

7. Gramuzov, E. M. Analiz tekhniko-ekonomicheskikh pokazatelej zashchity korpusnyh konstrukcii sudov ot korrozii / E. M. Gramuzov, A. V. Rod'kina, O. A. Ivanova // Vestnik Volzhskoj gosudarstvennoj akademii vodnogo transporta. – 2019. – № 60. – S. 77-90.
8. Hasui A. Naplavka i napylenie / A. Hasui, O. Morigaki. – M.: Mashinostroenie, 1985. – 239 s.
9. Tribotekhnicheskie nanomaterialy i nadezhnost' sudovyh dizelej / L. B. Leont'ev, N. P. SHapkin, A. G. Toklikishvili [i dr.]. – Vladivostok: Dal'nevostochnyj federal'nyj universitet, 2020. – 277 s. – (Morskaya tekhnika i transport). – ISBN 978-5-7444-4625-3. – EDN TIYMCV.
10. Patent № 2111993 C1 Rossijskaya Federaciya, MPK C09D 5/14, C09D 5/16. Sostav kraski ili osnovy kraski, sposob povysheniya biocidnoj effektivnosti sostava kraski ili osnovy kraski: № 92016449/04: zayavl. 28.03.1991: opubl. 27.05.1998 / A. R. Myurrej.
11. Issledovanie vliyaniya parametrov formirovaniya metallokeramicheskikh pokrytij na tribotekhnicheskie svoystva sopryazheniya / L. B. Leont'ev, N. P. SHapkin, A. L. Leont'ev, A. G. Toklikishvili // Metalloobrabotka. – 2012. – № 2(68). – S. 28-30. – EDN RLEYJJ.
12. Syusyuka, E. N. Fizicheskie osnovy uprochneniya poverhnostej detalej sudovyh tekhnicheskikh sredstv naneseniem nanopokrytij / E. N. Syusyuka, B. P. Bashurov // Eksplyuatsiya morskogo transporta. – 2017. – № 4(85). – S. 94-97. – EDN YRPIMH.
13. Kondratyev, S. I. A diagnostic system of an intelligent component based on Bayesian accurate inference networks / S. I. Kondratyev, A. I. Epikhin, S. O. Malakhov // Journal of Physics: Conference Series, Novosibirsk, 12–14 maya 2021 goda. – Novosibirsk, 2021. – P. 012022. – DOI 10.1088/1742-6596/2032/1/012022. – EDN VGBGQW.
14. Epihin A.I., Hekert E.V., Karakaev A.B., Modina M.A. Osobennosti postroeniya prognosticheskoy nejro-fazzi seti // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2020. № 4-4 (50). S. 13-17.

УДК 504.3.054: 621.43.068.4

DOI: 10.34046/aumsuomt105/27

## СНИЖЕНИЕ ВЫБРОСОВ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА СУДОВЫМИ ДИЗЕЛЬНЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ ОПТИМИЗАЦИЕЙ ПАРАМЕТРОВ ПОДАЧИ И СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА

*Г.В. Игнатенко, старший преподаватель*

*В.А. Туркин, доктор технических наук, профессор*

*О.В. Свидерская, PhD in mechanical engineering (Belarus)*

*В.В. Беляев, аспирант*

*С.С. Зубко, аспирант*

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 CO<sub>2</sub>. При выполнении расчетного исследования использовалась математическая модель комбинированного двигателя внутреннего сгорания, реализованная в компьютерной программе ДИЗЕЛЬ-РК. В качестве исследуемых переменных приняты степень сжатия, угол опережения и продолжительность впрыска топлива, значения которых можно устанавливать без внесения существенных изменений в конструкцию двигателя. Получены математические модели в виде уравнений регрессии, описывающие влияние исследуемых параметров подачи топлива (степень сжатия, угол опережения впрыска топлива и продолжительность впрыска топлива) на целевые функции – удельный выброс диоксида углерода и эффективная мощность дизельного двигателя 6S60MC. Для определения коэффициентов уравнения регрессии реализовано планирование полного факторного эксперимента второго порядка. С целью поиска минимального значения выбросов диоксида углерода, используя метод обобщенного приведенного градиента, решена задача выбора оптимальных значений степени сжатия, продолжительности впрыска топлива и угла опережения впрыска топлива для заданной эффективной мощности судового дизельного двигателя 6S60MC. Показано, что, например, при мощности двигателя 10000 кВт снижение выбросов диоксида углерода за счет оптимизации указанных параметров топливоподачи будет равно 7,37 %.

**Ключевые слова:** судовый дизельный двигатель, отработавшие газы, диоксид углерода, параметры подачи и сжигания топлива, оптимизация

## REDUCING CARBON DIOXIDE EMISSIONS FROM MARINE DIESEL ENGINES BY OPTIMIZING FUEL SUPPLY AND COMBUSTION

*G.V. Ignatenko, V.A. Turkin, O.V. Sviderskaya, V.V. Belyaev, S.S. Zubko*

The simulation of the working processes of the MAN D&T MC series marine diesel engine 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 CO<sub>2</sub> 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. Mathematical models are obtained in the form of regression equations that describe the effect of the studied fuel supply parameters (compression ratio, fuel injection advance angle and fuel injection duration) on the target functions - specific carbon dioxide emission and effective power of the 6S60MC diesel engine. To determine the coefficients of the regression equation, planning of a complete factorial experiment of the second order is implemented. In order to find the minimum value of carbon dioxide emissions using the generalized reduced gradient method, the problem of choosing the optimal values of the compression ratio, fuel injection duration and fuel injection advance angle for a given effective power of a 6S60MC marine diesel engine is solved. It is shown that, for example, with an engine power of 10,000 kW, the reduction in carbon dioxide emissions by optimizing the specified fuel supply parameters will be 7.37%.

**Keywords:** marine diesel engine, exhaust gases, carbon dioxide, decarbonization, fuel supply and combustion parameters, optimization

### Введение

Повышение качества окружающей среды является важнейшей составляющей деятельности человека, направленной на использование природных ресурсов [1, 2]. Морской транспорт несет ответственность за примерно 2,5 % мировых выбросов парниковых газов и около 940 миллионов тонн диоксида углерода CO<sub>2</sub> ежегодно [3]. Чтобы снизить выбросы ИМО объявила о Стратегии сокращения выбросов парниковых газов с судов [4]. Цель Стратегии состоит в том, чтобы сократить выбросы CO<sub>2</sub> 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. EEDI – это индекс, который указывает на энергоэффективность судна и измеряется в граммах CO<sub>2</sub> (генерируемых) на тонну. мили (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% [5].

Рост цен на топливо вынуждает судоходные компании искать такие методы, которые одновременно обеспечивают снижение выбросов оксидов углерода без заметного ухудшения топливной экономичности дизельного двигателя. Среди таких методов заслуживают особого внимания те, которые направлены на совершенствование рабочего процесса путем влияния на термодинамику горения топлива в цилиндре двигателя внутреннего сгорания. Одним из способов влияния на термодинамику горения является корректировка влияющих на экологические характеристики регулируемых параметров при эксплуатации судовых дизельных двигателей. К таким па-

раметрам следует отнести степень сжатия, продолжительность и угол опережения впрыска топлива в цилиндр дизельного двигателя. Влияние продолжительности впрыска топлива [6, 7] и степени сжатия [8, 9] было подробно изучено и изложено во многих научных работах.

В данной статье дается оценка возможности сокращения выбросов диоксида углерода судовыми дизельными двигателями оптимизацией параметров сжигания и подачи топлива (степень сжатия, продолжительность и угол опережения впрыска топлива в цилиндр) для достижения целей генеральной стратегии ИМО по выбросам парниковых газов с судов.

### Постановка задачи

Поиски путей повышения экологических показателей судовых дизельных двигателей ведутся по трем основным направлениям:

- поиск новых видов топлива, при сжигании которых не образуются или образуются в гораздо меньших количествах вредные вещества. К таким топливам относятся водород, нефтяные газы, топлива биологического происхождения [10];

- разработка методов очистки отработавших газов двигателей от вредных веществ. К таким методам относятся методы физической и химической очистки от вредных химических соединений. Примером разработки методов очистки являются результаты исследований преподавателей кафедры «Эксплуатация судовых механических установок» Государственного морского университета им. адм. Ф.Ф. Ушакова [11];

- разработка новых подходов в организации рабочих процессов двигателей, направленных на снижение токсичности отработавших газов [6-9].

В данной публикации 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 пере-

менных 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 ДВС, реализованная в компьютерной программе ДИЗЕЛЬ-РК [12]. 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 [12].

Выполненное авторами сравнение эксплуатационных и расчетных значений параметров на режимах работы, соответствующих 85, 75, 50 и 25 % от полной мощности показало в целом хорошее согласование эксперимента с расчетом [12].

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.

Для решения оптимизационных задач на различных 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 достаточно иметь 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 [12]. Для получения уравнения регрессии использовался план полного факторного эксперимента [13].

#### Математические модели зависимости удельных выбросов CO<sub>2</sub> и мощности двигателя от параметров сгорания и подачи топлива

Анализ результатов моделирования с использованием компьютерной программы ДИЗЕЛЬ-РК показывает, что основным параметром, оказывающим максимальное влияние на значение

удельных выбросов диоксида углерода, является эффективная мощность дизельного двигателя. Следовательно, для решения задачи минимизации выбросов диоксида углерода необходимо также иметь математическую модель зависимости эффективной мощности двигателя от этих же регулируемых параметров двигателя.

Затем можно решить задачу многокритериальной оптимизации указанных выше параметров с целью поиска минимального значения выбросов диоксида углерода для заданной эффективной мощности дизельного двигателя.

С целью получения математической модели, описывающей влияние степени сжатия, продолжительности впрыска топлива и угла опережения впрыска топлива двигателя 6S60MC на значение *удельных выбросов* диоксида углерода с отработавшими газами, эксперименты проводились с учетом теории планирования эксперимента [13].

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, г·(кВт·час)<sup>-1</sup>;  $x_i, x_j$  – значения факторов;  $b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii}$  – значения коэффициентов математической модели.

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

Для реализации подобного эксперимента необходимо было провести 3<sup>3</sup> = 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 факторы:  $z_1$  – степень сжатия;  $z_2$  – продолжительность впрыска топлива в градусах поворота коленчатого вала (° ПКВ), и  $z_3$  – угол опережения впрыска топлива в градусах поворота коленчатого вала двигателя до верхней мертвой точки (° ПКВ до ВМТ).

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

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

С использованием выражения (2), а также приведенного в публикации [14] плана эксперимента были рассчитаны коэффициенты математической модели (1) для оценки выбросов диоксида углерода в зависимости от параметров топливоподачи. Математические модели со значениями факторов в безразмерной системе координат (3) или в натуральном масштабе (4) имеют следующий вид:

$$y = 630,8 - 52,8x_1 + 96,5x_2 - 84,7x_3 - 46,3x_1x_2 + 44,3x_1x_3 - 91,2x_2x_3 + \dots \quad (3)$$

$$+ 52,6x_1x_2x_3 + 8,88x_1^2 + 51,7x_2^2 + 47,3x_3^2$$

$$y = 630,8 - 26,4(z_1 - 15) + 19,3(z_2 - 15) - 16,95(z_3 - 12,5) - 4,63(z_1 - 15)(z_2 - 15) + \dots \quad (4)$$

$$+ 4,43(z_1 - 15)(z_3 - 12,5) - 3,65(z_2 - 15)(z_3 - 12,5) + 1,05(z_1 - 15)(z_2 - 15)(z_3 - 12,5) +$$

$$+ 2,22(z_1 - 15)^2 + 2,07(z_2 - 15)^2 + 1,89(z_3 - 12,5)^2$$

Математические модели (3) и (4) позволяют решать задачу поддержания минимального значения удельного выброса диоксида углерода с отработавшими газами оптимизацией значений степени сжатия, продолжительности впрыска топлива и угла опережения впрыска топлива судового главного дизельного двигателя 6S60MC.

В модели (3) значения факторов должны приниматься в безразмерной системе координат, то есть в интервале значений от минус 1 до плюс 1.

В модели (4) значения факторов должны приниматься в натуральном масштабе, то есть в интервалах значений: для степени сжатия  $z_1$  от 13 до 17; для продолжительности впрыска топлива  $z_2$  от 10 до 20 ° ПКВ; для угла опережения впрыска топлива  $z_3$  от 7,5 до 17,5 ° ПКВ до ВМТ.

С целью проверки адекватности моделей результатам эксперимента был рассчитан критерий Фишера, который оказался равен  $F = 16,0$  [14].

Табличное значение критерия Фишера для значимости  $p = 0,05$  и степеней свободы:

$$f_1 = N - l = 17, \quad f_2 = u - 1 = 3 - 1 = 2,$$

$$F_{1-p}(f_1, f_2) = F_{0,05}(17, 2) = 19,4$$

Так как значение критерия Фишера оказалось меньше его табличного значения, то есть  $F = 16,0 < F_{1-p}(f_1, f_2) = 19,4$ , то математические модели (3) и (4) адекватно описывают результаты эксперимента и могут быть использованы для оценки влияния степени сжатия, продолжительности впрыска топлива и угла опережения впрыска топлива двигателя 6S60MC на значение выбросов диоксида углерода с отработавшими газами.

С целью получения математической модели для расчета мощности судового дизельного двигателя 6S60MC в зависимости от тех же параметров сжигания и подачи топлива был реализован полный факторный эксперимент типа  $3^3$ , матрица которого представлена в таблице 1. С использованием зависимости (2), а также представленного в таблице 1 плана эксперимента были рассчитаны коэффициенты математической модели (1) для оценки мощности двигателя в зависимости от параметров сжигания и подачи топлива.

Таблица 1 – Матрица планирования и реализация полного факторного эксперимента

№ опыта	Факторы в натуральном масштабе			Факторы в безразмерной системе координат			Мощность двигателя, кВт	
	$z_1$ , степень сжатия	$z_2$ , продолжительность впрыска	$z_3$ , угол опережения впрыска топлива	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$y$ из эксперимента	$\hat{y}$ из модели
1	13	10	7,5	-1	-1	-1	12596	12626
2	13	10	12,5	-1	-1	0	13166	13424
3	13	10	17,5	-1	-1	+1	13236	13131
4	13	15	7,5	-1	0	-1	9735,8	9725,8
5	13	15	12,5	-1	0	0	12329	11993
6	13	15	17,5	-1	0	+1	13012	13170
7	13	20	7,5	-1	+1	-1	5546,1	5705,8
8	13	20	12,5	-1	+1	0	9737,8	9442,8
9	13	20	17,5	-1	+1	+1	11948	12089
10	15	10	7,5	0	-1	-1	13093	13021
11	15	10	12,5	0	-1	0	13649	13805
12	15	10	17,5	0	-1	+1	13657	13499
13	15	15	7,5	0	0	-1	11094	10861
14	15	15	12,5	0	0	0	12884	12762
15	15	15	17,5	0	0	+1	13429	13573
16	15	20	7,5	0	+1	-1	7287,6	7581,0

17	15	20	12,5	0	+1	0	10585	10599
18	15	20	17,5	0	+1	+1	12552	12527
19	17	10	7,5	+1	-1	-1	13439	13343
20	17	10	12,5	+1	-1	0	13980	14114
21	17	10	17,5	+1	-1	+1	13943	13794
22	17	15	7,5	+1	0	-1	11805	11923
23	17	15	12,5	+1	0	0	13295	13458
24	17	15	17,5	+1	0	+1	13785	13903
25	17	20	7,5	+1	+1	-1	9574,4	9383,3
26	17	20	12,5	+1	+1	0	11656	11683
27	17	20	17,5	+1	+1	+1	13018	12892
$\sum_{i=1}^{N=27} (y_i - \hat{y}_i)^2$							<b>737002</b>	

Подставив в (1) значения коэффициентов и средние величины квадратов значения факторов  $\bar{x}_1^2, \bar{x}_2^2, \bar{x}_3^3$  получим окончательный вид математической модели для расчета мощности судового дизельного двигателя 6S60MC со значениями факторов в безразмерной системе координат (5) или в натуральном масштабе (6):

$$y = 12762 + 733x_1 - 1603x_2 + 1356x_3 + 388x_1x_2 - 366x_1x_3 + 1117x_2x_3 - 353x_1x_2x_3 - 36,6x_1^2 - 560x_2^2 - 545x_3^2 \tag{5}$$

$$y = 12762 + 366(z_1 - 15) - 321(z_2 - 15) + 271(z_3 - 12,5) + 38,8(z_1 - 15)(z_2 - 15) - 36,5(z_1 - 15)(z_3 - 12,5) + 44,7(z_2 - 15)(z_3 - 12,5) - 7,06(z_1 - 15)(z_2 - 15)(z_3 - 12,5) - 9,16(z_1 - 15)^2 - 22,4(z_2 - 15)^2 - 21,8(z_3 - 12,5)^2 \tag{6}$$

В модели (5) значения факторов должны приниматься в безразмерной системе координат, то есть в интервале значений от минус 1 до плюс 1.

В модели (6) значения факторов должны приниматься в натуральном масштабе, то есть в интервалах значений: для степени сжатия  $z_1$  от 13 до 17; для продолжительности впрыска топлива  $z_2$  от 10 до 20 ° ПКВ; для угла опережения впрыска топлива  $z_3$  от 7,5 до 17,5 ° ПКВ до ВМТ.

Для определения дисперсии воспроизводимости, знание которой необходимо для проверки адекватности полученных математических моделей результатам эксперимента, в центре плана были поставлено три опыта:

$$y_1^0 = 12864; y_2^0 = 12884; y_3^0 = 12931; \bar{y}^0 = \sum_{u=1}^3 y_u^0 / 3 = 12893;$$

$$s_{\text{воспр}}^2 = \sum_{u=1}^3 (y_u^0 - \bar{y}^0)^2 / (u - 1) = 4732 / 2 = 2366$$

Адекватность полученных моделей (5) и (6) результатам эксперимента проверяется с использованием критерия Фишера:

$$F = s_{\text{ост}}^2 / s_{\text{воспр}}^2, \text{ здесь}$$

$$s_{\text{ост}}^2 = \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 / (N - l) = 737002 / 17 = 43353$$

где  $l$  – число значимых коэффициентов в модели, равное 10.

$$\text{Тогда } F = 43353 / 2366 = 18,3.$$

Табулированное значение критерия Фишера для уровня значимости  $p=0,05$ , и степеней свободы

$$f_1 = 17, f_2 = 2, F_{1-p}(f_1, f_2) = 19,4.$$

Так как  $F = 18,3 < F_{1-p}(f_1, f_2) = 19,4$ , то модели (5) и (6) адекватно описывают результаты эксперимента и могут быть использованы для расчета мощности двигателя 6S60MC в зависимости от значений степени сжатия, продолжительности впрыска и угла опережения впрыска топлива.

**Минимизация выбросов диоксида углерода оптимизацией параметров сжигания и подачи топлива**

Математическая модель (3) совместно с моделью (5) позволяет решать задачу поддержания для заданной эффективной мощности дизельного двигателя минимального значения удельных выбросов диоксида углерода с отработавшими газами оптимизацией значений степени сжатия, продолжительности впрыска топлива и угла опережения впрыска топлива двигателя 6S60MC.

Решение задачи оптимизации указанных выше параметров осуществлялось с использованием метода обобщенного приведенного градиента [15], реализованного в программном пакете Microsoft Excel с использованием надстройки «Поиск решений» [16]. В диалоговом окне «Параметры поиска решения», были установлены параметры: в поле «Оптимизировать целевую функцию» указан адрес ячейки со значением целевой

функции (3); выбрано нахождение минимума целевой функции; в поле «Изменяя ячейки переменных» указаны адреса ячеек со значениями переменных  $x_1, x_2, x_3$ ; указано «Поиск решения нелинейных задач методом обобщенного приведенного градиента – ОПГ».

Затем в диалоговое окно «Параметры поиска решения» вводятся ограничения на переменные  $-1 \leq x_1 \leq 1$ ;  $-1 \leq x_2 \leq 1$ ;  $-1 \leq x_3 \leq 1$ , а также ограничение (5) на эффективную мощность двигателя  $N_e$ . Для рассматриваемого примера эффективная мощность принята равной 10000 кВт. То

есть в математическую модель 5 вместо  $u$  подставляется число 10000. После нажатия кнопки «Найти решение» на экране компьютера отобразится окно «Результаты поиска решения».

Решение задачи оптимизации степени сжатия, продолжительности впрыска топлива и угла опережения впрыска топлива судового дизельного двигателя 6S60MC для различных значений эффективной мощности двигателя с целью получения минимальных значений удельных выбросов диоксида углерода представлено в таблице 2.

Таблица 2 – Решение задачи минимизации выбросов  $CO_2$

Мощность двигателя, $N_e$ , кВт	степень сжатия	Оптимальные значения параметров двигателя		Выброс диоксида углерода, г/(кВт·час) <sup>-1</sup>
		продолжительность впрыска топлива, ° ПКВ	угол опережения впрыска топлива, ° ПКВ до ВМТ	
6000	13,390	20,0	7,5	1174,3
7000	14,372	20,0	7,5	1064,7
8000	15,458	20,0	7,5	957,87
9000	16,568	20,0	7,5	854,11
10000	17,0	19,32	7,877	777,44
11000	17,0	18,408	8,901	717,67
12000	17,0	17,321	10,094	660,36
Используемые в эксплуатации значения параметров двигателя				
10000	13,0	20,0	13,4	839,34

В этой же таблице в последней строке показано значение выбросов  $CO_2 = 839,34$  г/(кВт·час) при обычно используемых в эксплуатации значениях рассматриваемых параметров двигателя 6S60MC.

Из приведенного примера решения данной задачи следует, что снижение выбросов диоксида углерода за счет оптимизации степени сжатия, продолжительности впрыска топлива и угла опережения впрыска топлива, например, при эффективной мощности двигателя, равной 10000 кВт, будет:

$$\delta CO_2 = 100 \cdot (839,34 - 777,44) / 839,34 = 7,37 \%$$

#### 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  $CO_2$ . При выполнении расчетного исследования использовалась математическая модель комбинированного двигателя внутреннего сгорания, реализованная в компьютерной программе ДИЗЕЛЬ-РК. 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.

Получены математические модели в виде уравнений регрессии второй степени, описывающая влияние исследуемых параметров на целевые функции – удельный выброс диоксида углерода и эффективная мощность судового дизельного двигателя 6S60MC. Для определения коэффициентов уравнения регрессии реализовано планирование полного факторного эксперимента второго порядка.

С целью поиска минимального значения выбросов диоксида углерода используя метод обобщенного приведенного градиента решена задача выбора оптимальных значений степени сжатия, продолжительности впрыска топлива и угла опережения впрыска топлива для заданной эффективной мощности судового дизельного двигателя 6S60MC. Показано, что, например, при мощности двигателя 10000 кВт *снижение выбросов диоксида углерода за счет оптимизации указанных параметров топливоподачи* будет равно 7,37 %.

#### Литература

1. 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.

2. 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.
3. Stec M., Tatarczuk A., Iluk 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.
4. Епихин А.И. Концепция экологического совершенствования судовых энергетических установок / А.И. Епихин, М.А. Модина, Е.В. Хекерт // Эксплуатация морского транспорта. 2020. № 3 (96). С. 127-132.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. Kegl B. 2006. **Numerical analysis of injection characteristics using biodiesel fuel** *Fuel* **85** pp. 2377-2387.
10. Privalov V.E., Turkin V.A., Shemanin V.G. Hydrogen Power Capabilities in Water Transport. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. 872. 012014.
11. Turkin V.A., Pismenskaya Yu.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. 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.
13. 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.
14. Игнатенко Г.В. Декарбонизация отработавших газов судовых дизельных двигателей оптимизацией параметров подачи топлива / Г.В. Игнатенко, О.В. Свидерская, В.А. Туркин // Эксплуатация морского транспорта.– 2022.– № 3 (104).– С. 85-93.

15. Sharma R., Glemmestad B. On Generalized Reduced Gradient method with multi-start and self-optimizing control structure for gas lift allocation optimization. *Journal of Process Control*. 2013. 23. Pp. 1129-1140.
16. Шадрина Н.И. Решение задач оптимизации в Microsoft Excel 2010 / Н.И. Шадрина, Н.Д. Берман. Хабаровск: Изд-во Тихоокеанского гос. ун-та, 2016. 101 с.

## References

1. 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.
2. 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.
3. Stec M., Tatarczuk A., Iluk 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. Kegl B. 2006. Numerical analysis of injection characteristics using biodiesel fuel *Fuel* **85** pp. 2377-2387.
10. Privalov V.E., Turkin V.A., Shemanin V.G. Hydrogen Power Capabilities in Water Transport. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. 872. 012014.

11. Turkin V.A., Pismenskaya Yu.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. 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.
13. Akhnazarova S.L., Kafarov V.V. 1985. Experiment optimization methods in chemical technology (Moscow: Mir) 327.
14. Ignatenko G.V., Sviderskaya O.V., Turkin V.A. 2022. Decarbonization of exhaust gases of marine diesel engines by optimization of fuel supply parameters *Operation of maritime transport* **3(104)** pp 85-93.
15. Sharma R., Glemmestad B. On Generalized Reduced Gradient method with multi-start and self-optimizing control structure for gas lift allocation optimization. *Journal of Process Control*. 2013. 23. Pp. 1129-1140.
16. Shadrina N.I., Berman N.D. 2016. Solving optimization problems in Microsoft Excel 2010. Khabarovsk. Publishing House of the Pacific State University. 101 p.

УДК 504.3.054: 621.43.068.4

DOI: 10.34046/aumsuomt105/28

## СУДОВАЯ СИСТЕМА ОЧИСТКИ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ДВИГАТЕЛЕЙ ОТ ОКСИДОВ УГЛЕРОДА, СЕРЫ И АЗОТА

*Г.В. Игнатенко, старший преподаватель*

*В.А. Туркин, доктор технических наук, профессор*

*В.В. Беляев, аспирант*

*О.В. Сviderskaya, PhD in mechanical engineering (Belarus)*

*С.С. Зубко, аспирант*

Для очистки отработавших газов двигателей от оксидов углерода, азота и серы предложены способ и устройство, принцип действия которого основан на том, что отработавшие газы проходят через абсорбер, где они очищаются от оксидов азота и серы, а затем через адсорбционные секции, заполненные гранулами шлаковой пемзы и очищаются от оксидов углерода в результате их адсорбции. Диоксид углерода, взаимодействуя с частицами воды в порах гранул, образует угольную кислоту. Затем разбавленный конденсат угольной кислоты после очистки в сепараторе от твердых примесей сбрасывается за борт судна. Предложен состав судовой системы непрерывного лазерного мониторинга и управления выбросами оксидов углерода, азота и серы, содержащихся в отработавших газы двигателей, посредством настройки их регулировочных параметров, а также использования устройства для комплексной очистки отработавших газов. Разработан алгоритм решения задачи выполнения требований правила 20 «Достижимый ККЭЭ» приложения VI Конвенции МАРПОЛ 73/78 по выбросам оксидов углерода. Реализация предложенного алгоритма возможна в использовании системы очистки продуктов сгорания от вредных оксидов.

**Ключевые слова:** двигатель, отработавшие газы, оксиды углерода, азота и серы, устройство для комплексной очистки, судовая система

## SHIP SYSTEM FOR CLEANING ENGINE EXHAUST GASES FROM CARBON, SULFUR AND NITROGEN OXIDES

*G.V. Ignatenko, V.A. Turkin, V.V. Belyaev, O.V. Sviderskaya, S.S. Zubko*

To clean the exhaust gases of engines from carbon, nitrogen and sulfur oxides, a method and device are proposed, the principle of which is based on the fact that the exhaust gases pass through an absorber, where they are cleaned of nitrogen and sulfur oxides, and then through adsorption sections filled with granules of slag pumice and are purified from carbon oxides as a result of their adsorption. Carbon dioxide, interacting with water particles in the pores of the granules, forms carbonic acid. Then the diluted carbonic acid condensate after cleaning in the separator from solid impurities is discharged overboard. The composition of a shipboard system for continuous laser monitoring and control of emissions of carbon, nitrogen and sulfur oxides contained in the exhaust gases of engines by adjusting their adjustment parameters, as well as using a device for complex exhaust gas purification, is proposed. An algorithm for solving the problem of fulfilling the requirements of regulation 20 "Achievable EEDI" of Appendix VI of the MARPOL 73/78 Convention on carbon oxide emissions has been developed. The implementation of the proposed algorithm is possible using a system for cleaning combustion products from harmful oxides.

**Keywords:** engine, exhaust gases, oxides of carbon, nitrogen and sulfur, complex cleaning device, ship system

### Введение

Планета Земля пригодна для жизни уже в течение 4 млрд. лет, что свидетельствует о сравнительно малых изменениях температуры на ее

поверхности. Это значит, что приток энергии всегда был равен ее расходу. Но в последние десятилетия на энергетический баланс планеты оказы-