

УДК 621.43

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ
SCR-СИСТЕМ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ НАГРУЗОК**

Антропова Маргарита Вячеславовна^{1,2}, помощник главного конструктора, аспирант
e-mail: m.loginova@aorumo.ru

Андрусенко Сергей Евгеньевич^{1,2}, к.т.н., доцент, заместитель главного конструктора по ДВС

e-mail: s.andrusenko@aorumo.ru

Князев Александр Сергеевич¹, инженер-конструктор 1 категории

e-mail: a.knyazev@aorumo.ru

¹ АО «РУМО», Нижний Новгород, Россия

² Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород, Россия

Аннотация. В статье рассматривается актуальная проблема недостаточной эффективности систем очистки выхлопных газов судовых дизелей в режимах низких нагрузок (10-25% мощности), что ведет к пересмотру испытательных циклов и оценки выбросов оксидов азота для минимизации отрицательного влияния судоходной отрасли на экологию.

Ключевые слова: Судовой дизель, выбросы оксидов азота (NOx), низкие нагрузки, селективное каталитическое восстановление (SCR), бисульфат аммония (ABS), температура выхлопных газов, термоменеджмент, MARPOL Annex VI, энергоэффективность.

**COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS FOR IMPROVING THE EFFICIENCY
OF MARINE DIESEL SCR SYSTEMS UNDER LOW-LOAD CONDITIONS**

Margarita V. Antropova^{1,2}, Assistant to Chief Designer, Postgraduate Student

e-mail: m.loginova@aorumo.ru

Sergey E. Andrusenko^{1,2}, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Associate Professor, Deputy Chief Designer for Internal Combustion Engines

e-mail: s.andrusenko@aorumo.ru

Alexander S. Knyazev¹, Design Engineer of the 1st Category

e-mail: a.knyazev@aorumo.ru

¹ JSC "RUMO", Nizhny Novgorod, Russia

² Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article addresses the current problem of insufficient efficiency of marine diesel exhaust gas cleaning systems under low-load conditions (10-25% of rated power), leading to a

revision of test cycles and nitrogen oxide emission assessments to minimize the negative environmental impact of the shipping industry

Keywords: Marine diesel engine, nitrogen oxide (NO_x) emissions, low loads, selective catalytic reduction (SCR), ammonium bisulfate (ABS), exhaust gas temperature, thermomanagement, MARPOL Annex VI, energy efficiency.

Введение

Согласно данным Европейского агентства по окружающей среде, морской транспорт остается значимым источником загрязнения воздуха, особенно в прибрежных зонах и портах [6]. Нормы IMO MARPOL Annex VI, устанавливающие ограничения выбросов оксидов азота (NO_x) [4], доказали свою эффективность на сертификационных режимах. Однако анализ реальных эксплуатационных профилей судов с использованием данных AIS показывает, что до 54% времени работы главных двигателей приходится на режимы ниже 25% мощности [7]. Именно в этом диапазоне современные системы очистки, в частности селективное каталитическое восстановление (SCR), теряют эффективность или отключаются, что приводит к значительным несанкционированным выбросам [9]. Целью данной статьи является анализ технологических ограничений работы систем снижения NO_x на низких нагрузках и обзор методов преодоления данных ограничений.

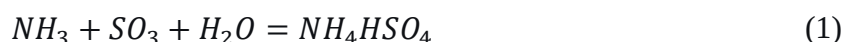
1. Технологические ограничения систем SCR на низких нагрузках

Основным методом достижения стандарта Tier III для судовых двигателей является система SCR. Ее эффективность критически зависит от температуры выхлопных газов (ВГ) на входе в катализатор [10].

Оптимальный диапазон для ванадиевых катализаторов — 300-400°C. [10]. На нагрузках 10-25% мощность, выделяемая при сгорании, невелика, а эффективность турбонаддува снижается, что приводит к падению температуры ВГ до 200-250°C [3]. В этом диапазоне возникают две проблемы:

1. **Кинетическая:** Скорость реакции восстановления NO_x падает, конверсия снижается ниже требуемых 80% [6, 8].

2. **Химическая:** При температурах ниже точки росы (для сернистых топлив — около 280°C) происходит реакция аммиака с триоксидом серы, ведущая к образованию бисульфата аммония (ABS) [11]:



Накопление вязкого ABS блокирует поры катализатора, необратимо снижая его ресурс. Для предотвращения этого системы управления блокируют подачу мочевины, что приводит к несоблюдению экологических норм [9, 11].

Таким образом, необходимым условием работы SCR является поддержание температуры ВГ выше критического порога в 280-300°C во всем диапазоне рабочих нагрузок, включая 10-25%.

Для работы в условиях низких температур ВГ, проводятся работы по адаптации к ним SCR с помощью применения цеолитных и других катализаторов, активных в диапазоне 200-250 °C [9], а также гибридных систем с применением рециркуляции ВГ (EGR) [10] и альтернативных методов, таких как использование микроволновой плазмы [11]. Однако, эти методы либо имеют гораздо большую стоимость, либо требуют оптимизацию рабочего процесса с помощью терменеджмента.



2. Сравнительный анализ методов термоменеджмента

Для обеспечения работоспособности SCR в зоне низких нагрузок необходимо искусственное повышение температуры ВГ на 50–100°C. На основе обзора источников [5, 9, 10, 12] нами систематизированы основные методы термоменеджмента (Таблица 1).

Таблица 1. Сравнительная характеристика методов повышения температуры ВГ

Метод термоменеджмента	Принцип действия	Потенциал роста температуры ВГ	Влияние на расход топлива (SFOC)	Сложность внедрения (CAPEX)
Поздний впрыск топлива	Дожигание топлива в цилиндре/коллекторе	Высокий (+50...100°C)	Значительное увеличение (+2...5%)	Низкая (программная настройка)
Байпас турбины (Wastegate)	Перепуск газов мимо турбины, снижение коэф. избытка воздуха	Средний (+20...50°C)	Умеренное увеличение (+0.5...1.5%)	Средняя (требуется клапан и трубопровод)
Изменение фаз (VVT)	«Внутренняя EGR», раннее открытие выпускного клапана	Средний (+30...60°C)	Незначительное увеличение (<1%)	Высокая (конструкция ГРМ)

3. Анализ результатов

Анализ данных таблицы показывает наличие технико-экономического компромисса. Метод позднего впрыска [10] является наиболее простым в реализации, так как не требует конструктивных изменений двигателя, однако он характеризуется максимальными эксплуатационными затратами (OpEx). Увеличение расхода топлива на 3% при текущих ценах на низкосернистое топливо (VLSFO) делает этот метод экономически нецелесообразным для судов с длительными периодами работы на малых ходах.

Технология байпасирования турбокомпрессора (Wastegate) [12] демонстрирует оптимальный баланс. Снижение коэффициента избытка воздуха позволяет поднять температуру выхлопа с минимальным превышением по расходу топлива (около 1%).

Перспективные методы, такие как использование микроволновой плазмы [11] или низкотемпературных катализаторов [9], пока находятся на стадии опытных разработок и обладают низкой степенью технологической готовности (TRL 4-5), а также чувствительны к отравлению серой.

Заключение

Ограничение выбросов NO_x судовыми дизелями на низких нагрузках представляет собой сложную инженерную задачу. Существующие технологии (байпас, изменение фаз газораспределения) позволяют расширить рабочий температурный диапазон SCR, но их внедрение требует преодоления компромисса между снижением NO_x и увеличением расхода топлива и выбросов CO₂ [2].

Проведенный анализ проблем эксплуатации судовых дизелей с системами SCR на низких нагрузках позволил сделать следующие выводы:

1. Существует дефицит тепловой энергии выхлопных газов (порядка 50–80°C) на режимах <25% нагрузки, делающий невозможным безопасную эксплуатацию SCR без дополнительных мер.



2. Сравнение методов термоменеджмента показало, что наиболее эффективным решением для проектируемых судов является применение систем изменяемых фаз газораспределения (VVT), обеспечивающих рост температуры при минимальном росте расхода топлива.

3. Для модернизации существующего флота рекомендована установка системы байпасирования турбины (Wastegate), так как это требует меньших капитальных затрат по сравнению с VVT и обеспечивает меньший расход топлива по сравнению с методом позднего впрыска.

Дальнейшее ужесточение норм, такое как введение обязательного теста на 10% нагрузке, потребует от отрасли широкого внедрения методов термоменеджмента и адаптации SCR, что повлечет за собой рост эксплуатационных и капитальных расходов и необходимость поиска новых технологических решений для минимизации углеродного следа [1]. Оптимальный путь лежит в комплексной оптимизации двигателя, системы очистки и эксплуатационных процедур судна [2].

Список литературы

1. Новиков, Л. А. Оценка дополнительных затрат судовладельцев при использовании SCR-технологии на судах / Л. А. Новиков, В. С. Корчинский // Двигателестроение. — 2016. — № 3. — С. 23–31.
2. Ammar, N. R. Eco-environmental analysis of ship emission control methods: Case study RO-RO cargo vessel / N. R. Ammar, I. S. Seddiek // Ocean Engineering. — 2017. — Vol. 137. — P. 166–173.
3. Ammonium-Salt Formation and Catalyst Deactivation in the SCR System for a Marine Diesel Engine / Y. Zhu [et al.] // Catalysts. — 2018. — Vol. 9, no. 1. — Art. 21.
4. Čampara, L. Overview of MARPOL ANNEX VI regulations for prevention of air pollution from marine diesel engines / L. Čampara, N. Hasanspahić, S. Vujičić // SHS Web Conf. — 2018. — Vol. 58. — Art. 01004.
5. Different exhaust temperature management technologies for heavy-duty diesel engines with regard to thermal efficiency / B. Wu [et al.] // Applied Thermal Engineering. — 2021. — Vol. 186. — Art. 116495.
6. European Environment Agency. European maritime transport environmental report 2025 / European Environment Agency, European Maritime Safety Agency. — Luxembourg : Publications Office, 2025.
7. International Maritime Organization. Review and development of NOx emission requirements in MARPOL Annex VI and the NOx Technical Code 2008 : Onboard verification method for monitoring and control of NOx strategies : PPR 13/8/1 : submitted by Belgium, Germany, Netherlands (Kingdom of the) and Norway / International Maritime Organization, Sub-Committee on Pollution Prevention and Response, 13th session. — London : IMO, 2025. — 7 November. — 1 p. — (Pre-session public release).
8. A Review and Economic Analysis of Different Emission Reduction Techniques for Marine Diesel Engines / M. Issa [et al.] // OJMS. — 2019. — Vol. 09, no. 03. — P. 148–171.
9. A Review of Low Temperature NH₃-SCR for Removal of NOx / D. Damma [et al.] // Catalysts. — 2019. — Vol. 9, no. 4. — Art. 349.
10. A review of NOx and SOx emission reduction technologies for marine diesel engines and the potential evaluation of liquefied natural gas fuelled vessels / J. Deng [et al.] // Science of The Total Environment. — 2021. — Vol. 766. — Art. 144319.
11. Reduction of NOx and PM in marine diesel engine exhaust gas using microwave plasma / W. Balachandran [et al.] // J. Phys.: Conf. Ser. — 2015. — Vol. 646. — Art. 012053.



12. Verschaeren, R. Increasing exhaust temperature to enable after-treatment operation on a two-stage turbo-charged medium speed marine diesel engine / R. Verschaeren, S. Verhelst // Energy. — 2018. — Vol. 147. — P. 681–687.

