

УДК 629.12

РАСЧЁТ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ СЕЛЕКТИВНОЙ КАТАЛИТИЧЕСКОЙ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ (SCR) ДЛЯ СУДОВОГО ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ РАБОТЕ НА РАЗЛИЧНЫХ СОРТАХ ТОПЛИВА

Иванченко Александр Андреевич¹, зав. кафедрой ДВС и АСЭУ, профессор, д.т.н.

e-mail: prof_ivanchenko@mail.ru

Маммадзада Фарид Расим оглы¹, аспирант

e-mail: farid-mamedzade134@mail.ru

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

Аннотация. В статье рассматривается методика оценки эффективности систем селективной каталитической нейтрализации (SCR) судовых энергетических установок. Проводится сравнительный анализ химического состава различных сортов судового топлива и их влияние на параметры процесса нейтрализации оксидов азота (NO_x). Приводится математическая модель расхода реагента и конверсии газов.

Ключевые слова: Оксиды азота NO_x , типовой состав исследуемых топлив, теоретический объем воздуха V^0 , Tier III, SCR, термолиз мочевины, гидролиз, бисульфат аммония, приложение VI МАРПОЛ, ИМО.

EFFICIENCY CALCULATION OF A SELECTIVE CATALYTIC REDUCTION (SCR) SYSTEM FOR A MARINE DIESEL ENGINE OPERATING ON VARIOUS FUEL GRADES

Alexander A. Ivanchenko¹, Head of the Department of Internal Combustion Engines and Automated Ship Electric Power Systems, Professor, Doctor of Technical Sciences

e-mail: prof_ivanchenko@mail.ru

Farid R. Mammadzada¹, Doctoral Student

e-mail: farid-mamedzade134@mail.ru

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

Abstract. The paper discusses a methodology for evaluating the efficiency of selective catalytic reduction (SCR) systems in marine power plants. A comparative analysis of the chemical composition of various marine fuel grades and their impact on the nitrogen oxide (NO_x) neutralisation process parameters is carried out. A mathematical model of reagent consumption and gas conversion is presented.

Keywords: Nitrogen oxides (NO_x), typical composition of fuels under study, theoretical air volume V^0 , Tier III, SCR, urea thermolysis, hydrolysis, ammonium bisulphate, MARPOL Annex VI, IMO.

1. Введение

Проблема загрязнения атмосферного воздуха продуктами сгорания судовых дизельных двигателей остается одной из наиболее острых в современной морской инженерии. Оксиды азота (NO_x), образующиеся при высоких температурах в камере сгорания, являются предшественниками кислотных дождей и фотохимического смога. Согласно регламентам Международной морской организации (ИМО), в частности правилу 13 Приложения VI к Конвенции МАРПОЛ 73/78, современные суда обязаны соответствовать стандарту Tier III.

Технология селективной каталитической нейтрализации (SCR) является «золотым стандартом» для достижения этих норм. Однако в условиях эксплуатации на судах, использующих различные сорта топлива — от легкого дистиллятного (MGO) до тяжелого высоковязкого мазута (HFO) — эффективность системы SCR не является константой. Данная работа посвящена математическому обоснованию эффективности процесса нейтрализации с учетом химических особенностей различных сортов топлива.

2. Химический состав и характеристики топлива

Для расчета эффективности SCR необходимо определить элементный состав топлива. Рассмотрим два типа: маловязкое судовое топливо (CMT) и тяжелое топливо (мазут IFO 380).

Расчет состава горючей массы производится по формуле:

$$C^p + H^p + S^p + O^p + N^p + W^p + A^p = 100\% \quad (1)$$

Таблица 1. Типовой состав исследуемых топлив (в %)

Показатель, %	MGO (ISO 8217)	VLSFO (0.5% S)	HFO (IFO 380)
Углерод (Cp)	86,25	85,9	85,1
Водород (Hp)	13,1	11,8	10,8
Сера (Sp)	0,1	0,48	2,75
Кислород (Op)	0,25	0,55	0,65
Азот (Np)	0,2	0,35	0,4
Влажность (Wp)	0,05	0,42	0,2
Зольность (Ap)	0,05	0,5	0,1
Низшая теплота сгорания ($Q_{н}$) МДж/кг	42,7	41,6	40,4
Теоретически необходимый объем воздуха (V_0) м ³ /кг	10,97	10,72	10,53

Присутствие серы (S^p) является ключевым фактором, так как при температурах ниже 280°C она вступает в реакцию с аммиаком, образуя бисульфат аммония (NH_4HSO_4), который деактивирует катализатор.

3. Расчёт процессов горения и образования NO_x

Теоретический объем воздуха V^0 , необходимый для полного сгорания 1 кг топлива:

$$V^0 = 0,0889(C^p + 0,375S^p) + 0,265H^p - 0,0333O^p \quad (2)$$



Ниже приведён расчёт элементного состава, низшей теплоты сгорания, теоретически необходимого воздуха и объёмов продуктов сгорания для трёх типов топлива: MGO, VLSFO и HFO.

Для пересчёта на рабочую массу (r), которая используется в расчётах, применяется формула:

$$X^r = X^a \cdot \frac{(100 - W^r - A^r)}{100} \quad (3)$$

где X^r — массовая доля элемента в рабочей массе топлива;

X^a — массовая доля элемента в аналитической массе топлива;

W^r — рабочая влажность топлива (содержание воды);

A^r — рабочая зольность топлива.

В предоставленной ниже таблице приведён уже пересчитанный рабочий элементный состав для трёх рассматриваемых топлив.

3.1. Расчет теоретического объема воздуха

Теоретически необходимый объем воздуха (V^0 , $\text{нм}^3/\text{кг}$) для окисления 1 кг топлива:

$$V^0 = 0,0889(C^p + 0,375S^p) + 0,265H^p - 0,0333O^p \quad (4)$$

1. Для MGO:

$$V^0 = 0,0889(86,25 + 0,375 \cdot 0,1) + 0,265 \cdot 13,1 - 0,0333 \cdot 0,25 = 11,13 \text{ нм}^3/\text{кг} \quad (5)$$

2. Для HFO:

$$V^0 = 0,0889(85,1 + 0,375 \cdot 2,75) + 0,265 \cdot 10,8 - 0,0333 \cdot 0,65 = 10,49 \text{ нм}^3/\text{кг} \quad (6)$$

3.2. Расчет действительного объема газов

С учетом коэффициента избытка воздуха ($\alpha = 1,9...2,2$ для судовых дизелей) и влажности воздуха:

$$V_g = V_{RO_2} + V_{N_2}^0 + V_{H_2O}^0 + (\alpha - 1)V^0 \quad (7)$$

где $V_{RO_2} = 0,01866(C^p + 0,375S^p)$ — объем трехатомных газов.

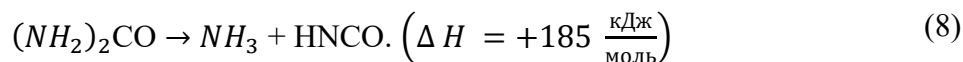
4. Механизм селективной каталитической нейтрализации

Система SCR использует водный раствор мочевины $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ (концентрация 40%). Процесс трансформации реагента включает критически важные этапы.

4.1. Термодинамика и кинетика процесса SCR

В системах SCR в качестве восстановителя используется 32,5% или 40% водный раствор мочевины $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$. При впрыске в поток газа при температуре 280–400°C происходит термоллиз:

Термоллиз мочевины:



(Термоллиз при $T > 133^\circ\text{C}$)



Затем на первой ступени катализатора происходит гидролиз изоциановой кислоты:

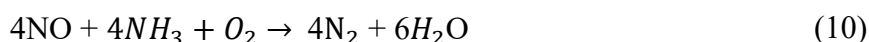


(Гидролиз при участии катализатора)

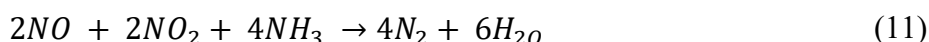
Побочные реакции: образование закиси азота N_2O или прямое окисление аммиака, которые снижают эффективность при слишком высоких температурах ($> 450^\circ\text{C}$).

4.2. Каталитическое восстановление

Основная реакция, обеспечивающая удаление до 95% оксидов азота:



При наличии в газах диоксида азота (5–10% от общего NO_x) протекает «быстрая» реакция:



5. Методика расчета эффективности и расхода восстановителя

Эффективность системы η определяется как:

$$\eta = \frac{C_{\text{NOx},in} - C_{\text{NOx},out}}{C_{\text{NOx},in}} \quad (12)$$

5.1. Расчет необходимого количества аммиака

Массовый расход чистого аммиака (m_{NH_3}) для нейтрализации потока NO_x :

$$m_{\text{NH}_3} = \frac{G_g \cdot C_{in} \cdot \eta \cdot M_{\text{NH}_3}}{M_{\text{NO}_x} \cdot 10^6} \quad (13)$$

где G_g - массовый расход газов (кг/ч);

M - молярные массы веществ.

5.2. Расчет расхода раствора мочевины (AUS40)

С учетом концентрации раствора (40%) и коэффициента запаса (стехиометрического отношения ($\zeta = 1,05$)):

$$G_{sol} = \frac{m_{\text{NH}_3}}{0,4 \cdot (2 M_{\text{NH}_3} \cdot M_{urea})} \cdot \zeta \quad (14)$$

Работа на тяжелом топливе (HFO) вносит существенные коррективы в работу SCR.

6.1. Деактивация катализатора

При сжигании HFO образуется значительное количество SO_2 и SO_3 . При температурах ниже 320°C протекает побочная реакция:



Это вещество забивает активные центры катализатора (ванадиево-титанового типа). Следовательно, при работе на мазуте необходимо поддерживать более высокую



температуру газов, что снижает общий КПД двигателя из-за необходимости байпасирования экономайзеров.

7. Анализ полученных результатов

Проведенные расчеты показывают, что переход с MGO на HFO при сохранении объема катализатора приводит к:

1. **Снижению времени пребывания газов** в реакторе на 4–6% из-за разницы в молярных объемах продуктов сгорания.
2. **Необходимости повышения температуры впрыска** с 260°C до 330°C.
3. **Росту удельного расхода мочевины** на 2–3% вследствие компенсации побочных реакций с оксидами серы.

Заключение

В ходе исследования был проведен комплексный расчет химического состава трех видов судового топлива и определена эффективность системы SCR. Установлено, что для обеспечения требований Tier III на тяжелых топливах требуется увеличение объема каталитической массы на 15% относительно базового расчета для дистиллятных топлив. Полученные математические модели могут быть использованы при проектировании систем газоочистки для арктических судов и танкерного флота.

Список литературы:

1. Безюков О. К., Жуков В. А. Экологическая безопасность и нейтрализация отработавших газов судовых двигателей. — СПб.: ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2020. — 212 с.
2. Иванченко А. А. Технологии снижения токсичности выбросов в морском судоходстве. — М.: Моркнига, 2021. — 176 с.
3. Кондратьев С. И. Судовые двигатели внутреннего сгорания: проектирование и расчет систем очистки. — Новороссийск: МГУ им. адм. Ф.Ф. Ушакова, 2022. — 288 с.
4. Кузнецов Е. В., Малышкин Б. Н. Влияние элементного состава топлива на процессы в каталитическом реакторе // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адм. С.О. Макарова. — 2019. — № 5. — С. 891-902.
5. Леонов И. В. Математическое моделирование систем SCR для мощных дизелей // Транспортное дело России. — 2023. — № 1. — С. 144-148.
6. Николаев В. В. Эксплуатационные аспекты работы систем SCR на тяжелом топливе // Морские интеллектуальные системы. — 2022. — № 4 (58). — С. 56-61.
7. Российский Морской Регистр Судоходства. Руководство по техническому надзору за двигателями внутреннего сгорания. — СПб.: РМРС, 2021. — 94 с.
8. Тихонов А. М., Шелехов П. Ю. Анализ химизма процессов в судовых селективных реакторах // Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология. — 2020. — № 2. — С. 78-85.
9. Удалов А. С. Оценка экологической эффективности судовых энергетических установок // Двигателестроение. — 2021. — № 3. — С. 34-39.
10. Чернов С. В. Теплотехнические расчеты судовых систем. — Владивосток: Дальрыбвтуз, 2022. — 120 с.

