

УДК 629.5.06:621.43.053

## УПРАВЛЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬЮ И ВЫБРОСАМИ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ РЕГУЛИРОВКОЙ ПАРАМЕТРОВ ТОПЛИВОПОДАЧИ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

**Краевой Алексей Игоревич<sup>1</sup>**, аспирант

*e-mail:* [kraevoy@mail.ru](mailto:kraevoy@mail.ru)

**Туркин Владимир Антонович<sup>1</sup>**, профессор, доктор технических наук

*e-mail:* [turvla@mail.ru](mailto:turvla@mail.ru)

<sup>1</sup> Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, Новороссийск, Россия

**Аннотация.** В данной статье предлагается новая система поддержки принятия решений для управления энергоэффективностью судов, в которой объединены инструмент моделирования двигателя 6S60ME с использованием компьютерной программы ДИЗЕЛЬ-РК, и интеллектуальная модель, осуществляющая поиск минимального значения выбросов CO<sub>2</sub> решением задачи оптимизации параметров топливоподачи двигателя. При назначении оптимальных параметров топливоподачи расход топлива снизится на 8,9%, что приведет к снижению затрат на топливо в 208 тыс. руб./сутки.

**Ключевые слова:** судно, дизельный двигатель, CO<sub>2</sub>, мощность, топливо, параметры топливоподачи, оптимизация.

## MANAGEMENT OF ENERGY EFFICIENCY AND EMISSIONS OF HARMFUL SUBSTANCES BY ADJUSTING FUEL SUPPLY PARAMETERS OF MARINE DIESEL ENGINES

**Kraevoy Alexey Igorevich<sup>1</sup>**, Doctoral Student

*e-mail:* [kraevoy@mail.ru](mailto:kraevoy@mail.ru)

**Turkin Vladimir Antonovich<sup>1</sup>**, Professor, Doctor of Technical Sciences

*e-mail:* [turvla@mail.ru](mailto:turvla@mail.ru)

<sup>1</sup> Admiral Ushakov Maritime State University, Novorossiysk, Russia

**Abstract.** This article proposes a new decision support system for managing the energy efficiency of ships, which combines a 6S60ME engine modeling tool using the DIESEL-RK computer program, and an intelligent model that searches for the minimum value of CO<sub>2</sub> emissions by solving the problem of optimizing engine fuel supply parameters. When assigning optimal fuel supply parameters, fuel consumption will decrease by 8,9%, which will lead to a reduction in fuel costs of 208 thousand rubles/day.

**Keywords:** ship, diesel engine, CO<sub>2</sub>, power, fuel, fuel supply parameters, optimization.

В связи с ужесточением требований Международной морской организации к выбросам вредных веществ в последние годы управление энергоэффективностью судов стало критически важной мерой [1, 2]. Более того, стоимость судового топлива, составляющая не менее 50% эксплуатационных расходов судна, является еще одной причиной растущего внимания к управлению энергоэффективностью судоходства [3].

Ограничения, связанные с энергоэффективностью, коснулись технических и эксплуатационных показателей судов и их энергетических установок. После принятия первоначальной стратегии ИМО по декарбонизации вновь построенных судов измерения энергоэффективности были распространены и на суда, находящиеся в эксплуатации [4].

Для выполнения требований ИМО необходимо снизить количество энергии и потребляемого топлива, необходимых для эксплуатации судна [5].

С точки зрения проектирования рассматривались внедрение возобновляемых источников энергии [6], использование альтернативного топлива [7], проектирование электрической силовой установки [8], а с точки зрения эксплуатации судовых энергетических установок были оптимизация энергетических систем [9], внедрение системы рекуперации отходящего тепла [10].

Из всех методов повышения энергоэффективности расход топлива на дизельные двигатели в наибольшей степени влияет на величину индексов, предложенных ИМО, поэтому многие исследователи были заинтересованы в повышении эффективности этого элемента судовой энергетической установки, чтобы она соответствовала ограничениям действующих правил [4].

Производительность двигателей оценивалась с использованием инструментов физического моделирования, основанных на процедурах многокритериальной оптимизации с целью минимизации расхода топлива и выбросов вредных веществ.

Также для повышения энергоэффективности судов исследователями использовались интеллектуальные методы оценки расхода топлива и выбросов в соответствии с собранными при эксплуатации двигателей данными [11].

В данной статье предлагается новая система поддержки принятия решений для управления энергоэффективностью судов, в которой объединены инструмент моделирования двигателя 6S60ME с использованием компьютерной программы ДИЗЕЛЬ-РК, и интеллектуальная модель, осуществляющая поиск минимального значения выбросов CO<sub>2</sub> решением задачи оптимизации параметров топливоподачи двигателя.

Решение задачи управления энергоэффективностью и выбросами вредных веществ регулировкой параметров топливоподачи судовых дизельных двигателей осуществлялось моделированием процесса сгорания топлива двигателя 6S60ME компьютерной программой ДИЗЕЛЬ-РК.

Оптимизация параметров топливоподачи двигателя 6S60ME осуществлялась с использованием полученных авторами и приведенных в работе [12] следующих математических моделей:

а) зависимость выбросов CO<sub>2</sub> от параметров подачи топлива:

$$y = 630,8 - 52,83x_1 + 96,54x_2 - 84,73x_3 - 46,27x_1x_2 + 44,28x_1x_3 - 91,21x_2x_3 + 52,59x_1x_2x_3 + 8,88x_1^2 + 51,68x_2^2 + 47,29x_3^2 \quad (1)$$

б) зависимость мощности двигателя 6S60ME от тех же параметров:

$$y = 12762 + 732,7x_1 - 1603x_2 + 1356x_3 + 387,7x_1x_2 - 365,9x_1x_3 + 1117x_2x_3 - 352,8x_1x_2x_3 - 36,62x_1^2 - 559,7x_2^2 - 545,2x_3^2. \quad (2)$$

В приведенных уравнениях (1) и (2) приняты следующие обозначения:  $y$  – выброс CO<sub>2</sub> г/(кВт·час) в выражении (1) или мощность двигателя, кВт в (2);  $x_1, x_2, x_3$  – степень сжатия, продолжительность впрыска; угол опережения впрыска топлива. Выражения (1) и (2) записаны для безразмерной системы координат ( $x_1, x_2, x_3$  изменяются от + 1 до – 1). В



натуральной системе координат факторы изменяются: степень сжатия от 13 до 17; продолжительность впрыска от 10 до 20 ° ПКВ, угол опережения впрыска топлива от 7,5 до 17,5 ° ПКВ до ВМТ.

Поиск оптимальных значений параметров подачи топлива осуществлялся методом обобщенного приведенного градиента (ОПГ). Алгоритм ОПГ, использующий лестничную структуру якобиевой матрицы динамических уравнений путем использования некоторых принципов приоритета при разделении переменных на базовые и независимые наборы для каждого периода времени, когда требуется повторное преобразование. Факторизованные представления базовой матрицы облегчают решение линейных систем уравнений в различных частях алгоритма. Гауссово исключение (LU-разложение) диагональных блоков главного фактора представления улучшает численную устойчивость этих процессов. В пространстве уменьшенной размерности ограниченных независимых переменных имеем неограниченную дифференцируемую нелинейную целевую функцию. Направления поиска могут быть вычислены с помощью адаптированных методов неограниченной оптимизации с ограничением памяти в виде сопряженных градиентов. Если доступен некоторый объем дополнительной памяти, методы ограниченной памяти обеспечивают более высокие скорости сходимости. Эти альтернативные направления поиска улучшают сходимость алгоритма. Временные задержки в нелинейных динамических уравнениях учитываются с помощью некоторых конкретных методов разреженной матрицы, не влияя на основную стратегию алгоритма [13].

На рисунке показано диалоговое окно поиска минимального значения выброса CO<sub>2</sub> с указанием исходных данных и ограничений для решения задачи оптимизации в Microsoft Excel.

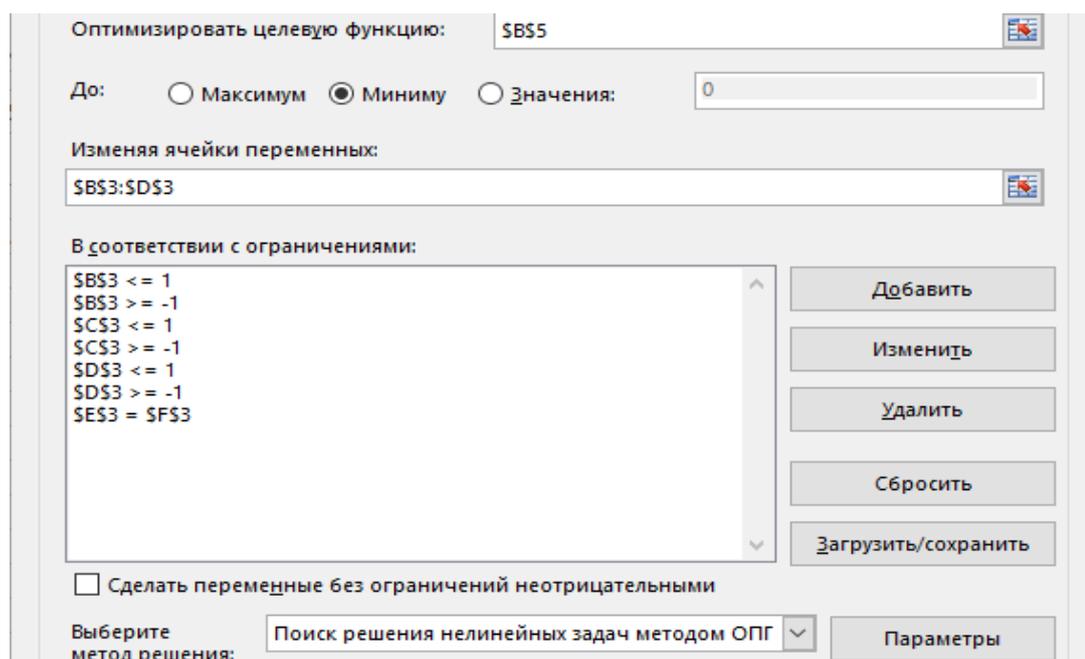


Рисунок 1 – Диалоговое окно поиска минимального значения выброса CO<sub>2</sub> с указанием исходных данных и ограничений

В ячейку B5 записывается зависимость (1). В ячейки B3, C3 и D3 вводятся ограничения на параметры подачи топлива. В ячейку F3 записывается ограничение по заданной мощности двигателя (2).

Результаты оптимизации для различных мощностей двигателя 6S60ME показаны в таблице.

Таблица 1

### Минимальные выбросы CO<sub>2</sub> в зависимости от параметров топливоподачи

Мощность двигателя, кВт	Оптимальные параметры			Выброс CO <sub>2</sub> , г/(кВт·час)
	степень сжатия	продолжительность впрыска, ° ПКВ	опережение впрыска, ° ПКВ до ВМТ	
9000	13	10	9,1	1109
9500	13	10	15,3	896
10000	13	11,8	17,5	791
10500	13	14,4	17,5	751
11000	13,2	15,1	17,5	717
11500	13,6	15,3	17,5	684
12000	14	15,6	17,5	6523
Рекомендуемые судовладельцем параметры				
10000	13	14,5	12,5	869

Из таблицы следует, что при мощности двигателя 1000 кВт при рекомендуемых судовладельцем параметрах топливоподачи выброс CO<sub>2</sub> будет равен 869 г/(кВт·час), а при оптимальных – 791 г/(кВт·час).

Следовательно, снижение выбросов CO<sub>2</sub> за счет оптимизации равно:

$$\delta CO_2 = 100 \cdot (869 - 791) / 869 = 8,9 \%$$

Между расходом топлива и выбросом CO<sub>2</sub> существует прямо пропорциональная зависимость. Следовательно, расход топлива вследствие оптимизации также снизится на 8,9 %.

У двигателя 6S60ME при мощности 10000 кВт расход топлива составляет 0,243 кг/(кВт·час).

Тогда суточный расход топлива составит:

$$B = 0,243 \cdot 10000 \cdot 24 = 58320 \text{ кг/сутки.}$$

Следовательно, назначение оптимальных значений параметров топливоподачи приведет к снижению расхода топлива:

$$\delta B = 58320 \cdot 0,089 = 5190 \text{ кг/сутки} = 5,19 \text{ тонны/сутки.}$$

Тогда при стоимости топлива 500 долларов США за тонну экономический эффект составит:

$$\delta C = 5,19 \cdot 500 = 2595 \text{ долларов/сутки} = 208 \text{ тысяч рублей/сутки.}$$

#### Список литературы:

- Ma L., Yang P., Gao D. A multi-objective energy efficiency optimization method of ship under different sea conditions. Ocean Engineering. 2023. 290. 116337.
- IMO, 2012. 2012 Guidelines for the Development of a Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP). IMO.
- Bialystocki, N., Konovessis, D., 2016. On the estimation of ship's fuel consumption and speed curve: a statistical approach. J. Ocean Eng. Sci. 1 (2), 157 – 166.
- Karatug C., Tadros M., Ventura M. Decision support system for ship energy efficiency management based on an optimization model. Energy. 2024. 292. 130318.
- Tadros M., Ventura M., Guedes Soares C. Review of current regulations, available technologies, and future trends in the green shipping industry. Ocean Eng. 2023. 280. 114670.
- Karatug C., Durmusoglu Y. Design of a solar photovoltaic system for a Ro-Ro ship and estimation of performance analysis: a case study. Sol Energy. 2020. 207. 1259-1268.



7. Ejder E., Arslanoglu Y. Evaluation of ammonia fueled engine for a bulk carrier in marine decarbonization pathways. *J Clean Prod.* 2022. 379. 134688.
8. Ritari A., Huotari J., Halme J. Hybrid electric topology for short sea ships with high auxiliary power availability requirement. *Energy.* 2020. 190. 116359.
9. Du W., Li Y., Shi J. Applying an improved particle swarm optimization algorithm to ship energy saving. *Energy.* 2023. 263. 126080.
10. Konur O., Yuksel O., Aykut Korkmaz S. Operation-dependent exergetic sustainability assessment and environmental analysis on a large tanker ship utilizing Organic Rankine cycle system. *Energy.* 2023. 262. 125477.
11. Fan A., Yang J., Yang L. A review of ship fuel consumption models. *Ocean Eng.* 2022. 264. 112405.
12. Туркин В.А. Управление параметрами топливоподачи с целью снижение выбросов диоксида углерода судовыми дизельными двигателями / В.А. Туркин, Г.В. Игнатенко, В.В. Беляев, С.С. Зубко // *Морские интеллектуальные технологии.* – 2022. – № 4. – Т. 1. – С. 106 – 112.
13. Faco J. L. D. A generalized reduced gradient algorithm for solving large-scale discrete-time nonlinear optimal control problems. *Control Applications of Nonlinear Programming and Optimization.* Paris, France. 1989.

