ISBN 978-5-901722-00-8

УДК 629.5.011; 629.5.016; 629.5.018; 629.123

СНИЖЕНИЕ ВЫБРОСОВ NOx В ДИЗЕЛЕ MAN 5G70ME-C10.5 ПРИМЕНЕНИЕМ РЕЦИРКУЛЯЦИИ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ

Иванченко Александр Андреевич[1], профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой ДВС и АСЭУ
e-mail: prof_ivanchenko@mail.ru
Скобкин Максим Артурович[1], специалист, аспирант
e-mail: maxskobkin@gmail.com

[1] Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В работе представлен анализ опытf эксплуатации двухтопливного двигателя внутреннего сгорания (ДВС) с системой рециркуляции отработавших газов (EGR) для снижения выбросов NOx. На примере двигателя MAN ME-GA анализируются особенности работы силовой установки на СПГ и жидком топливе, а также оценивается влияние системы EGR на экологические и эксплуатационные показатели двигателя. Приводятся данные по эффективности, надежности и проблемам, возникающим в реальных условиях их эксплуатации. Особое внимание уделено проблемам, связанными с системами EGR, и способам их решения.

Ключевые слова: двухтопливные двигатели, сжиженный природный газ (СПГ), выбросы NOx, рециркуляция ОГ, MARPOL Annex VI.

REDUCING NOx EMISSIONS IN MAN 5G70ME-C10.5 DIESEL ENGINE BY USING EGR

Aleksandr A. Ivanchenko[1], Professor, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Internal Combustion Engines and Automation of Marine Power Plants
e-mail: prof_ivanchenko@mail.ru
Maksim A. Skobkin[1], Specialist, Doctoral student
e-mail: maxskobkin@gmail.com

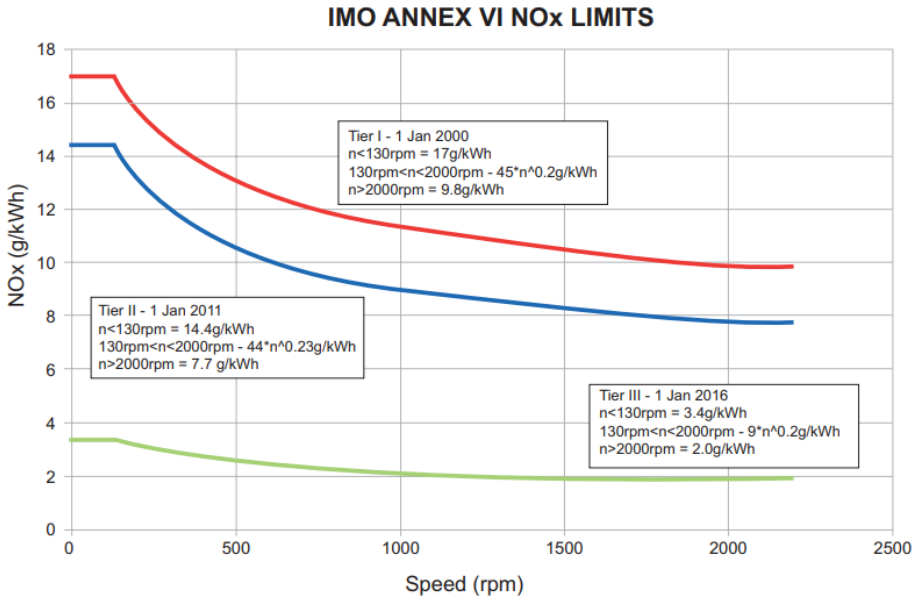
[1] Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Saint Petersburg, Russia

Abstract. The paper presents an analysis of the operating experience of a dual-fuel internal combustion engine (ICE) with an exhaust gas recirculation (EGR) system to reduce NOx emissions. Using the MAN ME-GA engine as an example, the operating features of the power plant on LNG and liquid fuel are analyzed, and the impact of the EGR system on the environmental and operational performance of the engine is assessed. Data on efficiency, reliability and problems arising in real operating conditions are presented. Particular attention is paid to problems associated with EGR systems and how to solve them.

Keywords: dual-fuel engines, liquefied natural gas (LNG), NOx emissions, EGR, MARPOL Annex VI.

Введение

Одной из самых затрагиваемых тем в области улучшения экологических показателей СДУ в последние годы, является снижение выбросов NOx. С 2011 года требования IMOв отношении выбросов оксидов азота для вновь построенных судов при их эксплуатации на всей акватории мирового океана исключая особые районы контроля NOx соответствуют уровнюIMO TierII (14,4 г/кВт·ч). В пределах особых районов уровню IMO Tier III (3,4 г/кВт·ч): С 2016 года в зонах, образованных вокруг Северо-Американского континента, и с 2021 г. – в зонах, образованных в Северном и Балтийском морях (см. рис. 1). В будущем, с развитием технологий, можно ожидать и дальнейшего ужесточения норм в отношения выбросов оксида азота. С 2024 г. вступили в силу ограничения на выбросы CO_2 [1, 5].



RPM	NOx calculated as total weighted emission of NO_2 (g/kWh)			Relative Reduction from Tier I
	< 130	130 ≤ n < 2000	≥ 2000	
Tier I	17.0	$45*n^{(-0.2)}$	9.8	0%
Tier II	14.4	$44*n^{(-0.23)}$	7.7	15.5% - 21.8%
Tier III	3.4	$9*n^{(-0.2)}$	2.0	80%

Рисунок 1 – Требования IMO по выбросам NOx

На сегодняшний день одним из используемых в эксплуатационной практике методов снижения NOx является внедрение системы рециркуляции отработавших газов (EGR) в двигатели. Рассматриваемую систему подробно рассмотрим на примере ее применения на двухтопливном двигателе фирмы MAN 5GME70-C10.5 в составе энергетической установки газовоза, также оценим эффективность снижения выбросов NOx и изменения показателей рабочего процесса в цилиндре и системе газообмена.

Система рециркуляции ОГ

Рассматриваемый метод снижения выбросов оксидов азота является первичным, т.е. осуществляется воздействием непосредственно на рабочий процесс дизеля. В его основе лежит снижение максимальных температур в камере сгорания дизеля за счет изменения содержания кислорода в воздушном заряде в результате его разбавления очищенными охлажденными отработавшими газами (ОГ).

Таким образом, при снижении максимальной температуры сгорания (на 50-100°С) образования NOx по термическому механизму существенно замедляется. В тоже время недостатками этого процесса являются снижение эффективности сгорания и увеличение выбросов продуктов неполного сгорания и твердых частиц.

Организация процесса газообмена в дизеле и устройство системы EGR представлены на рисунке 2. Рассматриваемая система EGR в основе своей состоит из:

охладителя ОГ,

секции инжекции воды,

секции улавливания водяного тумана,

дополнительной воздуходувки.

Система обработки воды (WHS) необходима для обработки промывочной охлаждающей воды. Ее принципиальная схема представлена на рис. 3.

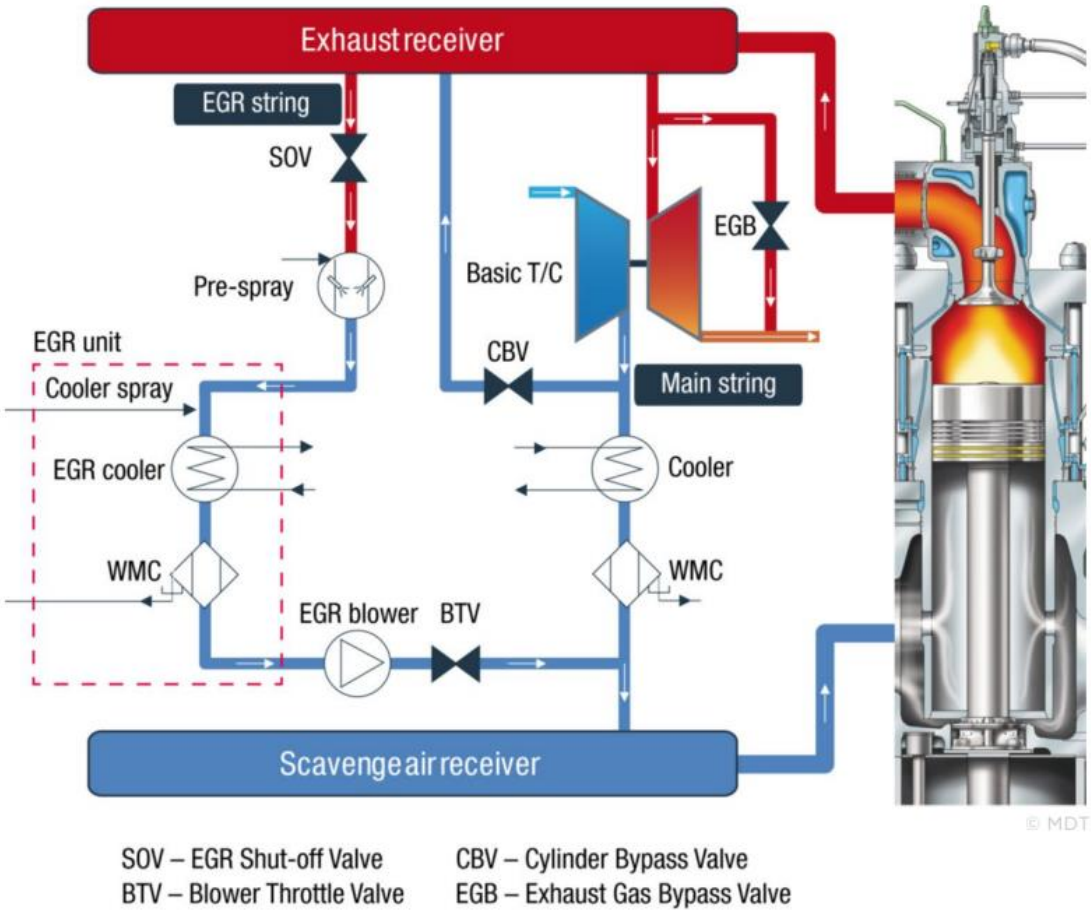


Рисунок 2 – Устройство процесса газообмена в дизеле с системой EGR

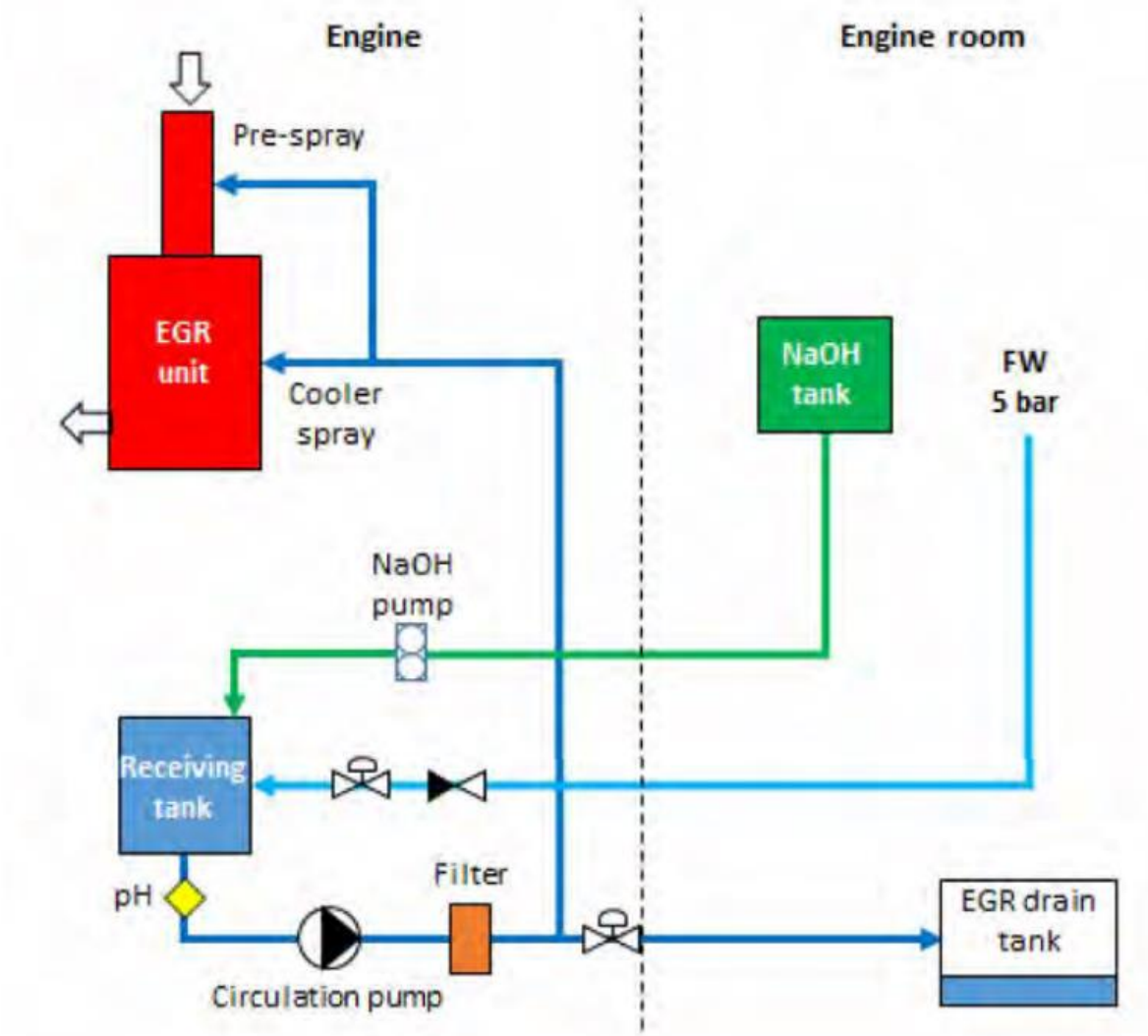


Рисунок 3 – Принцип работы системы рециркуляции промывочной воды EGR

Основными компонентами системы водоотведения являются системы:

• Бак с гидроксидом натрия и насос подачи – для добавления NaOH в промывочную воду для нейтрализации серосодержащих соединений.

• Приемный бак и циркуляционный насос – для приема воды после выполнения цикла очистки и охлаждения, и последующей подачей в систему на повторный цикл

• Буферный танк хранения отработанной циркуляционной воды – для хранения отработанной циркуляционной воды перед очисткой и сбросом очищенной воды за борт.

• Установка для очистки воды (WTS) для сепарации воды из буферного резервуара от примеси частиц сажи и нефтесодержащих продуктов, с целью дальнейшего сброса за борт.

Принцип работы системы очистки и рециркуляции промывочной воды EGR наглядно представлен на рис. 4.

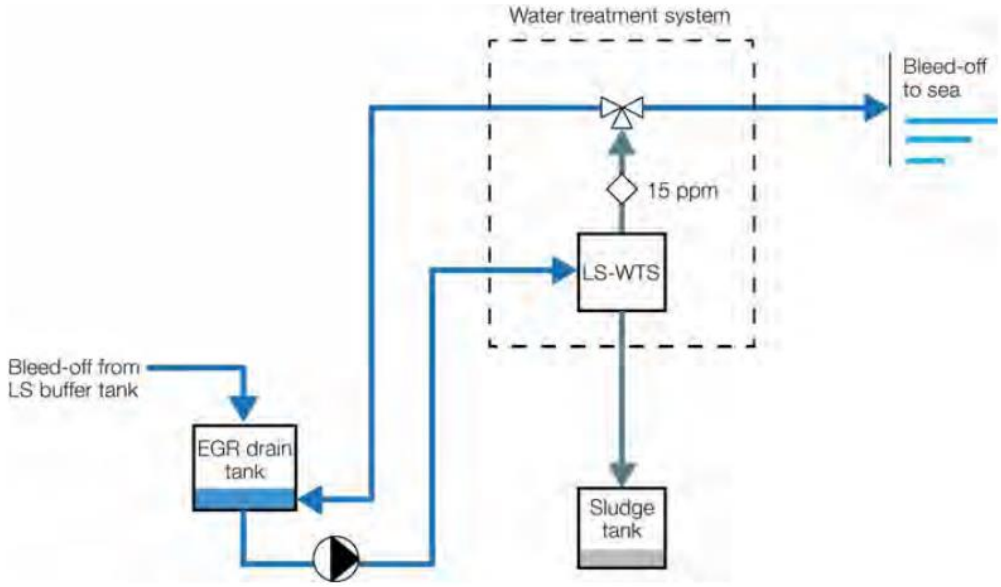


Рисунок 4 – Система очистки промывочной воды EGR

Эффективность и влияние на рабочий процесс

В двигателе MANME-GA система EGR реализована как неотъемлемая часть организации его рабочего процесса, играющая важную роль при его работе на высоких нагрузках и на газовом топливе. Конструктивно работа системы осуществляется таким образом, что воздуходувка системы рециркуляции ОГ заменяет второй турбокомпрессор в этих двигателях. При выходе из строя системы EGR двигатель может работать на жидком топливе без особых проблем с нагрузкой до 70 процентов. Однако такой режим является крайне нежелательным из-за повышения температур рабочего процесса. Указанные ограничения установлены заводом изготовителем. На рис. 5 представлена в рассматриваемом аспекте выдержка из его инструкции [6]. Режим работы свыше 70 процентов нагрузки влечет за собой резкое повышение всех температур и может быть очень непродолжительным. Касаемо работы на газовом топливе, без системы EGR полный газовый цикл возможен до 40 процентов нагрузки, после чего начнется смешанный цикл, где большую часть топливного индекса будет забирать на себя жидкое топливо.

Running mode	Fuel	Normal operation*		EGR failure*	
		NO_x	Max. load	NO_x	Max. load
1. Diesel TII	Fuel oil	Tier II	0 - 110 %	N/A	0 - 70 %
2. Gas	Gas**	Tier III	10 - 100 %	N/A	10 - 70 %
3. Diesel TIII	Fuel oil	Tier III	0 - 100 %	N/A	0 - 70 %

Minimum load on gas: 10% under steady state reference condition.
Minimum gas load point RPM must be above upper limit of barred speed range.
Changeover to gas available from 25% to 75% load

* EGR is running in all modes during normal operation. In case of failures on the EGR system, it will be possible to continue operation with engine load limitation in both gas and diesel. NO_x certification is not applicable for a failure scenario.
It is noted that the scenario of failing EGR is similar in concept to other scenarios leading to load limitation without loss of propulsion, e.g. TC failures and failures leading to deactivation of one or more cylinders, for description of these other scenarios, please refer to the operating manual.
** ECS can automatically activate FRC based on a number of factors, e.g. Heavy running number, pre-ignition detection, Pcyl/dt, global lambda, maximum cyl pressure, etc. Diesel amount during FRC is 10 – 30% fuel index

Рисунок 5 – Ограничения нагрузки на двигатель при разных видах топлива и режимах его эксплуатации

Рассмотрим влияние системы рециркуляции ОГ на рабочий процесс в цилиндре двигателя MAN 5G70ME-C10.5 при его работе на жидком дизельном топливе и на газовом топливе.

Результаты его индицирования при работе на жидком топливе представлены на рисунке 6, 7. В таблицу на рис. 8 собраны численные значения основных параметров рабочего процесса на жидком топливе рассматриваемого двигателя. Рассмотрим диаграммы для дизельного цикла при работе двигателя на заданных 65 оборотах.

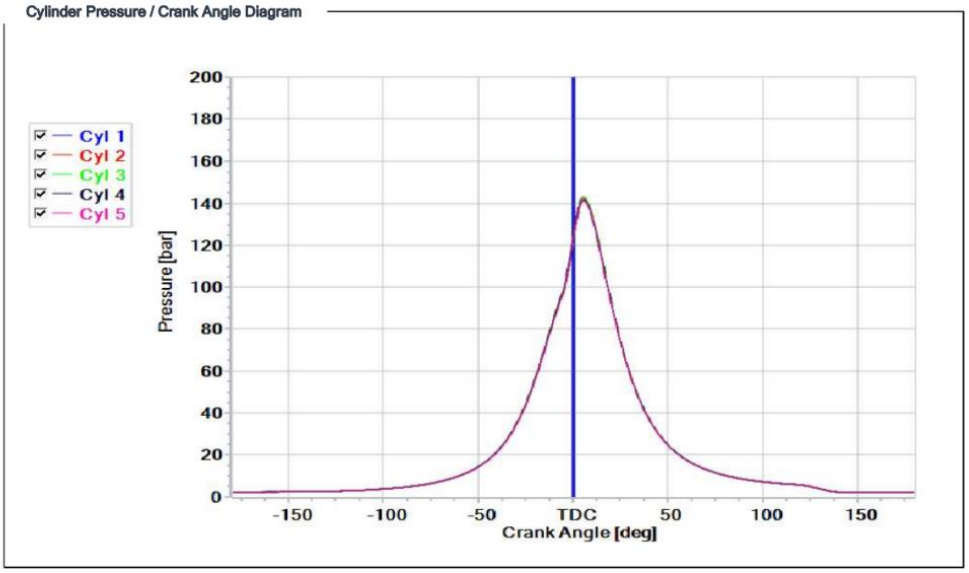


Рисунок 6 – Развернутая диаграмма работы MAN 5G70ME-C10.5 на тяжелом жидком топливе при 65 оборотах

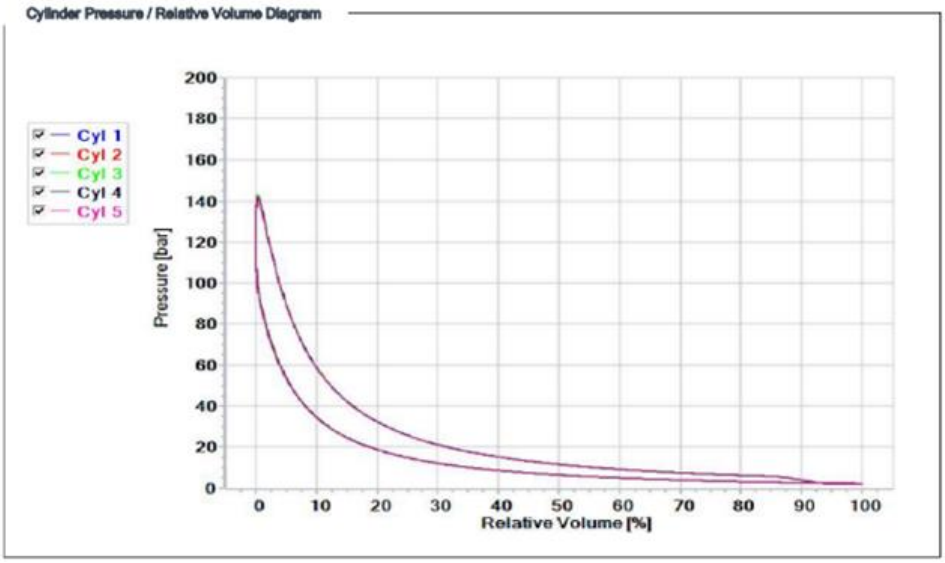


Рисунок 7 – PV диаграмма работы MAN 5G70ME-C10.5 на тяжелом жидком топливе при 65 оборотах

Engine

Time Stamp	Engine Speed [rpm]	p(scav) [bar]	Estimated Effective Power [MW]	Estimated Load [%]
2024-12-15 11:44:13 AM	65.2	1.68	5.9	54

Cylinder

Cylinder Number	p(i) [bar]	p(comp) [bar]	p(max) [bar]	p(comp)/ p(scav) [abs/abs]
1	8.4	71.1	129.7	26.9
2	8.6	71.0	135.5	26.9
3	8.5	71.0	133.8	26.9
4	8.8	70.9	133.2	26.8
5	8.9	71.0	131.8	26.9
Mean	8.6	71.0	132.8	26.9

Рисунок 8 – Таблица основных параметров рабочего процесса при работе на жидком топливе

Результаты индицирования двигателя при работе на газовом топливе представлены на рисунке 9 и 10. В таблицу на рис. 11 собраны численные значения основных параметров рабочего процесса рассматриваемого двигателя на газовом топливе. Рассмотрим диаграммы рабочего процесса на газовом топливе на заданных 65 оборотах, представленные на рис. 9, 10.

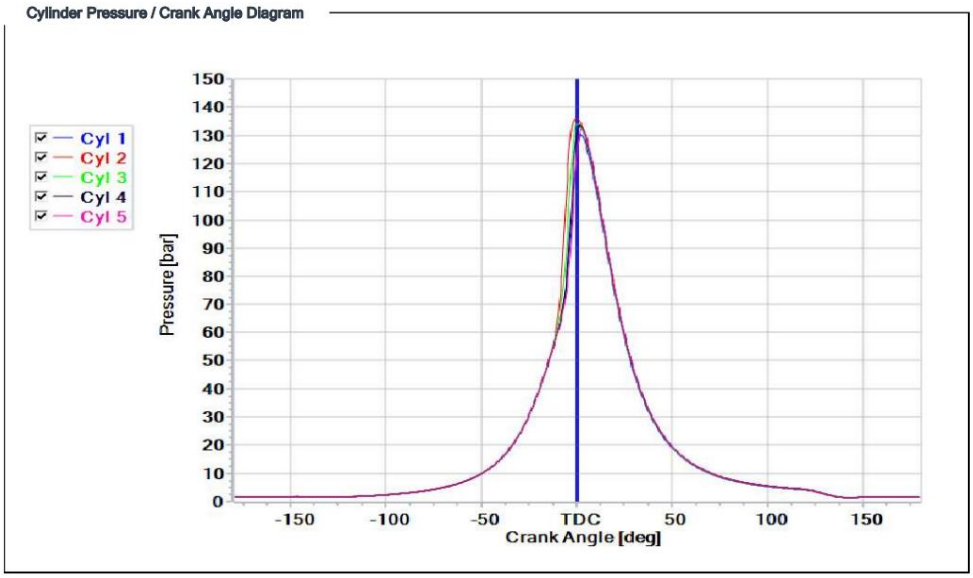


Рисунок 9 – Развернутая диаграмма работы MAN 5G70ME-C10.5 на газовом топливе при 65 оборотах

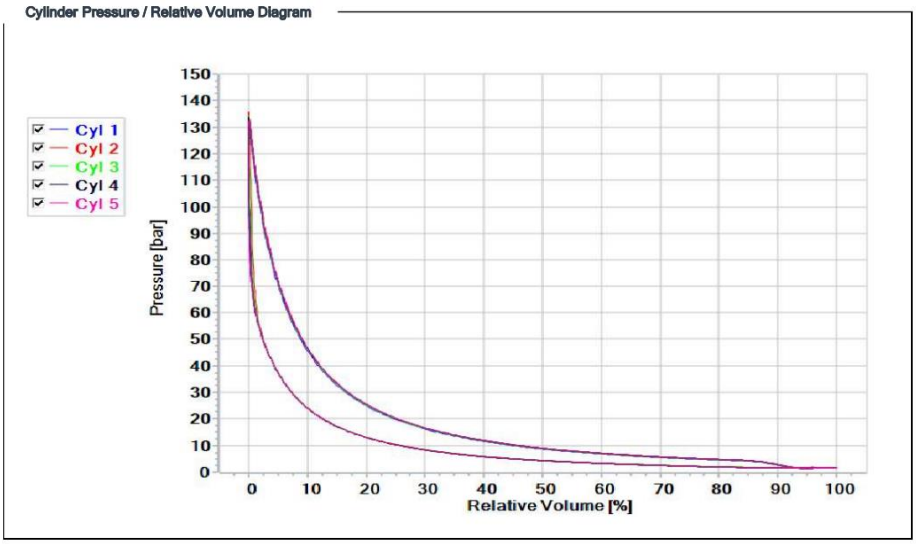


Рисунок 10 – PV диаграмма работы MAN 5G70ME-C10.5 на газовом топливе при 65 оборотах

Из представленных данных следует, что при работе на газовом топливе газовый цикл имеет более высокие давления рабочего процесса, а также более высокий разброс параметров по цилиндрам из-за особенностей рабочего тела.

Касательно выбросов NOx рассматриваемый двигатель проходил заводские испытания на разных режимах работы: дизельный режим при Tier II, дизельный режим при Tier III, газовый режим при Tier III. Все испытания проводились со включенной системой EGR. Как было указано ранее, данный двигатель спроектирован на эксплуатацию с постоянно работающей системой рециркуляции ОГ для полноценного газообмена. Результаты данных испытаний изображены на рис. 12.

Engine

Time Stamp	Engine Speed [rpm]	p(scav) [bar]	Estimated Effective Power [MW]	Estimated Load [%]
2024-12-15 12:19:39 PM	65.0	2.35	6.4	58

Cylinder

Cylinder Number	p(i) [bar]	p(comp) [bar]	p(max) [bar]	p(comp)/ p(scav) [abs/abs]
1	9.3	101.9	141.9	30.7
2	9.3	102.0	142.7	30.8
3	9.3	102.1	142.3	30.8
4	9.3	101.5	141.3	30.6
5	9.3	100.6	140.8	30.4
Mean	9.3	101.6	141.8	30.7

Рисунок 11 – Таблица основных параметров рабочего процесса при работе на газовом топливе

Engine Group Name : HYUNDAI-MAN B&W 5G70ME-C-GA-2023-01

9. Test cycle(s)(acc. to Chapter 3 of the IMO NOx Technical Code) : E3
10. Rated Power & Speed : 11033 kW at 74.3 RPM
11. Mean effective pressure : 14.2 bar
12. Max. combustion pressure : 190 bar
13. Engine approval number :
14. Specification of test fuel (and/or Certification number of fuel sample analysis) ISO 8217, RMA10 / Natural Gas (Parent engine of engine group)
15. NOx reducing device designated approval number (if installed) : EGR
16. Applicable NOx emission limit (Regulation 13.4 of Annex VI) : 14.4 g/kWh
16-1. Applicable NOx emission limit (Regulation 13.5.1 of Annex VI) : 3.4 g/kWh
17. Engine's actual NOx emission value (Tier II, Diesel mode with EGR, ISO corrected) : 11.6 g/kWh (KAA007805) (Parent engine of engine group)
17-1. Engine's actual NOx emission value (Tier III, Diesel mode with EGR, ISO corrected) : 2.5 g/kWh (KAA007805) (Parent engine of engine group)
17-2. Engine's actual NOx emission value (Tier III, Gas FRC on mode with EGR) : 0.6 g/kWh (KAA007805) (Parent engine of engine group)

Рисунок 12 – Выдержка из протокола испытания двигателя MAN 5G70ME-C10.5 на выброс NOx

Исходя из представленных в таблице результатов, можно сделать выводы что у двигателя MAN 5G70ME-C10.5 есть большой запас соответствия требованиям Tier III при работе двигателя на газовом топливе, что наделяет систему EGR высоким потенциалом для развития и способностью соответствовать следующим стандартам по выбросам оксидов азота, которые возможно будут введены в будущем.

Заключение

Проведённый сравнительный анализ показателей работы дизельной установки с двигателемMAN 5G70ME-C10.5, оснащенного системой EGR, показал, что использование СПГ в составе судовой энергетической установки, как одного из альтернативных топлив, обеспечивает сразу несколько ключевых преимуществ:

- Значительное снижение выбросов CO_2 от главного двигателя MAN 5G70ME-C10.5;
- Существенное сокращение топливных затрат за счёт более низкой стоимости СПГ [2-4];
- Повышение энергетической эффективности, выраженное в улучшении индекса EEDI — особенно важно в контексте требований MARPOL Annex VI, Phase 3 [1, 5].
- Система EGR обеспечивает требуемое снижение выбросов NOx на газовом и жидком топливах.

Таким образом, использование Системы EGR и СПГ как альтернативного топлива в современных судовых энергетических системах представляет собой эффективное и экономически обоснованное решение. Этот подход соответствует экологическим приоритетам отрасли и способствует адаптации судов к новым нормативным требованиям без ущерба для эксплуатационной надёжности.

Список литературы:

1. IMO. 2018 Guidelines on the method of calculation of the attained Energy Efficiency Design Index (EEDI) for new ships. MEPC 308(73).
2. DNV GL. Gas as marine fuel – Technology outlook and economics. Brochure, 2020.
3. Степанов В.В. Энергетические установки судов. СПб: Морской техникум, 2018.
4. Лаптев А.Н. Повышение энергоэффективности судов. М.: Транспорт, 2019.
5. International Maritime Organization EEDI // IMO. – URL: https://www.imo.org/fr/MediaCentre/HotTopics/Pages/EEDI.aspx (дата обращения: 01.04.2025)
6. MAN B&W Exhaust Gas Recirculation Operational Manual HD HMS Global Academy MEGA Introduction Circular SN2592 IMO NOx Technical File 5G70ME-C-GA-EGRPB