

- Orlov, Ulyanovsk State Technical University. - Ulyanovsk: Ulyanovsk State Technical University, 2013. - 204 с.
4. Baldanov, M.M. On energy of ion hydration // ZhPH. - 1981. - T.55. - №11. - С. 2862.
 5. Baldanov M.M., Ivanov S.V., Ivanov, V.F., and Tanganov, B.B. To the Problem of Stability of the Ion State in Electrolyte Solutions // ZhPH. - 1995. - T.69. - №3. - С. 529-531.
 6. Baldanov M.M., Ivanov S.V., and Tanganov, B.B. Plasma-like state of electrolyte solutions and viscosity problem // ZhOH. - 1994. - T.64. - №5. - С. 719-721.
 7. Baldanov, M.M., Mokhosoev, M.V., and Tanganov, B.B. Nonempirical calculation of solvate numbers of ions in solutions // DAN USSR. - 1989. - T.308. - №1. - С. 106-110.
 8. Baldanov, M.M., and Tanganov, B.B., To the Problem of Solvate Numbers and Masses of Solvated Ions in Alcohol Solutions // ZhPH. - 1992. - T.66. - №4. - С. 1084-1088.
 9. Baldanov, M.M., Tanganov, B.B., Mokhosoev, M.V. Plasma-like state of electrolyte solutions and dissipative processes // DAN USSR. - 1989. - T.308. - №2. - С. 397-401.
 10. Baldanov, M.M., Tanganov, B.B., Mokhosoev, M.V. Nonempirical calculation of solvate numbers of ions in solutions // Manifestation of Solvent Nature in Thermodynamic Properties of Solutions: Intervuz.sb.-Ivanovo, 1989. - С. 66-70.
 - Baldanov, M.M., Tanganov, B.B., Mokhosoev, M.V. Non-empirical calculation of solvation numbers of ions in solutions // Problems of Solvation and Complexation in Solutions: Abstracts of IV All-Union Meeting. - Ivanovo, 1989. - p.II. - С. 174.
 12. Pavlov, N.N., Baldanov, M.M., Lebedev, V.M. Quantitative evaluation of solvate numbers of ions in solutions // Izv. of high schools: Chemistry and chemical technology. - 1982. - T.25. - Issue. 12. - С. 1468
 13. Kondrat'ev S.I. Metody vychisleniya harakteristicheskikh polinomov v zadachah upravleniya podvizhnymi ob"ektami. Uchebnoe posobie / S. I. Kondrat'ev, G. A. Zelenkov // Federal'noe gos. obrazovatel'noe uchrezhdenie vyssh. prof. obrazovaniya "Morskaya gos. akad. im. admirala F. F. Ushakova". Novorossiysk, 2007.
 14. Karakaev A.B. Razrabotka metodologii, metodov i modelej analiza vliyaniya razlichnykh variantov postroeniya struktury i rezhimov podderzhaniya i vosstanovleniya rabotosposobnosti sudovykh elektroenergeticheskikh sistem (CHast'2) [Tekst] /A.B. Karakaev, A.V. Lukanin, E.V. Hekert//Ekspluatatsiya morskogo transporta. 2016. № 4 (81). S. 85-95.
 15. Boran-Keshish'yan A.L. Polozheniya teorii interval'nykh srednih, primenitel'no k analizu nadezhnosti tekhnicheskikh sredstv slozhnykh sistem pri nezavisimyykh po nadezhnosti elementah [tekst] / A.L. Boran-Keshish'yan, E.V. Hekert // Ekspluatatsiya morskogo transporta. 2014. № 1 (73). S. 38-42.
 16. Sostoyanie problemy i metody snizheniya vrednykh vybrosov sudovykh energeticheskikh ustanovok / T. A. Makarevich, E. V. Khekert, YU. S. Kuznecova [i dr.] // Ekspluatatsiya morskogo transporta. – 2022. – № 2(103). – S. 127-134.
 17. Sovremennyye trebovaniya v oblasti zagryazneniya vozduшной sredy oksidami sery s sudov / M. A. Modina, E. V. Khekert, A. I. Epihin [i dr.] // Ekspluatatsiya morskogo transporta. – 2021. – № 3(100). – S. 88-91.

УДК 504.3.054: 621.43.068.4

DOI: 10.34046/aumsuomt104/13

ДЕКАРБОНИЗАЦИЯ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ОПТИМИЗАЦИЕЙ ПАРАМЕТРОВ ПОДАЧИ ТОПЛИВА

Г.В. Игнатенко, старший преподаватель

О.В. Sviderskaya, PhD in mechanical engineering (Belarus)

В.А. Туркин, доктор технических наук, профессор

В.А. Матюхина, магистрант

Выполнено моделирование рабочих процессов судового дизельного двигателя MAN D&T серии MC с целью снижения выбросов диоксида углерода с отработавшими газами. Целью моделирования был поиск конструктивных и эксплуатационных решений, влияющих на эмиссию CO₂. При выполнении расчетного исследования использовалась математическая модель комбинированного двигателя внутреннего сгорания, реализованная в компьютерной программе ДИЗЕЛЬ-ПК. В качестве исследуемых переменных приняты степень сжатия, угол опережения и продолжительность впрыска топлива, значения которых можно устанавливать без внесения существенных изменений в конструкцию двигателя. Получена математическая модель в виде уравнения регрессии, описывающая влияние исследуемых параметров на удельный выброс диоксида углерода. Для определения коэффициентов уравнения регрессии реализовано планирование факторного эксперимента второго порядка. Используя полученную математическую модель может быть выполнена многопараметрическая оптимизация значений исследуемых параметров на выбросы CO₂ с отработавшими газами. Показана возможность использования полученной математической модели с целью снижения удельных выбросов диоксида углерода с отработавшими газами судового дизельного двигателя на 32 % за счет выбора оптимального значения степени сжатия.

Ключевые слова: судовой дизельный двигатель, отработавшие газы, диоксид углерода, декарбонизация, параметры подачи топлива, математическая модель

DECARBONIZATION OF EXHAUST GASES OF MARINE DIESEL ENGINES BY OPTIMIZATION OF FUEL SUPPLY PARAMETERS

G.V. Ignatenko, O.V. Sviderskaya, V.A. Turkin, V.A. Matokhina

The simulation of the working processes of the marine diesel engine MAN D&T MC series was carried out in order to reduce carbon dioxide emissions with exhaust gases. The purpose of the simulation was to find design and operational solutions that affect CO₂ emissions. When performing a computational study, a mathematical model of a combined internal combustion engine implemented in the DIESEL-RK computer program was used. The studied variables are the compression ratio, the advance angle and the duration of fuel injection, the values of which can be set without making significant changes to the engine design. A mathematical model has been obtained in the form of a regression equation that describes the influence of the studied parameters on the specific emission of carbon dioxide. To determine the coefficients of the regression equation, the planning of a factorial experiment of the second order is implemented. Using the obtained mathematical model, multi-parameter optimization of the values of the studied parameters for CO₂ emissions with exhaust gases can be performed. The possibility of using the obtained mathematical model to reduce the specific emissions of carbon dioxide with the exhaust gases of a marine diesel engine by 32% by choosing the optimal value of the compression ratio is shown.

Keywords: marine diesel engine, exhaust gases, carbon dioxide, decarbonization, fuel supply parameters, mathematical model

Введение

Ведущие климатологи сходятся во мнении, что климат планеты имеет тенденции к всемирному потеплению. Считается, что причиной подобных изменений является парниковый эффект, состоящий в насыщении нижних слоев атмосферы Земли газами, обладающими прозрачностью в видимом оптическом диапазоне длин волн и имеющими высокую поглощающую способность в среднем и инфракрасном диапазонах [1]. К ним относятся водяной пар H₂O, диоксид углерода (углекислый газ) CO₂, метан CH₄, оксиды азота NO_x и другие. Водяной пар, являющийся основным парниковым газом в атмосфере, обеспечивает более чем 60 % парникового эффекта. Однако конденсация пара, выраженная в образовании облачности, напротив, ведет к экранированию солнечного излучения, тем самым уменьшая общее количество тепловой энергии, достигающей поверхности Земли, то есть приводит к антипарниковому эффекту. В этой связи на первый план выдвигается диоксид углерода CO₂, который является причиной создания до 26 % парникового эффекта [1].

Существуют исследования, свидетельствующие о том, что с момента начала машинной индустриальной цивилизации (1750 г.) концентрация углекислого газа в атмосфере Земли выросла на 46 %, составив 405 ppm, и наблюдаются тенденции ее дальнейшего ускоренного роста. На сегодняшний день главной составляющей антропогенного фактора остается сжигание ископаемого углеводородного топлива, что побуждает правительства стран с развитым уровнем экономики предпринимать меры по сокращению выбросов CO₂ в атмосферу [1, 2, 3].

Морской транспорт несет ответственность за примерно 2,5% мировых выбросов парниковых газов и около 940 миллионов тонн диоксида углерода CO₂ ежегодно [4]. Чтобы снизить выбросы Международная морская организация (ИМО) объявила о Стратегии сокращения выбросов парниковых газов с судов. Цель Стратегии состоит в том, чтобы сократить выбросы CO₂ в среднем по международным морским перевозкам как минимум на 40% к 2030 году, стремясь достичь 70% к 2050 году по сравнению с 2008 годом. Стратегией был введен конструктивный коэффициент энергетической эффективности (ККЭЭ) – (Energy Efficiency Design Index – EEDI) как показатель углеродоемкости судна [5]. EEDI – это индекс, который указывает на энергоэффективность судна и измеряется в граммах CO₂ (генерируемых) на тонно-милю (перевезенный груз), рассчитанная для конкретных исходных условий эксплуатации судна. Снижение индекса EEDI разделено на три этапа: 2015-2019, 2020-2024, 2025 годы и далее. Величина снижения EEDI по сравнению с его исходным значением для указанных этапов составляет соответственно 10%, 20% и 30% [6].

Судоходной отрасли доступны различные решения для повышения энергоэффективности новых судов (другими словами, для снижения индекса EEDI). Самый простой способ уменьшить выбросы, не требующий доработок или вложений, – это снижение скорости. В работе [7] отмечается, что в определенных условиях снижение скорости доставки дает выигрыш в экономии средств, что побуждает применять такие меры. С 2008 года большинство компаний и судовладельцев применяют снижение скорости с целью сокра-

нения выбросов углерода и повышения эффективности судов, что привело к значительному снижению выбросов CO₂ водным транспортом [8, 21].

Целью статьи является анализ возможности сокращения выбросов диоксида углерода судовыми дизельными двигателями оптимизацией параметров подачи топлива для достижения целей генеральной стратегии ИМО.

Постановка задачи

Достижению целей новой стратегии ИМО должно способствовать комплексное решение ряда проблем традиционного и инновационного плана. Получение желаемых результатов предполагает решение следующих вопросов:

- совершенствование логистического обеспечения перевозок;
- дальнейшее решение проблем гидродинамики судна;
- замена используемых видов топлива на альтернативные источники энергии;
- улучшение характеристик энергогенерирующего оборудования и агрегатов систем судовой энергетической установки;
- разработка новых подходов в организации рабочих процессов двигателей, направленных на снижение токсичности отработавших газов [9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 22].

Исходя из того, что объемы выбросов основного парникового газа – диоксида углерода CO₂ напрямую зависят от количества использованного углеводородного топлива, поиск путей повышения топливной экономичности энергетических установок и снижения потребляемых мощностей остается эффективным направлением сокращения выбросов.

В данной статье рассматривается решение последней задачи, а именно организация посредством моделирования рабочих процессов судового дизельного двигателя, направленных на снижение выбросов диоксида углерода с отработавшими газами. В качестве исследуемых переменных были приняты степень сжатия, угол опережения и продолжительность впрыска топлива. Значения этих параметров можно устанавливать без внесения существенных изменений в конструкцию базового двигателя.

При выполнении вычислительного эксперимента использовалась математическая модель комбинированного двигателя внутреннего сгорания (ДВС), реализованная в компьютерной программе ДИЗЕЛЬ-РК [17]. Этапу проведения расчетных исследований предшествовал этап проверки точности математической модели путем сравнения расчетных данных с результатами натурных экспериментов. Использовались данные, полученные на морских судах группы компаний «Совкомфлот», характеризующие эксплуатационные параметры работы малооборотных двигателей компании «MAN Diesel & Turbo» моделей SMC/-C в широком диапазоне изменения нагрузок [17]. Исходные данные для создания проекта средствами программного комплекса ДИЗЕЛЬ-РК приведены в публикации [17].

Сравнение эксплуатационных и расчетных значений концентраций диоксида азота на режимах работы двигателей компании «MAN Diesel & Turbo» моделей SMC/-C, соответствующих 25, 50, 75 и 85 % от полной мощности представлены на рисунке 1.

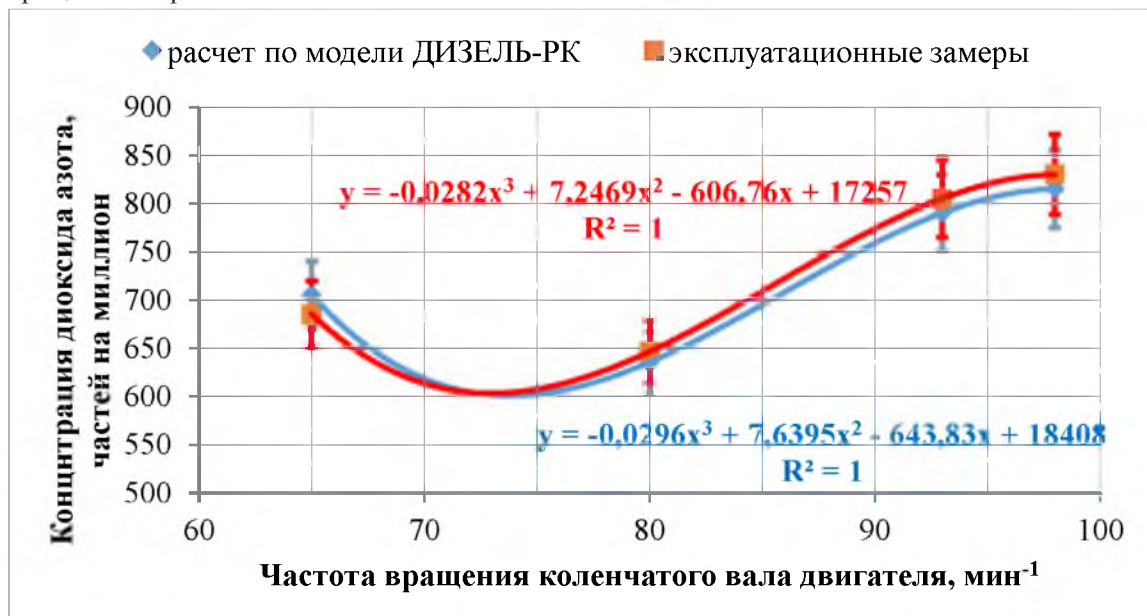


Рисунок 1 – Изменение концентрации NO_x в отработавших газах на разных режимах работы главного дизельного двигателя

Анализ представленных на рисунке 1 зависимостей концентрации диоксида азота NO_x в отработавших газах от частоты вращения коленчатого вала двигателя, построенных на основании эксплуатационных замеров газоанализатором TESTO 350 на судне и полученных по результатам расчётов на модели ДИЗЕЛЬ-РК, показывает в хорошее согласование замеров на судне с расчётом по модели.

Для определения диапазонов изменения исследуемых переменных применялся метод двумерного сканирования, реализованный в программе ДИЗЕЛЬ-РК.

Существенным недостатком методики и программы многопараметрической оптимизации рабочих процессов ДВС, реализованной в программном комплексе ДИЗЕЛЬ-РК, является невозможность решения оптимизационных задач сразу на нескольких режимах работы двигателя.

В программе реализована только возможность последовательного нахождения набора оптимальных параметров для каждого из режимов, что может не привести к требуемому результату. Так, например, оптимальное значение величины степени сжатия может быть различным для каждого из режимов, а этот параметр задается конструктивно и не подлежит изменению при переходе двигателя на другой режим работы.

Для решения оптимизационных задач сразу на нескольких режимах работы двигателя необходимо получить математическую модель в виде уравнения регрессии, описывающую влияние исследуемых параметров на целевую функцию. При этом зависимость удельных выбросов диоксида углерода в отработавших газах от исследуемых факторов носит явно нелинейный характер. Следовательно, для математического описания может быть достаточно уравнения регрессии в виде полинома второго порядка, при условии соответствия его критерию адекватности, для которых гораздо лучше разработаны алгоритмы оптимизации с учетом наличия ограничительных параметров [17].

Для получения уравнения регрессии использовался план полного факторного, методика реализации которого приведена в работе [18].

Математическая модель зависимости удельных выбросов CO_2 от параметров подачи и сгорания топлива

С целью получения математической модели, описывающей влияние степени сжатия, продолжительности впрыска и угла опережения

впрыска топлива двигателя 6S60MC на значение удельных выбросов диоксида углерода в отработавших газах, эксперименты проводились с учетом теории планирования эксперимента [20] по представленному в таблице 1 плану.

Требуемая для решения данной задачи математическая модель имеет следующий вид:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^{k=3} b_i x_i + \sum_{i < j} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^{k=3} b_{ii} x_i^2, \quad (1)$$

где y – значение удельных выбросов диоксида углерода, $\text{г} \cdot (\text{кВт} \cdot \text{час})^{-1}$; x_i, x_j – значения факторов; b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} – значения коэффициентов математической модели.

Для расчета коэффициентов математической модели (1) был реализован полный эксперимент – три фактора на трёх уровнях, то есть эксперимент вида 3^3 .

Для реализации подобного эксперимента необходимо было провести $3^3 = 27$ опытов для трёх независимых факторов z_1, z_2 и z_3 при трех значениях каждого фактора (в безразмерной системе координат это $+1$ – максимальное значение фактора; 0 – среднее значение фактора; -1 – минимальное значение фактора). В качестве независимых были приняты следующие факторы: z_1 – степень сжатия; z_2 – продолжительность впрыска топлива в градусах поворота коленчатого вала ($^\circ$ ПКВ), и z_3 – угол опережения впрыска топлива в градусах поворота коленчатого вала двигателя до верхней мертвой точки ($^\circ$ ПКВ до ВМТ).

Матрица планирования полного факторного эксперимента вида 3^3 , значения факторов в натуральном масштабе и в безразмерной системе координат, а также результаты 27 проведённых опытов и рассчитанные значения исследуемой величины удельные выбросы диоксида углерода с отработавшими газами двигателя) представлены также в таблице 1.

Расчет значений коэффициентов математической модели (1) b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} осуществлялся с использованием следующей зависимости:

$$b_j = \frac{N}{\sum_{i=1}^N x_{ji} y_i} / \frac{N}{\sum_{i=1}^N x_{ji}^2}. \quad (2)$$

Например, расчет значения коэффициента b_1 при x_1 осуществлялся следующим образом:

$$b_1 = \frac{27}{\sum_{i=1}^{27} x_{1i} y_i} / \frac{27}{\sum_{i=1}^{27} x_{1i}^2} = -951/18 = -52,83.$$

Таблица 1 – Матрица планирования и реализация полного факторного эксперимента

№ опыта	Факторы в натуральном масштабе			Факторы в безразмерной системе координат			Исследуемая величина, $\Gamma \cdot (\text{кВт} \cdot \text{час})^{-1}$	
	z_1 , степень сжатия	z_2 , продолжительность впрыска топлива	z_3 , опережение впрыска топлива	x_1	x_2	x_3	из эксперимента	Из уравнения
							y	\hat{y}
1	13	10	7.5	-1	-1	-1	654,11	633,95
2	13	10	12.5	-1	-1	0	633,78	601,39
3	13	10	17.5	-1	-1	+1	632,59	663,45
4	13	15	7.5	-1	0	-1	803,38	868,87
5	13	15	12.5	-1	0	0	668,87	692,52
6	13	15	17.5	-1	0	+1	641,82	610,77
7	13	20	7.5	-1	+1	-1	1295,8	1207,15
8	13	20	12.5	-1	+1	0	811,37	886,99
9	13	20	17.5	-1	+1	+1	684,82	661,45
10	15	10	7.5	0	-1	-1	633,83	626,78
11	15	10	12.5	0	-1	0	616,23	585,93
12	15	10	17.5	0	-1	+1	616,84	639,68
13	15	15	7.5	0	0	-1	721,47	762,85
14	15	15	12.5	0	0	0	642,55	630,80
15	15	15	17.5	0	0	+1	623,35	593,35
16	15	20	7.5	0	+1	-1	1009,2	1002,28
17	15	20	12.5	0	+1	0	751,71	779,03
18	15	20	17.5	0	+1	+1	655,93	650,38
19	17	10	7.5	+1	-1	-1	615,92	637,33
20	17	10	12.5	+1	-1	0	602,15	588,18
21	17	10	17.5	+1	-1	+1	605,08	633,63
22	17	15	7.5	+1	0	-1	681,10	674,55
23	17	15	12.5	+1	0	0	623,03	586,80
24	17	15	17.5	+1	0	+1	608,76	593,65
25	17	20	7.5	+1	+1	-1	814,05	815,13
26	17	20	12.5	+1	+1	0	690,94	688,78
27	17	20	17.5	+1	+1	+1	634,49	657,03
$\sum_{i=1}^{N=27} (y_i - \hat{y}_i)^2$							31410	

Аналогично были определены значения всех остальных коэффициентов математической модели (1), которые получились равными:

$$b'_0 = 18973/27 = 702,7; \quad b_2 = 1738/18 = 96,54; \quad b_3 = -1525/18 = -84,73;$$

$$b_{12} = -555/12 = -46,27; \quad b_{13} = 44,28; \quad b_{23} = -91,21; \quad b_{123} = 421/8 = 52,59;$$

$$b_{11} = 53,28/6 = 8,88; \quad b_{22} = 310,1/6 = 51,68; \quad b_{33} = 283,8/6 = 47,29.$$

Подставив рассчитанные значения коэффициентов в математическую модель (1) получим:

$$y = 702,7 - 52,83x_1 + 96,54x_2 - 84,73x_3 - 46,27x_1x_2 + 44,28x_1x_3 - 91,21x_2x_3 + 52,59x_1x_2x_3 + 8,88(x_1^2 - \bar{x}_1^2) + 51,68(x_2^2 - \bar{x}_2^2) + 47,29(x_3^2 - \bar{x}_3^2) \quad (3)$$

Из (3) после подстановки средних величин квадратов значения факторов в кодированном масштабе $\bar{x}_1^2, \bar{x}_2^2, \bar{x}_3^2$ соответствующих столбцов матрицы, которые оказались равны 2/3, получим окончательный вид математической модели:

$$y = 630,8 - 52,83x_1 + 96,54x_2 - 84,73x_3 - 46,27x_1x_2 + 44,28x_1x_3 - 91,21x_2x_3 + 52,59x_1x_2x_3 + 8,88x_1^2 + 51,68x_2^2 + 47,29x_3^2 \quad (4)$$

Модель позволяет решать задачу поддержания минимального значения концентрации диоксида углерода в отработавших газах оптимизацией значений степени сжатия, продолжительности впрыска и угла опережения впрыска топлива главного судового дизельного двигателя 6S60MC.

В модели (4) значения каждого из трёх независимых факторов должны приниматься в безразмерной системе координат, то есть в интервале значений от минус 1 до плюс 1.

После перехода от безразмерной системе координат к значениям факторов в натуральном масштабе получим следующий вид искомой математической модели:

$$y = 630,8 - 26,42(x_1 - 15) + 16,31(x_2 - 15) - 16,95(x_3 - 12,5) - 4,267(x_1 - 15)(x_2 - 12,5) + 4,428(x_1 - 15)(x_3 - 12,5) - 3,648(x_2 - 15)(x_3 - 12,5) + 1,052(x_1 - 15)(x_2 - 15)(x_3 - 12,5) + 2,22(x_1 - 15)^2 + 2,067(x_2 - 15)^2 + 1,892(x_3 - 12,5)^2 \quad (5)$$

В модели (5) значения факторов должны приниматься в натуральном масштабе, то есть в интервалах значений: для степени сжатия x_1 от 13 до 17; для продолжительность впрыска x_2 от 10 до 20 градусов поворота коленчатого вала; для угла опережения впрыска топлива x_3 от 7,5 до 17,5 градусов поворота коленчатого вала двигателя до верхней мертвой точки.

На рисунке 2 в качестве примера представлена графическая зависимость удельных выбросов диоксида углерода с отработавшими газами

от продолжительности впрыска и угла опережения впрыска топлива при значении степени сжатия 15.

Анализ графической зависимости показывает, что при степени сжатия 15 максимальное значение удельных выбросов диоксида углерода с отработавшими газами, равное $1000 \text{ г} \cdot (\text{кВт} \cdot \text{час})^{-1}$, будет иметь место при продолжительности впрыска 20° ПКВ и угле опережения впрыска топлива $7,5^\circ$ ПКВ до ВМТ.

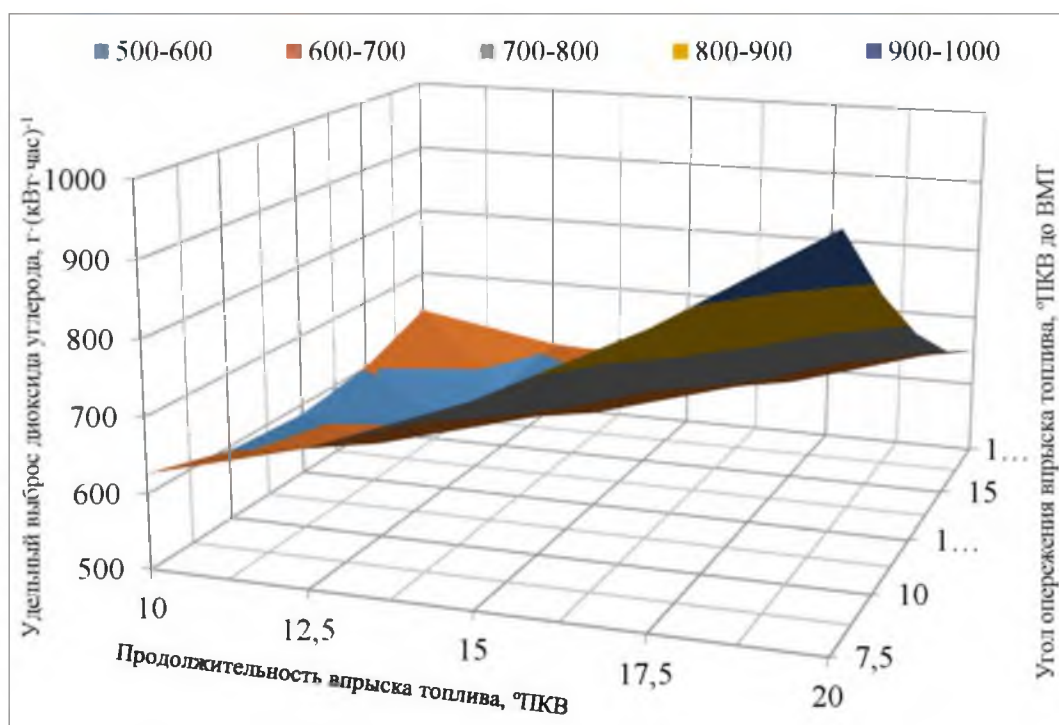


Рисунок 2 – Зависимость удельных выбросов диоксида углерода от продолжительности впрыска и угла опережения впрыска топлива при значении степени сжатия 15

По мере увеличения угла опережения впрыска топлива до $17,5^\circ$ ПКВ до ВМТ значение удельных выбросов диоксида углерода с отработавшими газами, при неизменной величине продолжительности впрыска 20° ПКВ, будет снижаться до $650 \text{ г} \cdot (\text{кВт} \cdot \text{час})^{-1}$. При обычно имеющих место в эксплуатации исследуемого дизельного двигателя величине продолжительности впрыска $12,5^\circ$ ПКВ и угле опережения впрыска топлива $12,5^\circ$ ПКВ до ВМТ значение удельных выбросов диоксида углерода в отработавших газах будет равно $595 \text{ г} \cdot (\text{кВт} \cdot \text{час})^{-1}$. Однако на данном режиме эксплуатации двигателя будет происходить снижение его мощности, что можно допустить

только в случае наличия возможности снизить эксплуатационную скорость судна примерно до 11 узлов.

Из полученной математической зависимости (5) также следует, что при прочих равных условиях эксплуатации исследуемого дизельного двигателя по мере роста степени сжатия с 13 до 17 будет наблюдаться снижение удельных выбросов диоксида углерода с отработавшими газами. Так, например, при степени сжатия 13 максимальное значение удельных выбросов диоксида углерода в отработавших газах, равное $1200 \text{ г} \cdot (\text{кВт} \cdot \text{час})^{-1}$, будет иметь место при продолжительности впрыска 20° ПКВ и угле опережения впрыска топлива $7,5^\circ$

° ПКВ до ВМТ. На этом же режиме работы дизельного двигателя, но при степени сжатия равной 17, значение удельных выбросов CO₂ будет 815 г·(кВт·час)⁻¹. То есть снижение удельных выбросов диоксида углерода произойдет на 32 %.

Заключение

Выполнено моделирование рабочих процессов малооборотного судового дизельного двигателя MAN D&T серии MC с целью снижения выбросов диоксида углерода с отработавшими газами. Целью моделирования был поиск конструктивных и эксплуатационных решений, влияющих на эмиссию CO₂. При выполнении расчетного исследования использовалась математическая модель комбинированного двигателя внутреннего сгорания, реализованная в компьютерной программе ДИЗЕЛЬ-ПК. В качестве исследуемых переменных приняты степень сжатия, угол опережения и продолжительность впрыска топлива, значения которых можно устанавливать без внесения существенных изменений в конструкцию базового двигателя.

Получена математическая модель в виде уравнения регрессии, описывающая влияние исследуемых параметров на целевую функцию – удельный выброс диоксида углерода. Для определения коэффициентов уравнения регрессии реализовано планирование факторного эксперимента второго порядка. Используя полученную математическую модель, может быть выполнена многопараметрическая оптимизация значений исследуемых параметров малооборотного судового дизельного двигателя с целью снижения выбросов с отработавшими газами CO₂ с учетом наличия ограничительных параметров. Анализ полученной математической модели показал, что при эксплуатации исследуемого дизельного двигателя по мере роста степени сжатия с 13 до 17 снижение удельных выбросов диоксида углерода с отработавшими газами произойдет на 32 %.

Литература

1. Живлюк Г. Е. Перспективные технологии водного транспорта для ограничения парникового эффекта / Г.Е. Живлюк, А.П. Петров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова.– 2021.– Т. 13.– № 5. С. 730-743. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-5-730-743.
2. Modina M A, Khekert E V, Voskanian A A, Pismenskaia Yu V, Epikhin A I, Shkoda V V 2021 Bioindication and biomonitoring assessment of the state of atmospheric air and soil in the study area IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 867 012072.

3. Modina M A, Khekert E V, Epikhin A I, Voskanian A A, Shkoda V V, Pismenskaya Yu V 2021 Ways to reduce harmful emissions from the operation of power plants in special environmental control areas IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 867 012104.
4. Stec M, Tatarczuk A, Pluk T, Szul M 2021 Reducing the energy efficiency design index for ships through a post-combustion carbon capture process International Journal of Greenhouse Gas Control 108 103333.
5. Епихин А.П. Концепция экологического совершенствования судовых энергетических установок / А.И. Епихин, М.А. Модина, Е.В. Хекерт // Эксплуатация морского транспорта.– 2020.– № 3 (96).– С. 127-132..
6. Resolution MEPC.203(62) 2011 Amendments to the Annex of the Protocol of 1997 to Amend the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973, As Modified by the Protocol of 1978 Relating Thereto.
7. Chang C C, Wang C M 2014 Evaluating the effects of speed reduce for shipping costs and CO₂ emission *Transportation Research Hfirt D: Transport Environmtnt* **31** pp 110-115.
8. Cariou P 2011 Is slow steaming a sustainable means of reducing CO₂ emissions from container shipping? *Transportation Research Hfirt D: Transport Environmtnt* **16** pp 260-264.
9. Jindal S, Nandwana B P, Rathore N S, Vashistha V 2010 Experimental investigation of the effect of compression ratio and injection pressure in a direct injection diesel engine running on Jatropha methyl ester *Applied Thermal Engineering* **30** pp 442-448.
10. Badami M, Mallamo F, Millo F, Rossi E E 2002 Influence of multiple injection strategy on emissions, combustion noise and BSFC of a DI common rail diesel engine *SAE International SP-1696* pp. 261-272.
11. Zhong L, Sigh I P, Han J, Lai M-C, Henein N A 2003 Effect of cycle-to-cycle variation in the injection pressure in a common rail diesel injection system on engine performance *SAE International SP-1739* pp. 19-28.
12. Sayin C, Ilhan M, Canakci M, Gumus M 2008 Effect of injection timing on the exhaust emissions of a diesel engine using diesel-methanol blends *Renewable Energy*, in press. doi:10.1016/j.renene.2008.10.010.
13. Raheman H, Ghadge S V 2008 Performance of diesel engine with biodiesel at varying compression ratio and ignition timing *Fuel* **87** (12) pp. 2659-2666.
14. Al-Baghdadi M A R S 2004 Effect of compression ratio. Equivalence ratio and engine speed on the performance and emission characteristics of a spark ignition engine using hydrogen as a fuel *Renewable Energy* **29** pp. 2245-2260.

15. Kegl B 2006 Numerical analysis of injection characteristics using biodiesel fuel *Fuel* 85 pp. 2377-2387.
16. Parlak A, Yasar H, Sahin B 2003 Performance and exhaust emission characteristics of a lower compression ratio LHR Diesel engine *Energy Conversion and Management* 44 pp. 163-175.
17. Turkin A V, Turkin V A, Samoilenko A Yu 2018 Ship low-speed engine working processes modeling to reduce the nitrogen oxides emission *Marine intellectual technologies* 1(39) 1 pp.106-110.
18. Ахназарова С.Л., Кафаров В.В. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии. Учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1985. 327 с.
19. Современные требования в области загрязнения воздушной среды оксидами серы с судов / М. А. Модина, Е. В. Хекерт, А. И. Епихин [и др.] // Эксплуатация морского транспорта. – 2021. – № 3(100). – С. 88-91.
20. Состояние проблемы и методы снижения вредных выбросов судовых энергетических установок / Т. А. Макаревич, Е. В. Хекерт, Ю. С. Кузнецова [и др.] // Эксплуатация морского транспорта. – 2022. – № 2(103). – С. 127-134.
21. Современные требования в области загрязнения воздушной среды оксидами серы с судов / М. А. Модина, Е. В. Хекерт, А. И. Епихин [и др.] // Эксплуатация морского транспорта. – 2021. – № 3(100). – С. 88-91.
22. Kondratyev, S. I. Using telematics data to support effective solutions for tracking and monitoring the power system condition of unmanned vessels / S. I. Kondratyev, A. I. Epikhin // Journal of Physics: Conference Series, Novorossiysk, Virtual, 15-16 июня 2021 года. – Novorossiysk, Virtual, 2021.
- process *International Journal of Greenhouse Gas Control* 108 103333.
5. Epikhin A I, Modina M A, Kheckert E V 2020 The concept of environmental improvement of ship power plants *Operation of maritime transport* 3 pp 127-132.
6. Resolution MEPC.203(62) 2011 Amendments to the Annex of the Protocol of 1997 to Amend the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973, As Modified by the Protocol of 1978 Relating Thereto.
7. Chang C C, Wang C M 2014 Evaluating the effects of speed reduce for shipping costs and CO₂ emission *Transportation Research Hfirt D: Transport Environment* 31 pp 110-115.
8. Cariou P 2011 Is slow steaming a sustainable means of reducing CO₂ emissions from container shipping? *Transportation Research Hfirt D: Transport Environment* 16 pp 260-264.
9. Jindal S, Nandwana B P, Rathore N S, Vashistha V 2010 Experimental investigation of the effect of compression ratio and injection pressure in a direct injection diesel engine running on Jatropa methyl ester *Applied Thermal Engineering* 30 pp 442-448.
10. Badami M, Mallamo F, Millo F, Rossi E E 2002 Influence of multiple injection strategy on emissions, combustion noise and BSFC of a DI common rail diesel engine *SAE International SP-1696* pp. 261-272.
11. Zhong L, Sigh I P, Han J, Lai M-C, Henein N A 2003 Effect of cycle-to-cycle variation in the injection pressure in a common rail diesel injection system on engine performance *SAE International SP-1739* pp. 19-28.
12. Sayin C, Ilhan M, Canakci M, Gumus M 2008 Effect of injection timing on the exhaust emissions of a diesel engine using diesel-methanol blends *Renewable Energy*, in press. doi:10.1016/j.renene.2008.10.010.
13. Raheman H, Ghadge S V 2008 Performance of diesel engine with biodiesel at varying compression ratio and ignition timing *Fuel* 87 (12) pp. 2659-2666.
14. Al-Baghdadi M A R S 2004 Effect of compression ratio. Equivalence ratio and engine speed on the performance and emission characteristics of a spark ignition engine using hydrogen as a fuel *Renewable Energy* 29 pp. 2245-2260.
15. Kegl B 2006 Numerical analysis of injection characteristics using biodiesel fuel *Fuel* 85 pp. 2377-2387.
16. Parlak A, Yasar H, Sahin B 2003 Performance and exhaust emission characteristics of a lower compression ratio LHR Diesel engine *Energy Conversion and Management* 44 pp. 163-175.
17. Turkin A V, Turkin V A, Samoilenko A Yu 2018 Ship low-speed engine working processes modeling to reduce the nitrogen oxides emission *Marine intellectual technologies* 1(39) 1 pp.106-110.

References

1. Zhivlyuk G P, Petrov A P 2021 Advanced water transport technologies for limiting the greenhouse effect *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13 5 pp 730-743. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-5-730-743.
2. Modina M A, Khekert E V, Voskanian A A, Pismenskaia Yu V, Epikhin A I, Shkoda V V 2021 Bioindication and biomonitoring assessment of the state of atmospheric air and soil in the study area *IOP Conf Series: Earth and Environmental Science* 867 012072.
3. Modina M A, Kheckert E V, Epikhin A I, Voskanyan A A, Shkoda V V, Pismenskaya Yu V 2021 Ways to reduce harmful emissions from the operation of power plants in special environmental control areas *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 867 012104.
4. Stec M, Tatarczuk A, Iluk T, Szul M 2021 Reducing the energy efficiency design index for ships through a post-combustion carbon capture

18. Akhnazarova S L, Kafarov V V 1985 Experiment optimization methods in chemical technology (Moscow: Mir) 327.
19. Sovremennye trebovaniya v oblasti zagryazneniya vozduшной среды оксидами серы s судов / M. A. Modina, E. V. Hekert, A. I. Epihin [i dr.] // Ekspluatsiya morskogo transporta. – 2021. – № 3(100). – S. 88-91.
20. Sostoyanie problemy i metody snizheniya vrednykh vybrosov sudovykh energeticheskikh ustanovok / T. A. Makarevich, E. V. Hekert, YU. S. Kuznecova [i dr.] // Ekspluatsiya morskogo transporta. – 2022. – № 2(103). – S. 127-134.
21. Sovremennye trebovaniya v oblasti zagryazneniya vozduшной среды оксидами серы s судов / M. A. Modina, E. V. Hekert, A. I. Epihin [i dr.] // Ekspluatsiya morskogo transporta. – 2021. – № 3(100). – S. 88-91.
22. Kondratyev, S. I. Using telematics data to support effective solutions for tracking and monitoring the power system condition of unmanned vessels / S. I. Kondratyev, A. I. Epikhin // Journal of Physics: Conference Series, Novorossiysk, Virtual, 15–16 iyunya 2021 goda. – Novorossiysk, Virtual, 2021. –

УДК 504.3.054: 621.43.068.4

DOI: 10.34046/aumsuomt104/14

АДСОРБЦИОННЫЙ МЕТОД СНИЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА СУДОВЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

Г.В. Игнатенко, старший преподаватель

O.V. Sviderskaya, PhD in mechanical engineering (Belarus)

В.А. Туркин, доктор технических наук, профессор

Рассмотрен способ очистки отработавших газов судового дизельного двигателя от диоксида углерода путем адсорбции, протекающей параллельно с конденсацией водяных паров, образующихся в процессе горения топлива в цилиндре дизеля. Предложена конструкция устройства повышенной эффективности для очистки отработавших газов судового двигателя, принципом работы которого является использование гранулированной шлаковой пемзы в качестве адсорбента для вредных компонентов отработавших газов и озона в качестве окислителя для ускорения процесса очистки. Проведен натурный эксперимент с целью проверки работоспособности устройства и оценки его эффективности при очистке реальных отработавших газов двигателя. Получена математическая модель для оценки влияния объемного расхода отработавших газов двигателя и концентрации озона на входе в установку на эффективность очистки, получаемой в результате использования предложенной установки для адсорбционной очистки отработавших газов от диоксида углерода.

Ключевые слова: судовой двигатель, отработавшие газы, диоксид углерода, извлечение, адсорбция, математическая модель

ADSORPTION METHOD FOR REDUCING CARBON DIOXIDE EMISSIONS FROM MARINE ENGINES

G.V. Ignatenko, O.V. Sviderskaya V.A. Turkin

A method for cleaning the exhaust gases of a marine diesel engine from carbon dioxide by adsorption, which occurs in parallel with the condensation of water vapor formed during the combustion of fuel in a diesel cylinder, is considered. A design of a device of increased efficiency for the purification of exhaust gases of a marine engine is proposed, the principle of which is the use of granulated slag pumice as an adsorbent for harmful components of exhaust gases and ozone as an oxidizing agent to speed up the purification process. A full-scale experiment was carried out in order to test the operability of the device and evaluate its effectiveness in cleaning real engine exhaust gases. A mathematical model has been obtained to assess the effect of the volumetric flow rate of the exhaust gases of the engine and the concentration of ozone at the inlet to the installation on the purification efficiency obtained as a result of using the proposed installation for the adsorption purification of exhaust gases from carbon dioxide.

Keywords: marine engine, exhaust gases, carbon dioxide, extraction, adsorption, mathematical model

Введение

Вступление в силу в 2005 году Приложения 6 «Правила предотвращения загрязнения воздушной среды с судов» к Конвенции МАРПОЛ 73/78 положили начало планомерной работе Международной морской организации (ИМО) по оздоровлению воздушной среды [1]. Повышение качества окружающей среды является важнейшей

составляющей деятельности человека, направленной на использование природных ресурсов [2, 3]. Морской транспорт несет ответственность за примерно 2,5% мировых выбросов парниковых газов и около 940 миллионов тонн диоксида углерода CO₂ ежегодно [4]. Чтобы снизить выбросы ИМО объявила о Стратегии сокращения выбросов парниковых газов с судов. Цель Стратегии состоит в