

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫБРОСОВ ОКСИДОВ АЗОТА ДВИГАТЕЛЕЙ МОРСКОГО ПАРОМА В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

А. Гедгаудас, АО «Лиско Балтик Сервис»
В. Смайлис, Р. Страздаускене, Клайпедский университет

Выполнены испытания по определению выбросов NO_x главных дизелей типа 6VD48/42(6CH42/48), установленных на морском пароме «Клайпеда», плавающем под литовским флагом. Испытания проводились в условиях морской эксплуатации парома, при совершении рядового рейса по маршруту Клайпеда–Заснитц (Мукран)–Клайпеда. Измерения состава отработавших газов проводились автоматическим газоанализатором HORRIBA PG-250A. Условия испытаний в основном соответствовали требованиям руководящего документа ИМО «Технический кодекс по контролю выбросов NO_x от судовых дизельных двигателей». Испытания показали, что исследованные двигатели, находящиеся в эксплуатации 18 лет, имеют цикловой выброс NO_x существенно ниже предельно-допустимого по Правилу 13 Приложения VI МАРПОЛ 73/78. По результатам испытаний также сделан вывод о некорректности использования имеющихся в литературе среднестатистических коэффициентов регрессионных зависимостей $e_{\text{NO}_x} = f(P_e)$ применительно к отдельным конкретным двигателям.

В мае 2005 г. вступило в силу VI приложение к Международной конвенции МАРПОЛ 73/78 по предотвращению загрязнения воздуха с морских судов [1]. Наибольшее значение для практики имеют два раздела Приложения: Правило 13, регламентирующее выброс оксидов азота (NO_x) с отработавшими газами судовых двигателей и Правило 14, установившее ограничения на предельно допустимое содержание серы в морском топливе. Правило 14 пока еще не действует — оно вступит в силу 19 мая 2006 г.

Правило 13 для двигателей судов, попадающих под действие VI Приложения, устанавливает предельно-допустимое значение удельных выбросов NO_x в зависимости от номинальной частоты вращения коленчатого вала:

$$\begin{aligned} [e_{\text{NO}_x}] &\leq 17 \text{ г/кВт} \cdot \text{ч при } n_n < 130 \text{ об/мин,} \\ [e_{\text{NO}_x}] &= 45 n_n^{(-0,2)} \text{ г/кВт} \cdot \text{ч} \\ &\text{при } 130 \leq n_n < 2000 \text{ об/мин,} \\ [e_{\text{NO}_x}] &\leq 9,8 \text{ г/кВт} \cdot \text{ч при } n_n > 2000 \text{ об/мин.} \end{aligned}$$

Показатель $[e_{\text{NO}_x}]$ является средневзвешенным по режимам соответствующего стандартного эксплуатационного цикла E2, E3, D2 либо C1 стандарта ИСО 8178, часть 4 [2]. Выбор цикла осуществляется по основной характеристике дизеля, задаваемой изготовителем в зависимости от его назначения и типа пропульсивного комплекса судна. Определение показателя e_{NO_x} должно производиться по методике, изложенной в руководящем документе ИМО «Технический кодекс по контролю выбросов NO_x от судовых дизельных двигателей» (ТК NO_x), являющимся официальным дополнением Приложения VI Конвенции [3]. Испытания двигателей по определению выброса NO_x в условиях заводского стенда каких-либо проблем не представляет. Однако в случаях, когда выбросы NO_x должны быть определены в условиях эксплуатируемого судна, двигатели которого не проходили испытания на заводских стендах и к которым невозможно применить метод аналогов, возникает ряд серьезных трудностей. Наиболее серьезная из них состоит в том, что без специального, весьма сложного и дорогостоящего дооборудования систем топливоподачи, воздухоснабжения и вала отбора мощности (за исключением случая работы двигателя на электрогенератор) невозможно с необходимой точностью определить расход топлива, воздуха и нагрузочный режим дизеля. В свою очередь, без этих данных невозможно получить с требуемой по ТК NO_x точностью значения объемного расхода отработавших газов, эффективной мощности и удельных выбросов NO_x . Проблема еще более усложняется, когда силовая установка судна состоит из нескольких главных двигателей, в том числе работающих на один вал, а также при работе двигателей на тяжелом топливе с высокой температурой подогрева и большой кратностью циркуляции в системе топливоподготовки. Именно такие условия характерны для плавающих под литовским флагом трех морских паромов серии «Клайпеда» (рис. 1, табл. 1), построенных в 1987 г. в ГДР по заказу СССР и использованных для эвакуации из Германии Западной группы войск по морскому маршруту Заснитц (Мукран)–Клайпеда.



Рис. 1. Морской паром «Клайпеда»

Таблица 1

Характеристика морского парома «Клайпеда»

Класс по Российскому регистру	KM ⁺ L2 A2	
Год постройки	1987	
Длина	м	190,9
Ширина	м	28,0
Средняя осадка	м	7,18
Полное водоизмещение при осадке 7,18	т	22 255
Дедвейт	т	12 020
Регистровый брутто-тоннаж	брт	21 890
Дальность плавания	мили	2200
Номинальная скорость	узлов	15,8
Мощность главной силовой установки	кВт	4X2650
Запас топлива	т	445
Тип топлива	240 cSt при 50°C 100 cSt при 50°C	
Суточный расход топлива в море	т	43
Суточный расход топлива в порту	т	3,0
Количество перевозимых железнодорожных вагонов	ед.	54
Команда судна	чел.	42
Число мест для пассажиров	мест	12

Пропульсивный комплекс парома состоит из 4-х двигателей 6VD48/42 (6ЧН42/48) конструкции SKL, работающих попарно через редукторы на два винта регулируемого шага с дополнительной нагрузкой от 2-х валогенераторов (по одному на каждую пару). Схема и технические данные силовой установки и двигателя представлены на рис. 2 и в табл. 2 и 3.

Измерения выбросов NO_x проводилось на парома «Клайпеда» во время его регулярного рейса по маршруту Клайпеда—Засснитц—Клайпеда.

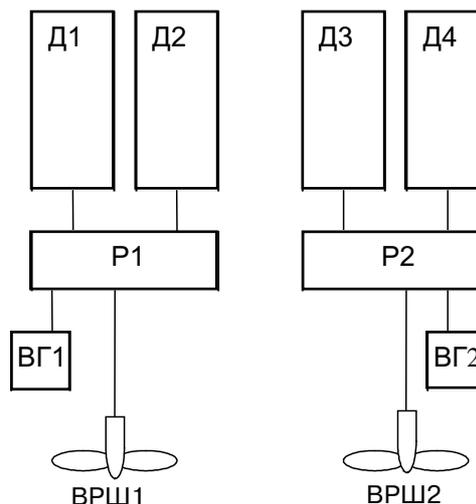


Рис. 2. Схема силовой установки морского парома «Клайпеда»:

Д — дизель, Р — редуктор, ВГ — валогенератор, ВРШ — винт регулируемого шага

Таблица 2

Состав пропульсивного комплекса судна парома «Клайпеда»

Число главных двигателей	ед.	4
Частота вращения двигателя	об/мин	500
Общая мощность силовой установки	кВт	10 600
Число редукторов	ед.	2
Число валогенераторов	ед.	2
Общая мощность валогенератора	кВт	3000
Число гребных винтов	ед.	2
Тип гребных винтов		ВРШ
Диаметр гребных винтов	мм	4000
Частота вращения гребных винтов	об/мин	170

Таблица 3

Технические данные дизеля 6VDS48/42

Параметр	Значение параметра
Типоразмер	6ЧН42/48
Тактность	4-тактный
Диаметр цилиндра, мм	420
Ход поршня, мм	480
Рабочий объем, дм ³	399
Номинальная частота вращения, об/мин	500
Номинальная мощность, кВт	2650
Среднее эффективное давление, МПа	1,59
Удельный расход топлива на номинальном режиме, г/кВт·ч	204

Расстояние между паромными терминалами Клайпеды и Засснитца (Мукран) — 270 морских миль. Время прохождения пути в одну сторону — 20 ч при средней скорости на маршруте (не включая время движения и маневрирования в акваториях портов) 15 узлов.

Для измерения состава отработавших газов использовался автоматический газоанализатор Horiba PG-250 с подогреваемым пробоотборным зондом и горячей линией пробоподвода к кондиционеру газа. Общий вид и основные данные аппаратуры даны на рис. 3 и табл. 4.



Рис. 3. Размещение газоаналитической аппаратуры в машинном отделении судна

Таблица 4

**Основные технические данные
газоанализатора HORRIBA PG-250A**

Измеряемые компоненты	NO _x /SO ₂ /CO/CO ₂ /O ₂
Тип детектора	
NO _x	CLD
SO ₂ /CO/CO ₂	NDIR
O ₂	PMR
Единицы измерения	
NO _x /SO ₂ /CO	ppm
CO ₂ /O ₂	проценты
Верхние пределы диапазонов шкалы измерений	
NO _x	250/500/1000/2500
SO ₂	200/500/1000/3000
CO	200/500/1000/2000
CO ₂ /O ₂	5/10/20/25 (O ₂)
Повторяемость	±0,5 % полной шкалы
Линейность	±2,0 % полной шкалы
Нагревательный газоотборный зонд	PSP 4000
Нагреваемая линия газоподвода	PTFE 7,5 м
Охладитель газа	МАК 6.2
Блок логистики	DX 100

Как отмечалось ранее, наибольшие трудности при таких испытаниях связаны с установкой и поддержкой нагрузочного режима дизеля и определением действительных расходных характеристик топлива и воздуха. В отсутствие специальных дополнительных датчиков в системах двигателя (в рядовых испытаниях это нормальная практика) нагрузку двигателей определяют по показаниям штатных приборов пульта управления дизеля, а расход топлива — по данным его заводских испытаний [4]. По этим данным, а также результатам измерения состава отработавших газов и элементному составу топлива определяется суммарный коэффициент избытка воздуха и объемный расход отработавших газов. Для этой цели мы использовали нижеприведенные упрощенные формулы, полученные с условием допущения, что весь углерод топлива окислялся до двуокиси углерода CO₂ (для судовых дизелей, где неполнота сгорания топлива редко достигает 1 %, такое допущение вполне приемлемо).

$$\alpha_{CO_2} = \frac{A + BCO_2}{CO_2},$$

где: $A = \frac{C}{12L_0}$, $L_0 = \frac{1}{0,21} \left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4} + \frac{S}{32} - \frac{O}{32} \right)$, кмоль/кг топлива,

C, H, S, O — компоненты элементного состава топлива, кг/кг топлива, $B = 0,21 - A$; CO₂ — содержание диоксида углерода в сухих отработавших газах дизеля, объемные доли.

В ходовом режиме главные двигатели работали на топливе IFO 240. Результаты анализа проб этого топлива, отобранных при бункеровании и вычисленные по его данным характеристики продуктов сгорания, представлены в табл. 5.

Измерения состава отработавших газов проводились на трех из четырех главных двигателей отдельно (четвертый двигатель из-за плохого технического состояния не исследовался). Нагрузочный режим при измерениях поддерживался близким к стандартным значениям цикла E2 ИСО 8178, часть 4. Однако выйти на необходимое для измерений время на режим полной нагрузки не представлялось возможным. На долевых режимах средние значения нагрузки не совпадают со стандартными до 1,5 %, что можно считать более чем удовлетворительным, однако колебания нагрузки вокруг среднего заданного значения достигали ±2,5 %, что отражалось и на результаты газового анализа. Оценивая результаты испытаний, следует иметь в виду, что точность определения нагрузки по индикатору пульта управления дизеля весьма невысока и может дать погрешность ориентировочно до ±2 %. Таким образом, полученные результаты отдельных измерений могут быть весьма неточными и для повышения качества

**Характеристики морского топлива IFO-240 разных партий
по данным лабораторного элементного анализа**

№ образца топлива	$S^{daf}, \%$	$C^{daf}, \%$	$H^{daf}, \%$	$N^{daf}, \%$	$O^{daf}, \%$	$Q_{н},$ МДж/кг	L_0 кмоль/кг топлива	m_{g}^{d*} кмоль/кг топлива
5	2,10	85,74	11,17	0,41	0,58	40,5924	0,476338	0,448740
6	1,89	85,92	11,11	0,46	0,62	40,7086	0,476028	0,448610
7	2,08	85,92	11,01	0,41	0,58	40,6307	0,475119	0,447920
8	1,87	86,17	11,02	0,39	0,55	40,7061	0,475914	0,448675
11	2,08	86,41	10,56	0,40	0,55	40,3366	0,471705	0,445620
12	1,87	86,08	11,01	0,44	0,60	40,6598	0,475438	0,448257
13	2,08	85,86	11,02	0,44	0,60	40,6185	0,475000	0,447794
14	1,87	86,09	11,00	0,44	0,60	40,6529	0,475362	0,448206
21	1,33	85,86	11,07	0,45	1,29	40,5130	0,474481	0,447370
22	1,24	85,63	11,01	0,40	1,72	40,3165	0,472714	0,445869
23	1,18	85,26	11,00	0,41	2,15	40,1274	0,471043	0,444361
24	1,33	85,91	10,96	0,44	1,34	40,4062	0,473371	0,446547
29	1,50	85,98	11,02	0,41	1,18	40,5327	0,474614	0,447579
30	1,81	85,93	11,13	0,43	0,70	40,7152	0,476186	0,448733
31	1,16	85,84	11,05	0,40	1,55	40,4387	0,473890	0,446895
32	1,21	85,79	11,04	0,42	1,54	40,4180	0,473667	0,446698
35	1,29	85,59	11,10	0,38	1,64	40,4099	0,473705	0,446603
36	1,04	85,44	11,02	0,41	2,09	40,2003	0,471786	0,445035
37	1,22	85,60	10,99	0,39	1,80	40,2749	0,472328	0,445554
38	1,24	85,57	10,99	0,40	1,80	40,2669	0,472238	0,445468

m_{g}^{d*} — число киломолей чистых сухих продуктов сгорания 1 кг топлива при $\alpha = 1$.

оценок целесообразно обработать результаты всех измерений, используя регрессионный анализ.

Усредненные по режимам испытаний результаты измерений концентрации NO_x в ОГ каждого дизеля, и вычисленные на этой основе значения удельного по расходу топлива выброса e'_{NO_x} , г/кг топлива, а также аппроксимированные регрессионные зависимости (в виде полинома второй степени) представлены в табл. 6 и на рис. 4. На этом рисунке даны также объединенные 1 и 2 дизели, работающие в паре на один винт (кривая I) и общий для всех четырех двигателей (кривая IV) график изменения e'_{NO_x} во всем диапазоне нагрузок стандартного цикла.

Полученные результаты показывают, что у одинаковых двигателей, составляющих общую силовую установку судна, эксплуатируемых в одинаковых условиях, выброс оксидов азота, определяемый по одинаковой методике, может отличаться весьма существенно. Эти различия не могут быть объяснены одними только неточностями измерений и, очевидно, имеют объективный характер. В данном конкретном случае можно предполагать, что основная причина

расхождений — различия в техническом состоянии дизелей и возможно, в регулировках топливной аппаратуры.

Для более точного определения причин существенных различий выбросов NO_x следовало бы произвести индентификацию двигателей на режимах испытаний. Однако в данном случае такой технической возможности не имелось.

Данные рис. 4 показывают, что первая пара двигателей имеет хорошо совпадающие характеристики, а уровень показателей e'_{NO_x} близок к среднестатистическому для двигателей этого класса [5].

Обобщенная кривая для всей совокупности данных по трем дизелям сохраняет высокую степень линейной корреляции между e'_{NO_x} и P_e , однако коэффициент корреляции по уравнению квадратного полинома из-за расхождения данных по третьему дизелю заметно ухудшился. Это говорит о том, что использование среднестатистических коэффициентов регрессионного уравнения для большого массива данных может дать приемлемую точность оценок, однако для малого числа объектов и особенно для единичных дизелей может оказаться совершенно не-

Таблица 6

Усредненные по режимам испытаний результаты измерений концентрации NO_x в ОГ и удельные (по топливу) e'_{NO_x} , определенные для каждого дизеля

Нагрузка	Концентрация NO_x , ppm	Удельный по топливу выброс NO_x , г/кг топлива
1-й двигатель		
0,955	833	47,720
0,955	849	48,978
0,855	754	44,116
0,855	771	45,353
0,755	669	40,216
0,755	674	40,740
0,505	472	33,738
0,505	464	33,753
0,265	232	24,926
0,265	238	25,404
2-й двигатель		
0,885	711	44,278
0,885	706	43,967
0,84	663	41,446
0,84	672	42,169
0,75	614	41,455
0,75	620	41,351
0,51	474	35,260
0,51	469	36,541
0,265	250	26,772
0,265	246	27,230
3-й двигатель		
0,945	735	40,215
0,945	730	39,942
0,85	662	36,834
0,85	665	37,063
0,75	593	34,090
0,75	580	33,285
0,5	387	25,248
0,5	389	25,080
0,26	250	22,036
0,26	245	21,538

приемлемым.

По вычисленным значениям e'_{NO_x} определялись удельные по мощности выбросы e_{NO_x}

$$e_{NO_x} = \frac{e'_{NO_x}}{b_e}, \text{ г/кВт} \cdot \text{ч.}$$

на стандартных режимах цикла

Значения e'_{NO_x} в точках стандартных режимов определялись с использованием соответствующих регрессионных уравнений.

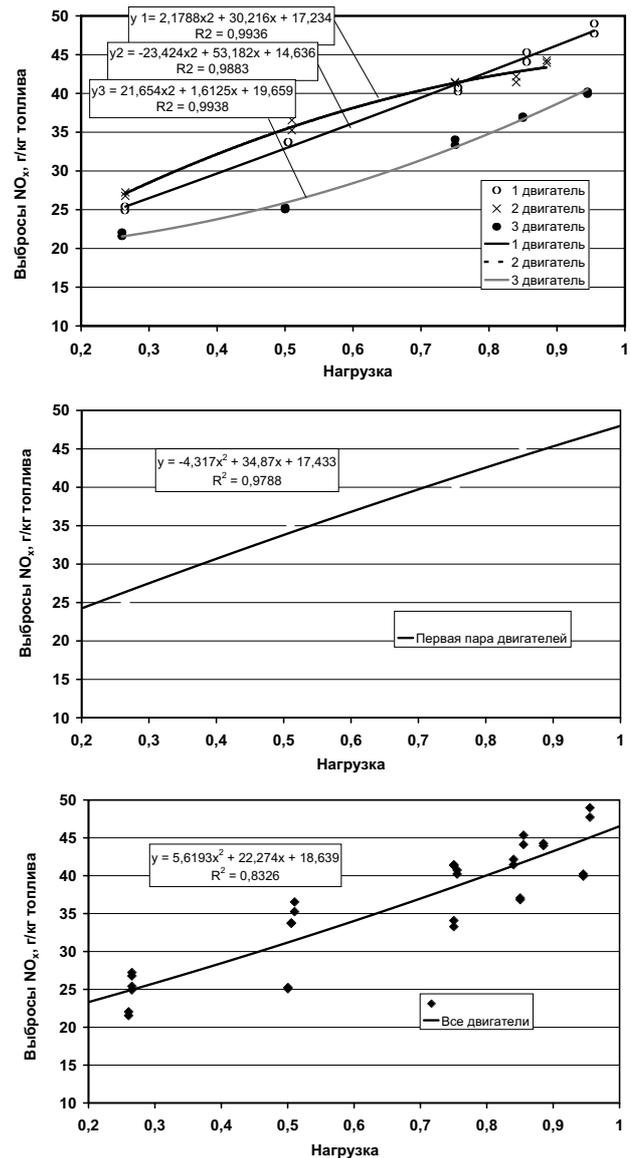


Рис. 4. Удельные выбросы e'_{NO_x} , исследованных главных дизелей парома «Клайпеда»

Результаты расчетов цикловых показателей выбросов оксидов азота представлены в табл. 7. Для сравнения там же приведены нормативные значения предельно-допустимого значения циклового выброса e_{NO_x} , подсчитанные по номинальным параметрам дизеля 6VDS48/42. Видно, что фактические цикловые выбросы, оцениваемые по данным измерений, значительно ниже нормативных, составляющих 12,98 г/кВт · ч. Очевидно, что двигатели морского парома «Клайпеда» при их настоящем техническом состоянии (эксплуатируются 18 лет), даже с учетом возможных максимальных погрешностей определения режимных значений e'_{NO_x} , проблем по выбросам оксидов азота создавать не будут.

Экспериментальное исследование выбросов оксидов азота на морском парома «Клайпеда» в

Удельные показатели выброса оксидов азота e'_{NO_x} , e_{NO_x} и средневзвешенные по стандартному циклу E2

Относительная нагрузка дизеля, P_e	Двигатель 1		Двигатель 2		Двигатель 3	
	e'_{NO_x} Г/КГ топлива	e_{NO_x} Г/КВТ·ч	e'_{NO_x} Г/КГ топлива	e_{NO_x} Г/КВТ·ч	e'_{NO_x} Г/КГ топлива	e_{NO_x} Г/КВТ·ч
1	49,64	10,13	44,39	9,06	42,93	8,76
0,75	41,12	8,43	41,35	8,48	33,05	6,77
0,5	32,89	7,20	35,37	7,75	25,88	5,67
0,25	24,97	6,32	26,47	6,70	21,42	5,42
По циклу E2	39,16	8,27	38,83	8,22	32,20	6,80

условиях эксплуатации, выполненное в основном по методике «Технический кодекс по контролю выбросов NO_x от судовых дизельных двигателей» показало, что цикловые показатели e_{NO_x} для двигателей этого судна значительно ниже нормативных. Предполагается, что основная причина этого — снижение напряженности и динамики процесса сгорания в цилиндрах вследствие аккумуляции износных эффектов в узлах и системах двигателей.

По результатам исследования также можно сделать вывод о том, что использование рекомендуемых некоторыми исследователями среднестатистических значений коэффициентов корреляционного уравнения в виде полинома второй степени (применительно к отдельным конкретным двигателям) даже в случае их полной

однотипности может привести к существенным ошибкам в оценке цикловых выбросов NO_x .

Литература

1. International convention for prevention of pollution from ships (MARPOL 73/78). — 1996. Book I and II. IMO. London.
2. 8178. Reciprocating internal combustion engines. Exhaust emission measurement — part 1 and 2.
3. Technical Code on Control of Emission of Nitrogen Oxides from Marine Diesel Engines. Annex VI to MARPOL 73/78, IMO. — London, 1998.
4. Cooper D.A., Ekstrom M. Applicability of the PEMS technique for simplified NO_x monitoring on board ships. // Atmospheric environment 39 — 2005. — P.127–137.
5. Corbett J.J., Koehler H.W. Updated emissions from ships ocean shipping // Journal of geophysical research. — P. 108.

**Заслуженному машиностроителю РФ, академику РАТ,
д.т.н., профессору Санкт-Петербургского Государственного
Университета водных коммуникаций (СПГУВК),
члену редакционной коллегии журнала «Двигателестроение»**

Тузову Леониду Васильевичу

2 января 2006 года исполняется 75 лет.

С 1986 г. его работа связана с научно-педагогической деятельностью в Государственном Университете водных коммуникаций (ГУВК).

Он автор большого количества изобретений и более чем 200 публикаций. Леонид Васильевич воспитал 34 кандидата и 3 доктора технических наук.

Активная деятельность Тузова Л. В. отмечена Государственной премией Совета Министров РСФСР.



Уважаемый Леонид Васильевич!

Редакция журнала «Двигателестроение», коллеги и друзья поздравляют Вас с юбилеем и желают здоровья, долгих лет жизни, счастья, дальнейших успехов.

