

ЭНЕРГЕТИКА, ЭНЕРГОРЕСУРСЫ

doi: 10.51639/2713-0576_2024_4_4_04

УДК 656.6:504.3.054:621.43.068.4

ГРНТИ 87.17.15:73.34.35

ВАК 2.5.20

Снижение выбросов оксидов азота от судовых энергетических установок

¹Зубко С. С., ²Шеманин В. Г., ^{1*} Туркин В. А.,

¹ Краевой А. И., ¹Круз А. В., ¹Кислицын Я. Г.

¹Государственный морской университет им. Ф.Ф. Ушакова,
353924, Россия, г. Новороссийск, проспект Ленина, 93

²Новороссийский филиал Белгородского государственного технологического университета
им. В.Г. Шухова (НФ БГТУ им. В.Г. Шухова), 353919, Россия,
г. Новороссийск, Мысхакское шоссе, дом 75

email: 1992sergeyz@mail.ru, vshemanin@mail.ru, * turvla@mail.ru, kraevoy03@mail.ru,
aleksandarkruz@yandex.ru, kislitsyn.2003@gmail.com

Аннотация

В связи с ужесточением законодательства Международной морской организацией в области снижения выбросов оксидов азота судовыми дизельными установками, необходимо развивать и модернизировать системы очистки отработавших газов. Для соответствия нормам выбросов ИМО Tier III и снижения загрязнения окружающей среды многие океанские суда установили морскую систему SCR для снижения выбросов NO_x. В качестве объекта исследования рассмотрена система селективного каталитического восстановления высокого давления (HP-SCR) главного судового малооборотного дизельного двигателя MAN 6G60ME-C9.5. Система расположена перед турбиной, что вызывает увеличение противодавления отработавших газов двигателя, а, следовательно, повлияет на его производительность

и удельный расход топлива. Во время эксплуатации судна были произведены замеры выбросов NO_x в атмосферу на различных режимах работы двигателя. Проанализирована взаимосвязь между расходом мочевины и выбросами в зависимости от концентрации активного вещества. Проведенное исследование показывает, что более концентрированная смесь мочевины обеспечивает лучшую нейтрализацию оксидов азота при меньшем расходе. Получено, что при основном режиме эксплуатации 51% экономия мочевины с процентным содержанием активного вещества 40% составляет 38 литров в час (912 литров в сутки) по отношению к мочеvine с процентным содержанием активного вещества 32%. Автономность плавания будет на 68 часов больше. 32% мочевины не обеспечивает выполнение требования МАРПОЛ Приложение VI по количеству выбросов NO_x

в атмосферу. Необходимо снижение количества выбросов на 0,149 г/(кВт·час), чтобы обеспечить экологические нормы Tier III.

Ключевые слова: судовой двухтактный дизель, отработавшие газы, оксиды азота, селективное каталитическое восстановление, расход мочевины.

Введение

Морские суда играют ключевую роль в мировой торговле и экономике благодаря своей значительной грузоподъемности, высокой безопасности и низким эксплуатационным расходам по сравнению с другими видами транспорта.

До разработки коммерческих судов, использующих источники энергии на основе безуглеродного топлива, дизельные двигатели будут основными источниками энергии для судов в судоходной отрасли. Однако дизельные двигатели выбрасывают значительное количество вредных газообразных веществ – оксиды азота, серы, углерода. В Приложении VI Конвенции МАРПОЛ приведены правила, регулирующие эмиссию от дизельных двигателей NO_x , SO_x и CO_2 , требования к нормам выбросов которых постепенно ужесточаются [1, 2]. Все более строгие экологические нормы вынуждают судоходные компании сокращать выбросы с судов путем разработки и внедрения в практику эксплуатации более экологически чистых технических и технологических решений [3, 4].

ИМО утвердила предложенные поправки, согласно которым все новые судовые дизельные двигатели должны соответствовать трехуровневому стандарту выбросов NO_x Tier. Поправка была окончательно принята комитетом на 58-й сессии в 2008 году.

Целью этого правила является снижение уровня выбросов NO_x мировым судоходством на 20% после 2011 года, а также сокращение выбросов NO_x в зонах контроля выбросов (ECA) на 80% после 2016 года [5].

Правила Tier I и Tier II, введенные МАРПОЛ, были реализованы во всём мировом океане, а правила Tier III являются наиболее строгими. Они предусматривают, что с 2016 года удельный выброс NO_x для двигателей с частотой вращения коленчатого вала менее 130 об/мин в зоне контроля выбросов (ECA) не может превышать 3,4 г/(кВт·час) [6]. Также, каждому двигателю мощностью более 130 кВт, необходимо пройти испытания на соответствие с Техническим кодексом NO_x 2008 (NTC 2008), и получить сертификационное значение выбросов NO_x через расчет на основе заданного весового коэффициента [2, 7].

Различные типы дизельных двигателей имеют различные характеристики. Перед энергетическим кризисом почти все торговые суда ходили с нагрузкой на главный двигатель (ГД) 70 – 80 %, что обеспечивало высокую тепловую эффективность. При более низких нагрузках двухтактный дизельный двигатель имеет тенденцию к более длительному сгоранию топлива и газообмену, как следствие снижение КПД, более низкую эффективную мощность, в связи с чем генерируется относительно большое количество NO_x г/(кВт·час) [8]. В настоящее время предлагаются следующие технологии денитрификации отработавших газов двигателей внутреннего сгорания (ДВС) [9]: рециркуляция отработавших газов (EGR); впрыск топлива под высоким давлением; добавление воды в метанол.

С целью извлечения оксидов азота из выбрасываемых в атмосферу отработавших газов может использоваться установка, реализующая технологию адсорбционной очистки газов.

В качестве адсорбента в установке используются гранулированные доменные шлаки. Достоинствами метода являются отсутствие в конструкции устройства дорогостоящих катализаторов и химических реагентов [10, 11]. Указанные выше технические решения могут значительно снизить выбросы NO_x с отработавшими газами дизельных двигателей, однако их использование является сложной задачей.

Технология селективного каталитического восстановления – selective catalytic reduction (SCR) NO_x нашла применение на транспорте благодаря простой структуре, проверенной в условиях эксплуатации двигателей, хорошей экономии топлива и высокой эффективности денитрификации – более 90% [12, 13].

Принцип работы селективно каталитического реактора высокого давления HPSCR

По принципу компоновки системы SCR их можно разделить на систему высокого давления (HP-SCR), расположенную перед турбиной, и систему SCR низкого давления (LP-SCR), расположенную после турбины [14, 15].

Рабочее давление системы LP-SCR обычно нормальное или немного выше нормального атмосферного давления. Система LP-SCR подходит для четырехтактных двигателей с высокими температурами газов после турбины [16].

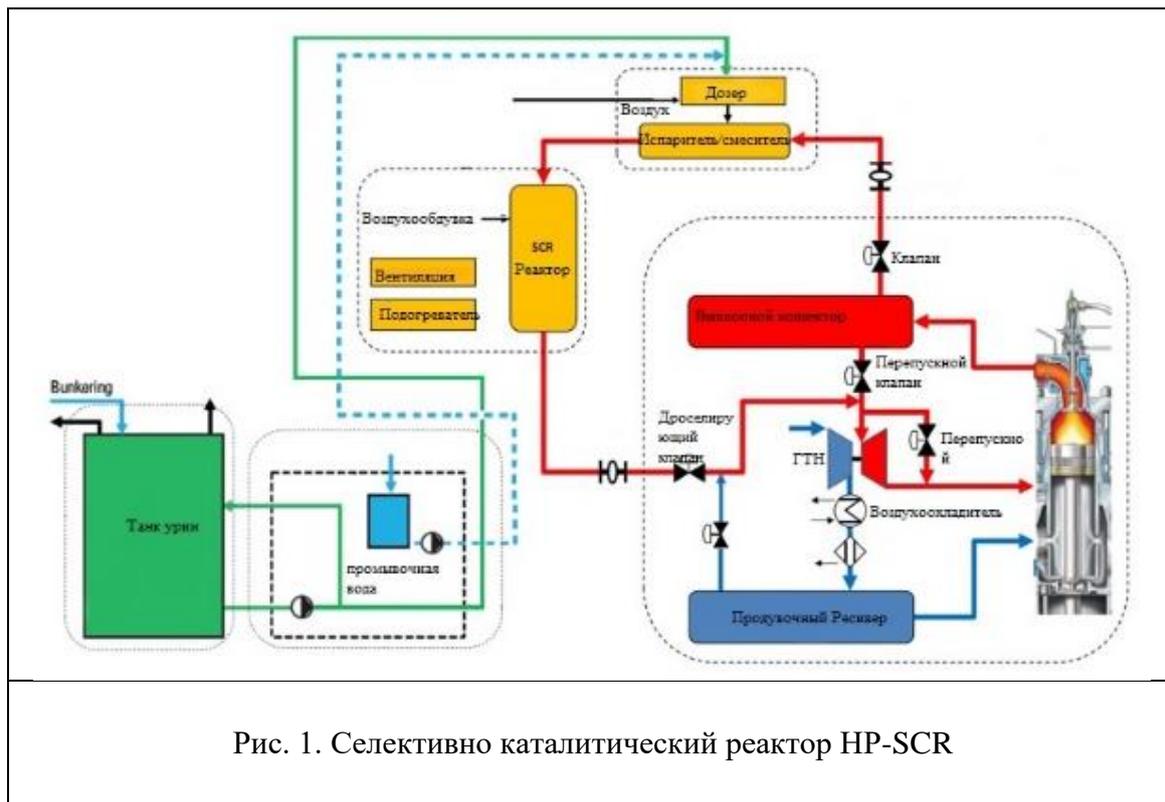
Система HP-SCR обычно применяется в низкооборотных двигателях. Ее рабочая температура на 50 – 175 °C выше температуры газов за турбиной, что позволяет использовать энергию отработавших газов с целью повышения эффективности очистки выбросов от NO_x [17].

Система HP-SCR устанавливается перед турбиной, что увеличивает противодавление двигателя, снижает эффективность турбокомпрессора и увеличивает удельный расход топлива. Конструкция системы HP-SCR более сложная. Во-первых, необходимо учитывать пространство для её установки и компоновочные характеристики главного двигателя. Во-вторых, реактор HP-SCR имеет значительную тепловую инерцию. Вследствие этого, производительность главного двигателя серьезно ухудшается при переключении режима с Tier II на Tier III, и возникает необходимость в пересмотре энергетического баланса между главным двигателем, реактором SCR и турбокомпрессором [18].

Селективно каталитический реактор высокого давления HP-SCR производства SunRuiMarineEnvironmentalEngineeringCo., Ltd, показанный на рис. 1, представляет собой систему SCR высокого давления, установленную перед ГТН ГД.

Дизельный двигатель, оборудованный системой SCR, соответствует стандартам выбросов NO_x Tier III Приложения VI МАРПОЛ.

Система HP-SCR спроектирована на принципе автоматического контроля и управления. Блоки управления устанавливаются в соответствии с конструктивными особенностями судна и требованиями судовладельца. Программируемые логические контроллеры могут автоматически регулировать работу системы согласно параметрам и сигналам работающего оборудования.



SCR – это селективная каталитическая реакция, которая преобразует NO_x в воду и азот, а раствор мочевины используется в качестве химического агента, который распыляется в смеситель и пиролизуется до аммиака.

Снижение выброса NO_x достигается каталитическим процессом в реакторе SCR. Для установок HP реактор размещается перед турбокомпрессором. В реакторе SCR NO_x каталитически восстанавливается до азота и воды путем добавления аммиака в качестве восстановителя. Восстановителем, используемым для процесса SCR, является: водный раствор мочевины (40% раствор); водный раствор аммиака (25% NH_3).

Каталитический процесс протекает в реакторе, который содержит каталитические элементы с большим количеством каналов и, таким образом, обеспечивает большую площадь поверхности катализатора, как это показано на рис. 2.

Используемый восстановитель впрыскивается в испаритель. В случае использования мочевины в качестве восстановителя мочевины разлагается на аммиак и углекислый газ.

Протекание реакции осуществляется следующим образом:



Принцип протекания реакции показан на рис. 3.

Система HP-SCR состоит из 6 частей: реактор и смеситель, насосная установка мочевины, блок раствора мочевины, блок сжатого воздуха, блок распыленного воздуха и система управления [17].

Насосная станция мочевины оснащена двумя насосами, которые автоматически регулируют дозировку раствора в соответствии с заданной командой системой управления.

Максимальный расход мочевины составляет 220 литров в час, давление может достигать 10 бар. Регулировка протока осуществляется при помощи сигнала 4-20мА. Раствор мочевины

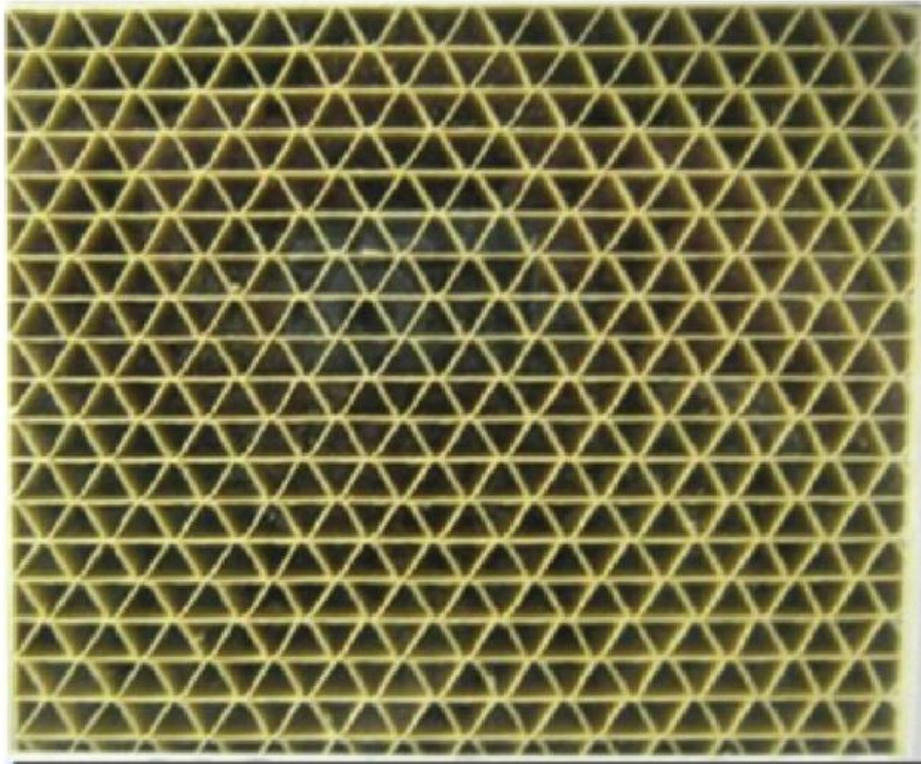


Рис. 2. Каталитический элемент в реакторе SCR с каналами для обеспечения оптимального контакта между технологическим газом, восстановителем и каталитическим материалом

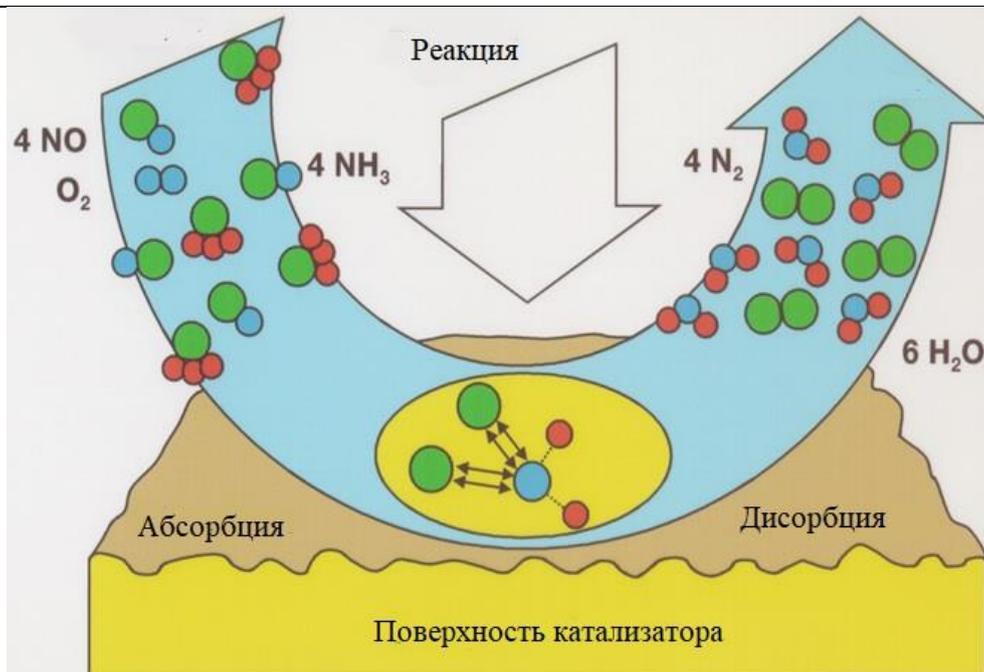


Рис. 3. Селективно-каталитическая реакция нейтрализации NO_x

распыляется до размера 40µm, далее происходит смешение с выхлопными газами в смесительной камере.

Максимальный расход мочевины составляет 220 литров в час, давление может достигать 10 бар. Регулировка протока осуществляется при помощи сигнала 4-20мА. Раствор мочевины распыляется до размера 40µm, далее происходит смешение с выхлопными газами в смесительной камере.

Пресная вода используется для промывки форсунки, чтобы предотвратить образование кристаллизации в трубе, когда ГД переходит в режим работы Tier II.

Смесительная камера для двигателя 6G60ME-C SCR Mk9.5 расположена выше выхлопного коллектора. В камере происходит смешение селективно каталитического агента с выхлопными газами.

Функция реактора SCR заключается в обеспечении каталитического процесса. Реактор установлен в специальной горизонтальной фундаментной раме. Распределитель устанавливается перед SCR катализатором для обеспечения лучшего распределения газов перед входом в реактор.

Система подогрева используется при эксплуатации судна в режиме Tier III для поддержания температуры реактора выше 200 °С. Это необходимо для того, чтобы избежать конденсации серной кислоты при последующем запуске двигателя.

Система саже обдува установлена в реакторе для предотвращения прилипания частиц к поверхности катализатора и продувки поверхностей катализатора сжатым воздухом под давлением 9 бар.

Контрольная система реализует две функции: подача мочевины в соответствии с полученными и обработанными сигналами и управление клапанами и насосами. Контрольная система включает в себя программное обеспечение, сенсоры (датчики температуры, давления, трансмиттеры давления, датчики протока). Кроме того, система может выдавать сообщения о полученных сигналах неисправности во время автоматической работы и выполнять защитные действия.

Замеры расходов мочевины и выбросов NO_x во время эксплуатации двигателя

Во время эксплуатации ГД были произведены замеры выбросов NO_x при использовании мочевины с разной концентрацией нейтрализующего агента: 40% и 32%.

Результаты замеров приведены в таблице, а также на рис. 4 и 5.

Анализ данных таблицы 1, а также графических зависимостей, приведенных на рис. 4 и 5 показывает, что на основном режиме эксплуатации судового двигателя (51%), расход мочевины с концентрацией 40% составляет 158 литров в час, с концентрацией 32% – 196 литров в час, а выбросы оксидов азота будут равны 247 ppm и 273 ppm соответственно. При этом экономия мочевины составляет 38 литров в час, а выбросы NO_x будут на 26 ppm ниже.

При использовании мочевины с содержанием нейтрализующего вещества 32% удельные выбросы NO_x превышают предельно допустимое значение выбросов, установленное конвенцией МАРПОЛ.

Для снижения выбросов можно принудительно через экран управления эмитировать использование мочевины с более низким содержанием активного вещества, тем самым увеличить подачу мочевины.

Так же повлиять на удельный выброс NO_x можно, уменьшив коэффициент избытка воздуха следующими способами: использовать дизельное топливо с более низкой теплотворной

способностью; увеличить температуру продувочного воздуха; уменьшить коэффициент остаточных газов.

Таблица 1

Результаты замеров расходов мочевины и выбросов NO_x при эксплуатации двигателя

Нагрузка ГД, %	Выбросы NO_x при концентрации мочевины 40%		Расход мочевины, л/час	Выбросы NO_x при концентрации мочевины 32%		Расход мочевины, л/час
	PPM	г/(кВт·час)		PPM	г/(кВт·час)	
13	243	3,159	43	354	4,060	49
26	238	3,094	84	296	3,848	105
46	248	3,224	147	285	3,705	171
51	247	3,211	158	273	3,549	196
60	241	3,133	196	289	3,757	214

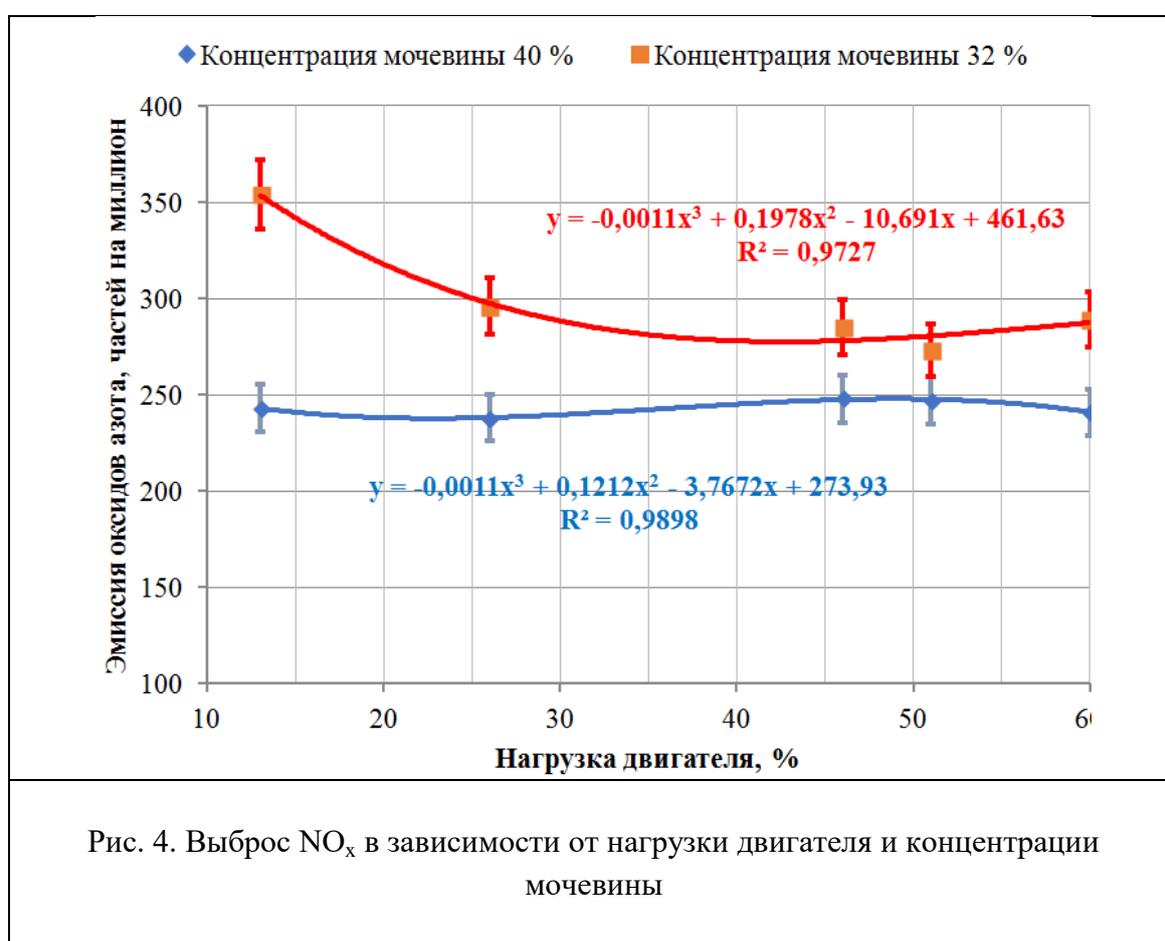
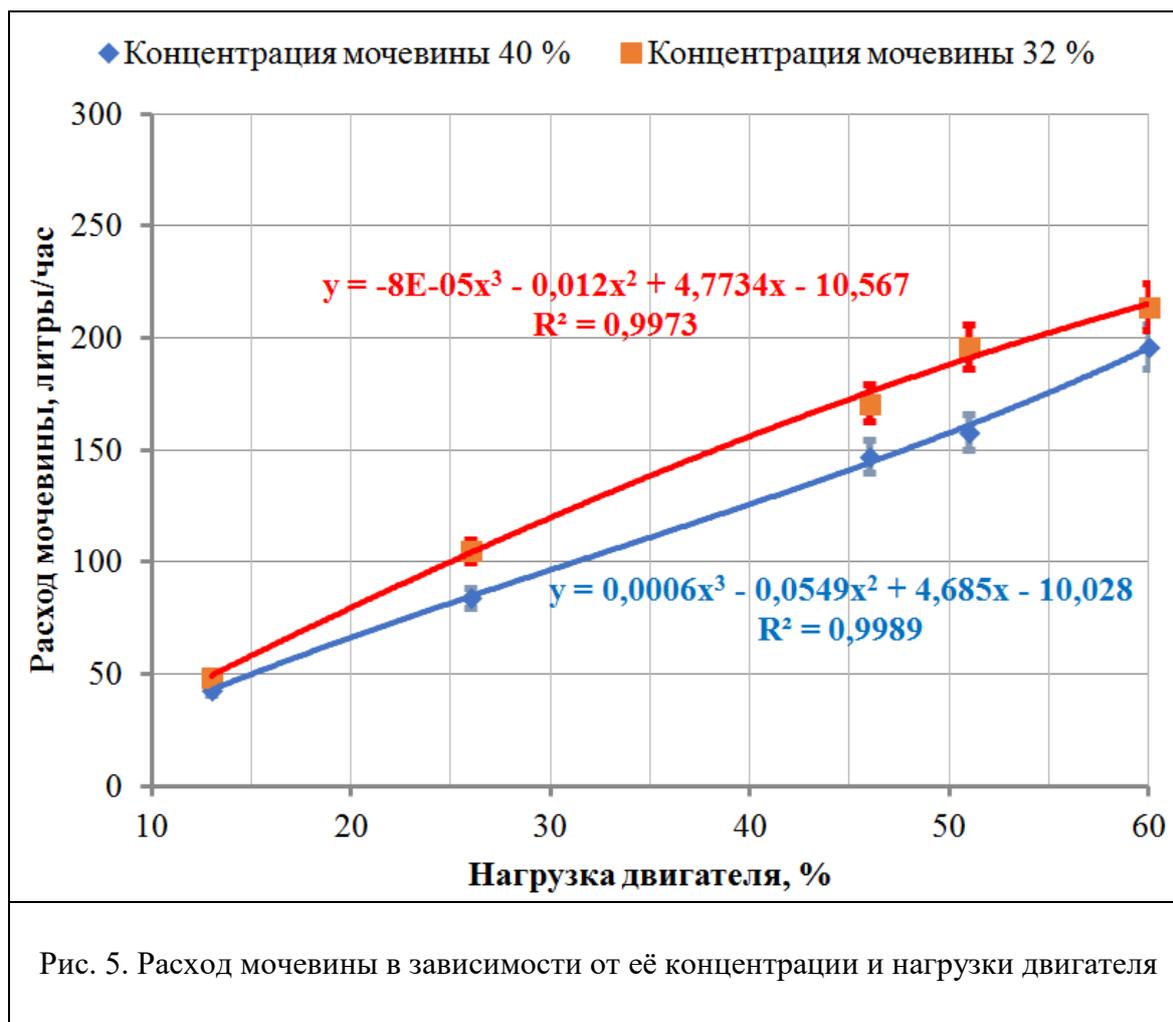


Рис. 4. Выброс NO_x в зависимости от нагрузки двигателя и концентрации мочевины



Соотношение аммиака к азоту ($n(\text{NH}_3) / n(\text{NO}_x)$) является очень важным показателем в работе SCR. С одной стороны, соотношение аммиачного азота $n(\text{NH}_3) / n(\text{NO}_x)$ будет иметь большое влияние на скорость конверсии NO_x . С другой стороны, соотношение аммиачного азота $n(\text{NH}_3) / n(\text{NO}_x)$ напрямую определяет дозировку восстановителя NH_3 .

Этот алгоритм расчета количества впрыска мочевины путем изучения влияния соотношения аммиачного азота на эффективность конверсии каталитических нейтрализаторов при условии определенного расхода и температуры заложен в систему управления и впрыска мочевины в реактор SCR.

Общая тенденция заключается в том, что эффективность каталитической конверсии NO_x увеличивается с увеличением соотношения аммиачного азота ($n(\text{NH}_3) / n(\text{NO}_x)$).

При низкой температуре скорость конверсии NO_x имеет тенденцию быть постоянным значением по мере увеличения соотношения аммиака к азоту.

Когда температура отработавших газов составляет 300 °С, по мере увеличения соотношения аммиака к азоту, эффективность преобразования увеличивается, и соотношение аммиака к азоту достигает 0,8, эффективность преобразования достигает максимального значения.

При достижении температуры 370°С-430°С, эффективность преобразования достигает максимума.

Заключение

В качестве объекта исследования рассматривается двухтактный низкооборотный дизельный двигатель 6G60ME-C9.5 и селективно каталитический реактор высокого давления HP-SCR, который позволяет снизить выбросы NO_x с потоком отработавших газов двигателей. Однако использование этих технологий для соответствия все более строгим нормам выбросов является сложной задачей. Технология SCR стала предпочтительной для очистки выбросов NO_x с судов благодаря своей простой структуре, прогрессивной технологии, хорошей экономии топлива и эффективности денитрификации более 80 %.

На основании обработки экспериментально полученных в условиях эксплуатации судна данных, были построены графические зависимости расхода мочевины и выбросов NO_x от концентрации активного вещества. При основном режиме эксплуатации главного двигателя 51% экономия мочевины с содержанием активного вещества 40% составляет 38 литров в час (912 литров в сутки) по отношению к 32% мочевины. Автономность плавания без пополнения запасов мочевины в этом случае будет на 68 часов больше.

Сделан вывод о том, что содержание мочевины 32% не обеспечивает выполнения требований Приложение VI МАРПОЛ к удельному выбросу NO_x в атмосферу с потоком отработавших газов от исследуемого главного двигателя. Необходимо снижение количества выбросов на 0,149 г/(кВт·час), что повлечет дополнительный расход мочевины и сокращение времени автономного плавания, без пополнения запасов мочевины.

Конфликт интересов

Авторы статьи заявляют, что у них нет конфликта интересов по материалам данной статьи с третьими лицами на момент подачи статьи в редакцию журнала, и им ничего не известно о возможных конфликтах интересов в настоящем со стороны третьих лиц.

Список источников

1. Иванченко А.А. Энергетическая эффективность судов и регламентация выбросов парниковых газов / А.А. Иванченко, А.П. Петров, Г.Е. Живлюк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2015. № 3 (31). С. 103-112.
2. Marpol ANNEX VI and NTC 2008 with guidelines for implementation 2017 Edition Supplement September 2020.
3. Modina M.A., Khekert E.V., Voskanyan A.A., Pismenskaia Yu.V., Epikhin A.I., Shkoda V.V. Bioindication and biomonitoring assessment of the state of atmospheric air and soil in the study area. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2021, 867, 012072.
4. Modina M.A., Khekert 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.
5. Zhang Y., XiaC., LiuD., ZhuY., Feng Y. Experimental investigation of the high-pressure SCR reactor impact on a marine two-stroke diesel engine. Fuel, 2023, 335, 127064.

6. Kati L, Pivi, et al. Particulate mass and nonvolatile particle number emissions from marine engines using low-sulfur fuels, natural gas, or scrubbers. *Environ Sci Technol*, 2019, 53(6), 3315-3322.
7. Marine Environmental protection committee (MEPC), 58th session 6-10 October 2008.
8. Corbett, J. J. and Koschbeck P. Update emissions from ocean shipping. *Journal of Geophysical Research*. 2003,108, 4650.
9. Zamboni G., Moggia S., Capobianco M. Hybrid EGR and turbocharging systems control for low NO_x and fuel consumption in an automotive diesel engine. *ApplEnerg*, 2016, 165, 839-848.
10. Туркин В.А., Игнатенко Г.В., Беляев В.В., Зубко С.С., Краевой А.И. Адсорбционная очистка отработавших газов судового энергетического оборудования, Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 1 (63). Ч.1. С. 153-158.
11. Turkin V.A., Pismenskaya Y.V., Ignatenko G.V., Aleksandrova V.V. Carbon dioxide extraction from marine engine exhaust gases by the method of adsorption. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 872, 012007.
12. Jung Y., Shin Y.J., Pyo Y.D., et al. NO_x and N₂O emissions over a Urea-SCR system containing both V₂O₅-WO₃/TiO₂ and Cu-zeolite catalysts in a diesel engine. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 326, 853-682.
13. Latha H.S., Prakash K.V., Veerangouda M., et al. A review on SCR system for NO_x reduction in diesel engine. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 2019, 8(4),1553-1559.
14. Zhang Y., Xia C., Liu D., Zhu Y., Feng Y. Experimental investigation of the high-pressure SCR reactor impact on a marine two-stroke diesel engine. *Fuel*, 2023, 335, 127064.
15. Tan L., Feng P., Yang S., Guo Y., Liu S., Li Z. CFD studies on effects of SCR mixers on the performance of urea conversion and mixing of the reducing agent. *Chem Eng Process*, 2018, 123, 82-88.
16. ABS Advisory on NO_x Tier III Compliance. 2020, 14-15.
17. Bornhorst M., Deutschmann O. Advances and challenges of ammonia delivery by urea-water sprays in SCR systems. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2021, 87, 100949.
18. Foteinos M.I., Konstantinidis S.K., Kyratos N.P. Simulation of the transient thermal response of a high pressure selective catalytic reduction aftertreatment system for a Tier III two-stroke marine diesel engine. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2019, 141(7), 071001.
19. Operation and maintenance Manual of SCR system. Marine Environmental Engineering CO., Ltd., 2016.

Reducing nitrogen oxide emissions from marine power plants

¹Zubko S. S., ²Shemanin V. G., ^{1*}Turkin V. A., ¹Kraevoy A. I., ¹ Cruz A. V., ¹Kislitsyn Ya. G.

¹ Admiral Ushakov Maritime State University, 352924, Russia, Novorossiysk, Lenin Avenue, 93

²Novorossiysk branch of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (NF BSTU named after V.G. Shukhov), 353919, Russia, Novorossiysk, Myshakskoe highway, house 75

email: 1992sergeyz@mail.ru, vsheamanin@mail.ru, * turvla@mail.ru, kraevoy03@mail.ru,
aleksandarkruz@yandex.ru, kislitsyn.2003@gmail.com

Abstract

Due to the tightening of the International Maritime Organization legislation in the field of reducing nitrogen oxide emissions from marine diesel engines, it is necessary to develop and modernize exhaust gas cleaning systems. In order to comply with IMO Tier III emission standards and reduce environmental pollution, many ocean-going vessels have installed a marine SCR system to reduce NO_x emissions. The object of the study is the high-pressure selective catalytic reduction (HP-SCR) system of the main marine low-speed diesel engine MAN 6G60ME-C9.5. The system is located in front of the turbine, which causes an increase in the backpressure of the engine exhaust gases, and, therefore, will affect its performance and specific fuel consumption. During the operation of the vessel, NO_x emissions into the atmosphere were measured at various operating modes of the main engine. The relationship between urea consumption and emissions depending on the concentration of the active substance was analyzed. The study shows that a more concentrated urea mixture provides better neutralization of nitrogen oxides with lower consumption. It was found that in the basic operating mode of 51%, the savings of urea with an active substance percentage of 40% is 38 liters per hour (912 liters per day) in relation to urea with an active substance percentage of 32%. The cruising autonomy will be 68 hours longer. 32% urea does not ensure compliance with the MARPOL Annex VI requirement for NO_x emissions into the atmosphere. It is necessary to reduce the emissions by 0.149 g/(kW·h) to ensure TIER III environmental standards.

Keyword: marine two-stroke diesel, exhaust gases, nitrogen oxides, selective catalytic reduction, urea consumption

References

1. Ivanchenko A.A., Petrov A.P., Zhivlyuk G.E. Energy efficiency of ships and regulation of greenhouse gas emissions. Bulletin of the Admiral S. O. Makarov State University of Maritime and Inland Shipping. 2015, 3, pp. 103-112.
2. Marpol ANNEX VI and NTC 2008 with guidelines for implementation 2017 Edition Supplement September 2020.
3. Modina M.A., Khekert E.V., Voskanian A.A., Pismenskaia Yu.V., Epikhin A.I., Shkoda V.V. Bioindication and biomonitoring assessment of the state of atmospheric air and soil in the study area. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2021, 867, 012072.
4. Modina M.A., Khekert 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.
5. Zhang Y., XiaC., LiuD., ZhuY., Feng Y. Experimental investigation of the high-pressure SCR reactor impact on a marine two-stroke diesel engine. Fuel, 2023, 335, 127064.
6. Kati L, Pivi, et al. Particulate mass and nonvolatile particle number emissions from marine engines using low-sulfur fuels, natural gas, or scrubbers. Environ Sci Technol, 2019, 53(6), pp. 3315-3322.
7. Marine Environmental protection committee (MEPC), 58th session 6-10 October 2008.
8. Corbett, J. J. and Koschbeck P. Update emissions from ocean shipping. Journal of Geophysical Research. 2003,108, 4650.

9. Zamboni G., Moggia S., Capobianco M. Hybrid EGR and turbocharging systems control for low NO_x and fuel consumption in an automotive diesel engine. *Appl Energ*, 2016, 165, pp. 839-848.
10. Turkin V.A., Ignatenko G.V., Belyaev V.V., Zubko S.S., Kraevoy A.I., Adsorption purification of exhaust gases from ship power equipment. *Marine intellectual technologies*. 2024, 1-1, pp. 153-158.
11. Turkin V.A., Pismenskaya Y.V., Ignatenko G.V., Aleksandrova V.V. Carbon dioxide extraction from marine engine exhaust gases by the method of adsorption. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 872, 012007.
12. Jung Y., Shin Y.J., Pyo Y.D., et al. NO_x and N₂O emissions over a Urea-SCR system containing both V₂O₅-WO₃/TiO₂ and Cu-zeolite catalysts in a diesel engine. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 326, 853-682.
13. Latha H.S., Prakash K.V., Veerangouda M., et al. A review on SCR system for NO_x reduction in diesel engine. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 2019, 8(4), 1553-1559.
14. Zhang Y., Xia C., Liu D., Zhu Y., Feng Y. Experimental investigation of the high-pressure SCR reactor impact on a marine two-stroke diesel engine. *Fuel*, 2023, 335, 127064.
15. Tan L., Feng P., Yang S., Guo Y., Liu S., Li Z. CFD studies on effects of SCR mixers on the performance of urea conversion and mixing of the reducing agent. *Chem Eng Process*, 2018, 123, 82-88.
16. ABS Advisory on NO_x Tier III Compliance. 2020, 14-15.
17. Bornhorst M., Deutschmann O. Advances and challenges of ammonia delivery by urea-water sprays in SCR systems. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2021, 87, 100949.
18. Foteinos M.I., Konstantinidis S.K., Kyrtatos N.P. Simulation of the transient thermal response of a high pressure selective catalytic reduction aftertreatment system for a Tier III two-stroke marine diesel engine. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2019, 141(7), 071001.
19. Operation and maintenance Manual of SCR system. Marine Environmental Engineering CO., Ltd., 2016.