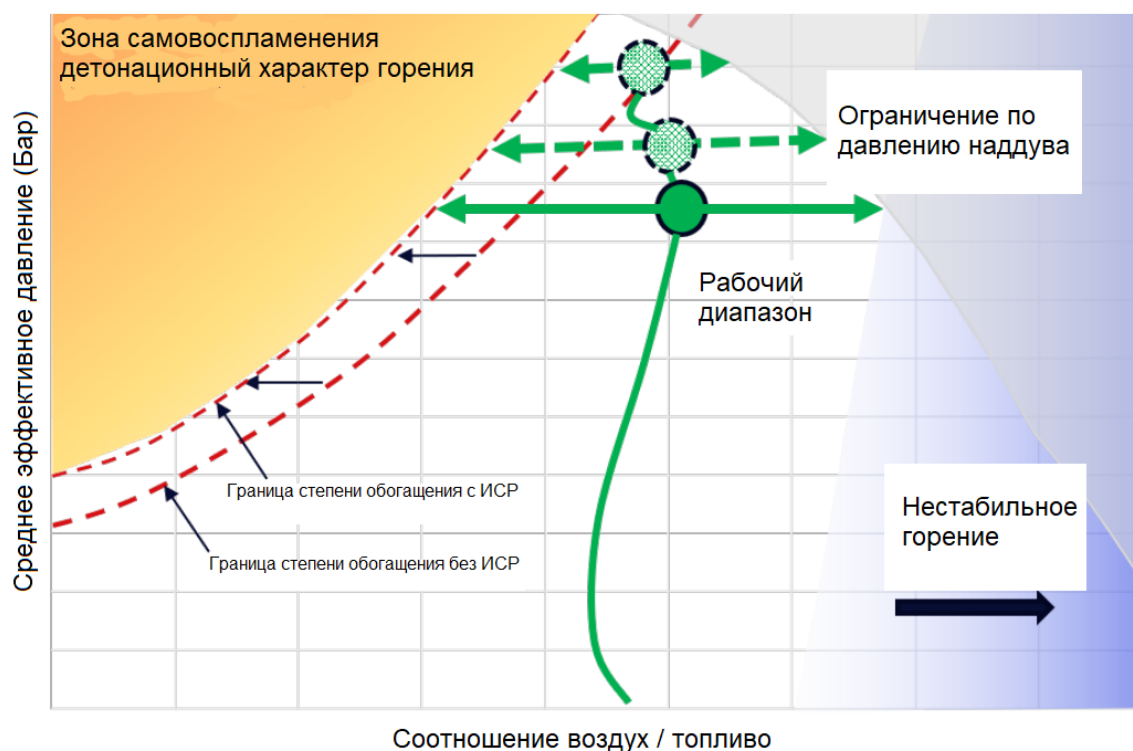


Рисунок 5. Изображение рабочего диапазона соотношения воздух-топливо для двигателей DF с системой ИСР [6]

Система добавления выпускных газов в свежий заряд работает на базе большого количества датчиков, таких как: датчик давления в цилиндре (нужно отслеживать пропуски вспышек и степень нарастания давления), газоанализаторы и т.д., сигналы от которых преобразуются в цифровые и обрабатываются микропроцессорными модулями с выдачей команд на исполнительные устройства. То есть, здесь мы имеем дело с компьютерной интеллектуальной системой - ИСР (Интеллектуальной Системой Рециркуляции) [5]. Что в этом случае произойдет с рабочим диапазоном соотношения воздух - топливо? Как видно из диаграммы на рисунке 5 рабочий диапазон расширится, а следовательно работа двигателя станет стабильнее.

Химический состав свежего заряда меняется по мере подмешивания в него выпускных газов. С увеличением количества рециркулируемых газов в цилиндре кислород замещается двуокисью углерода пропорционально. Также растет и содержание азота в свежем заряде. Углекислый газ обладает большей теплоемкостью, чем кислород, поэтому

при одном и том же объёме цилиндра максимальная температура сгорания будет ниже для смеси свежего воздуха с выпускными газами, чем для чистого воздуха. Меньшее содержание кислорода в продувочном ресивере снижает способность смеси к самовоспламенению и снижает скорость её горения.

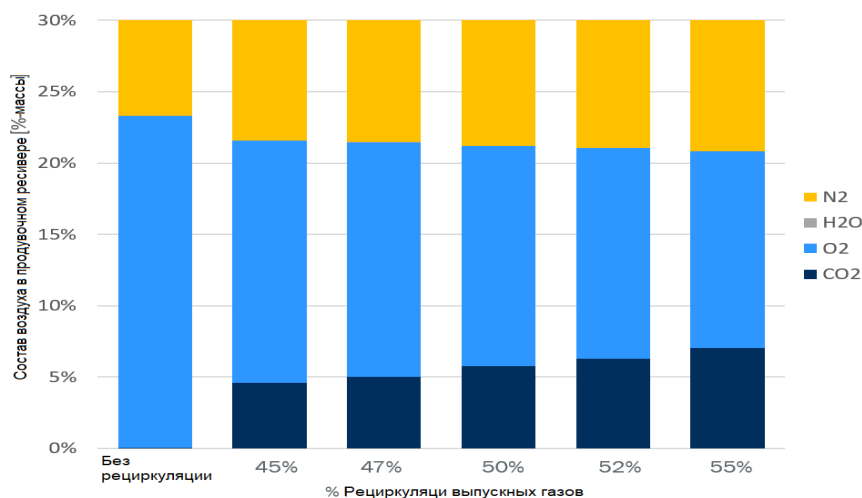


Рисунок 6. Влияние рециркуляции выпускных газов на химический состав продувочного воздуха на 75% нагрузки на двигатель [6]

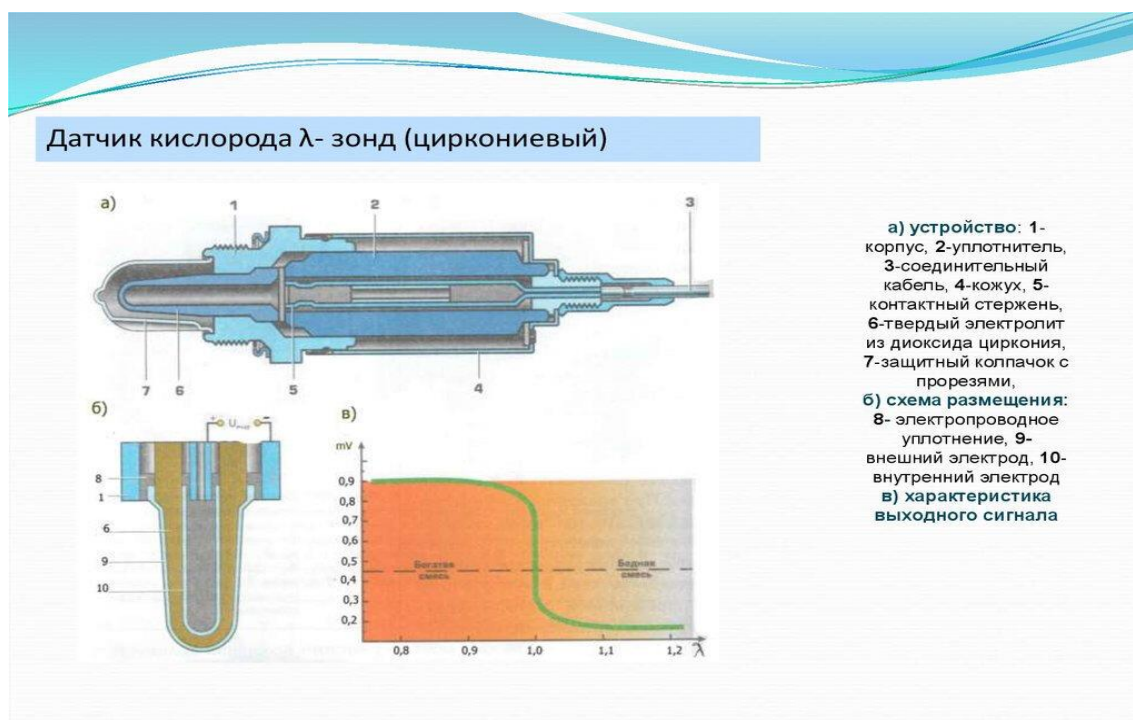


Рисунок 7. Лямбда зонд [3]

По мере повышения количества выпускных газов в продувочном ресивере, концентрация кислорода в нем падает и отслеживанием этого параметра занимается лямбда-датчик или лямбда-зонд. Параметры, передаваемые им, в режиме реального времени поступают в систему управления и доступны оператору. Сам параметр концентрации кислорода в смеси и называется "Лямбда" [3]. Задача этой системы – не допустить уменьшения концентрации кислорода до недопустимой величины.

Количество выбросов метана обратно пропорционально степени рециркуляции. Если 50% выпускных газов направить на рециркуляцию, то 50% несгоревшего метана дожигается уже повторно.

Заключение

Таким образом, применение указанного технологического решения приводит к двойному эффекту:

- уменьшение метана в выбросах улучшает экологические показатели работы двигателя.
- увеличение количества полезно используемого в двигателе метана уменьшает затраты на топливо.

Список литературы:

1. Возницкий И.В. Судовые двигатели внутреннего сгорания / И.В. Возницкий, А.С. Пунда. – М.: Моркнига, 2010. – 470 с.
2. Карьянский С.А. Двигатели WinGD типа RT-flex/X с электронным управлением / С.А. Карьянский, Е.М. Оженко, Ю.В. Лаврученко. – Одесса: НУ «ОМА», 2019. – 64 с.
3. Грехов Л.В. Топливная аппаратура дизелей с электронным управлением: Учебно-практическое пособие. М.: «Легион-Автодата», 2003, 176 с.
4. Lanchukovsky V.I. Safe Operation of Marine Power Plants. Marine Engineering Practice Series. London: IMarEST, 2009. – 155 p.
5. Nikolaos Xiros. Robust Control of Diesel Ship Propulsion. Advances in Industrial Control Series. London. Springer, 2002. – 214 p.
6. Электронный ресурс, сайт компании WinGD, ссылка: https://www.cimac.com/cms/upload/events/cascades/CASCADES_2019_China/WINGD_SHANGHAI_Marcel_Ott, (дата обращения 27.03.2025).

References:

1. Voznitsky I.V. Marine internal combustion engines / I.V. Voznitsky, A.S. Punda. – M.: Morkniga, 2010. – 470 p.
2. Karyansky S.A. Wind engines of RT-flex/X type with electronic control / S.A. Karyansky, E.M. Bozhenko, Yu.V. Lavruchenko. – Odessa: NU "OMA", 2019. – 64 p.
3. Grekhov L.B. Fuel equipment for electronically controlled diesels: An educational and practical guide. Moscow: Legion-Avtodata, 2003, 176 p.
4. Lanchukovsky V.I. Safe Operation of Marine Power Plants. Marine Engineering Practice Series. London: IMarEST, 2009. – 155 p.
5. Nikolaos Hiros. Robust Control of Diesel Ship Propulsion. Advances in Industrial Control Series. London. Springer, 2002. – 214 p.
6. Electronic resource, WinGD company website, link : https://www.cimac.com/cms/upload/events/cascades/CASCADES_2019_China/WINGD_SHANGHAI_Marcel_Ott, (accessed 03/27/2025)