

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-765-774

CLASSIFICATION OF MODERN METHODS FOR IMPROVING THE WORKING PROCESS OF MARINE DIESEL ENGINE

P. A. Erofeev¹, V. A. Zhukov², S. G. Chernyi^{1,2}

¹ — Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Russian Federation

² — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

An analytical review of the main methods for improving the working process of marine diesel engines, with a method for their systematization and grouping is provided in the paper. The issue of modern methods and ways of improving the criteria for environmental friendliness, economy and energy efficiency of a diesel engine as the main ship power plant, taking into account the requirements of the MARPOL 73/78 convention, as well as compliance with the Register rules, has been studied. Based on the analysis performed, a block diagram of methods for improving the working process of a marine diesel engine is presented. The proposed block diagram makes it possible for the user to easily select the method of interest for modernizing the operation of the ship power plant, with its further detailed study. The object of scientific research is methods of improving the working process of marine diesel engines. The purpose of the research is: analysis of both basic and modern methods of modernization of the working process of the marine diesel engine, with the further possibility of their systematization and grouping in the form of a structural diagram; implementation of the collected and analyzed information in the form of the structural diagram of methods for modernizing the working process of the marine diesel engine. The research of both modern approaches and basic methods of modernization of the working process of the marine diesel engine is carried out by an analytical method followed by implementation into the block-diagram. A block diagram of the classification of modern methods for improving the working process of marine diesel engines is obtained. The results obtained allow us to conclude that the proposed block diagram makes it possible for the user to easily select the method of interest for modernization of the ship power plant operation with its further detailed study. There are uniqueness and novelty of the block diagram associated with the use of new topical methods for improving the diesel engine.

Keywords: energy efficiency, marine diesel engine, modernization method, block diagram, workflow, efficiency coefficient.

For citation:

Erofeev, Pavel A., Vladimir A. Zhukov, and Sergei G. Chernyi. "Classification of modern methods for improving the working process of marine diesel engine." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 12.4 (2020): 765–774. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-765-774.

УДК 681.5

КЛАССИФИКАЦИЯ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ

П. А. Ерофеев¹, В. А. Жуков², С. Г. Черный^{1,2}

¹ — ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», Керчь, Российская Федерация

² — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

В статье приводится аналитический обзор основных методов улучшения рабочего процесса судовых дизельных двигателей со способом их систематизации и группировки. Изучен вопрос современных методов и способов повышения критериев экологичности, экономичности и энергоэффективности

дизельного двигателя как основной судовой энергетической установки с учетом требований Конвенции МАРПОЛ-73/78, а также соблюдением правил российских классификационных обществ. На основе выполненного анализа представлена блок-схема методов усовершенствования рабочего процесса судового дизельного двигателя. Предлагаемая блок-схема дает возможность простоты выбора пользователем интересующего метода модернизации работы судовой энергетической установки с дальнейшим подробным его изучением. Отмечается, что объектом научного исследования являются методы усовершенствования рабочего процесса судовых дизельных двигателей. Результатами проведенного научного исследования являются: анализ как базовых, так и современных методов модернизации рабочего процесса судового дизельного двигателя с дальнейшей возможностью их систематизации и группировки в виде структурной схемы и реализация собранной и проанализированной информации в виде структурной схемы методов модернизации рабочего процесса судового дизельного двигателя. Отмечается, что исследования как современных подходов, так и базовых методов модернизации рабочего процесса судового дизельного двигателя проводились аналитическим методом с последующей реализацией в блок-схему. Имеет место уникальность блок-схемы и новизна, связанные с применением новых актуальных методов усовершенствования дизельного двигателя.

Ключевые слова: энергоэффективность, судовой дизельный двигатель, метод модернизации, структурная схема, рабочий процесс, коэффициент полезного действия.

Для цитирования:

Ерофеев П. А. Классификация современных методов совершенствования рабочего процесса судовых дизелей / П. А. Ерофеев, В. А. Жуков, С. Г. Черный // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 4. — С. 765–774. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-765-774.

Введение (Introduction)

Актуальным требованием, предъявляемым Международной морской организацией (ИМО) к морским судам различного назначения, является их высокая энергоэффективность. Формализация данного требования осуществлена путем введения для новых (находящихся в постройке) судов проектного (конструктивного) индикатора энергетической эффективности (EEDI) [1] и для существующих (находящихся в эксплуатации) судов является эксплуатационным критерием (индикатором) энергетической эффективности судна ($EEOI, \frac{\text{масса CO}_2}{\text{т} \cdot \text{км}}$) [2]:

$$EEDI = \frac{(M_{\text{ТЭРпроект}} C_F)}{A_{\text{проект}}};$$

$$EEOI = \frac{(M_{\text{ТЭРфакт}} C_F)}{A_{\text{факт}}}, \quad (1)$$

где $M_{\text{ТЭРпроект}}, M_{\text{ТЭРфакт}}$ — проектное и действительное потребление топлива всеми судовыми потребителями энергии, кг топлива/рейс; $A_{\text{проект}}, A_{\text{факт}}$ — соответственно, проектная и действительная произведенная работа судна, т·км/рейс; C_F — безразмерный конверсионный фактор приведения расхода топлива к выбросам CO_2 , кг CO_2 /кг топлива.

Из представленных выражений (1) видно, что оба индикатора представляют собой отношение количества произведенного парникового газа CO_2 к величине транспортной работы судна за определенный период времени (рейс, год и т. д.) и различаются лишь способом подсчета величин, входящих в них. Показатели, устанавливаемые ИМО, учитывают три основных фактора:

- расход топлива;
- выбросы диоксида углерода (CO_2);
- работу (судовой энергетической установки или судна в целом).

Указанные показатели энергетической эффективности морской техники являются интегральными. Для оценки уровня энергоэффективности конкретного технического объекта необходима локализация показателей.

Локализация показателей, обеспечивающая возможность их определения и анализа, может осуществляться как по времени: час, рейс, навигация, год, так и по виду объектов: тип двигателя, тип

и назначение судна, судоходная компания и др. [3]. Уточненная формула показателя IMO EEDI учитывает часовой расход топлива каждым судовым потребителем и скорость движения судна в милях за час. Аналогичные показатели энергоэффективности устанавливаются российскими национальными стандартами [4], [5] и применяются к судам, эксплуатирующимся на внутренних водных путях.

В соответствии со «Стратегией развития внутреннего водного транспорта Российской Федерации на период до 2030 года» приоритетными задачами являются повышение безопасности, экологичности и энергоэффективности перевозок на внутреннем и мировом водном транспорте. При этом одним из перспективных направлений повышения производительности эксплуатируемого морского и речного флота считается снижение эксплуатационных потерь, которое может быть достигнуто путем рационального использования топлива и смазочных материалов, а также улучшения технических показателей эксплуатации флота. Решение указанных задач, в первую очередь, необходимо для обеспечения конкурентоспособности водного транспорта по отношению к другим видам транспорта [6].

Основными потребителями топлива и источниками эмиссии CO₂ на судах являются главные и вспомогательные двигатели, в качестве которых как на морских, так и на речных судах уже более ста лет применяются, главным образом, дизельные двигатели. Для дизельных двигателей наиболее информативными локальными показателями энергоэффективности являются удельный эффективный расход топлива и эффективный КПД. Важнейшей целью совершенствования рабочего процесса судового дизеля и его конструкции является повышение энергоэффективности, объективно характеризуемой данными показателями.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Эффективный КПД судового дизеля, характеризующий совокупность процессов преобразования химической энергии топлива в механическую энергию, передаваемую потребителю, определяется равенством [3]:

$$\eta_e = \eta_i \eta_{oi} \eta_{\text{мех}}, \quad (2)$$

где η_i — термический КПД идеального цикла (для судового дизеля — цикл Тринклера); η_{oi} — носительный индикаторный КПД, оценивающий степень приближения процессов действительного цикла к идеальным термодинамическим процессам; $\eta_{\text{мех}}$ — механический КПД, учитывающий механические потери, сопровождающие преобразование тепловой энергии в работу в реальном двигателе.

Анализируя возможности повышения энергетической эффективности рабочих процессов судовых дизелей, необходимо четко представлять, за счет увеличения каких КПД обеспечивается рост эффективности работы двигателя. Отсутствие таких представлений приводит к ошибкам, описанным в работах [7], [8]. В качестве основы при выборе путей совершенствования термического цикла и соответственно повышения термического КПД следует использовать концепцию предельно возможных и максимально достижимых границ цикла, изложенную в работах [9], [10]. Совершенствование термодинамических циклов судовых дизелей, как и любых других тепловых двигателей в соответствии с теоремой Карно, направлено, в конечном счете, на расширение температурного диапазона, в котором осуществляется цикл и повышение термического КПД — η_i . Основным ресурсом расширения этого диапазона является повышение максимальной температуры цикла, ограничиваемой в реальных двигателях конструктивными и технологическими факторами.

Повышение максимальной температуры цикла приводит к возрастанию температур отработавших газов и охлаждающей жидкости двигателя, что приводит к расширению возможностей использования вторичных энергетических ресурсов для повышения энергоэффективности судовых энергетических установок. Перспективы использования вторичных энергетических ресурсов и технические средства для реализации данного ресурса повышения энергоэффективности рассмотрены в работах [11]–[15]. Основными источниками вторичных энергетических ресурсов являются: теплота, отводимая отработавшими газами; теплота, отводимая от надувочного воздуха; теплота, отводимая теплоносителем системы охлаждения [16]. Совершенствование рабочих процессов судовых дизелей с целью повышения их энергоэффективности связывают также с когенерационными циклами,

такими как органический цикл Ренкина [17]–[20], в котором может использоваться как вода из системы охлаждения дизеля, так и специальные теплоносители. Перспективным является использование в судовой энергетике установок, включающих системы рекуперации теплоты отработавших газов и охлаждающей жидкости в цикле Брайтона [21], [22]. Для оценки результативности предлагаемых мер по повышению энергоэффективности судовых энергетических установок в настоящее время используются различные методики, базирующиеся как на традиционных подходах [23], так и реализующие методы численного моделирования [24], [25] и нечеткой логики [26].

Анализ литературных источников как отечественных, так и зарубежных авторов показывает, что повышение энергоэффективности судовых энергетических установок и их экологической безопасности непосредственно зависит от качества рабочих процессов главных и вспомогательных судовых дизелей. С целью разработки мер по дальнейшему совершенствованию рабочих процессов дизелей необходимо систематизировать возможные направления модернизации.

Результаты (Results)

При разработке классификации были выделены две группы судовых дизелей: находящиеся в эксплуатации и проектируемые, для которых возможности воздействия на рабочий процесс существенно отличаются. В результате сбора и анализа научно-технической информации разработана классификация методов усовершенствования рабочего процесса судового дизеля, представленная на рисунке.



Методы совершенствования рабочего процесса дизельного двигателя

Обсуждение (Discussion)

Первая группа классификации включает конструктивные и технологические методы, которые используются для дизельных двигателей, находящихся в эксплуатации, при этом данные методы не требуют серьезного вмешательства в конструкцию двигателя. Данные методы повышения качества рабочего процесса судового дизельного двигателя базируются на изменении физико-химических свойств топливовоздушной смеси с помощью воздействия на топливо и совершенствования топливоподготовки, а именно: подогрева топлива, использования присадок к топливу, обработки топлива электростатическим полем, озонирования топлива, применения катализаторов. С целью улучшения экономических и экологических показателей дизелей, находящихся в эксплуатации, может также использоваться замена традиционного дизельного топлива альтернативным топливом, использование более высококачественного топлива, а также применение водотопливных эмульсий [27]–[29]. Для находящихся в эксплуатации двигателей могут также рассматриваться различные методы воздействия на воздушный заряд, подаваемый в цилиндр через впускной клапан ДВС: использование электростатического поля для ионизации воздуха, добавка озона O_3 или кислорода O_2 в воздушный заряд, дополнительная турбулизация воздушного заряда, рециркуляция отработавших газов. Изменение свойств топлива и окислителя интенсифицирует процесс сгорания и теплоподвода к рабочему телу, обеспечивая, таким образом, повышение относительного индикаторного КПД — η_{oi} .

Указанные способы требуют меньших затрат по сравнению с конструктивными изменениями, так как являются технологическими способами модернизации. Они позволяют добиться повышения экологической безопасности и энергоэффективности дизельных двигателей различных типов и марок в широком диапазоне мощностей и частот вращения коленчатого вала. Недостатками этих методов является то, что практически все они находятся в стадии разработки и требуют дополнительных исследований с проведением лабораторных, стендовых и натурных испытаний с целью адаптации методов к конкретным двигателям и условиям их эксплуатации, а также разработки дополнительного оборудования и аппаратуры для судовых дизельных двигателей. При оценке целесообразности использования указанных методов необходимо учитывать не только эффективность метода (увеличение эффективного КПД η_e , снижение выбросов диоксида углерода CO_2 и сокращение токсичности и дымности отработавших газов), но и затраты, связанные с модернизацией систем двигателя.

Во вторую группу классификации входят мероприятия, проводимые на этапе проектирования дизельного двигателя. К конструктивным изменениям, оказывающим наиболее существенное влияние на повышение энергоэффективности рабочего цикла дизеля, относятся следующие: оптимизация формы камеры сгорания, подбор вихревого отношения, применение четырех клапанных головок цилиндров, оптимизация работы узлов трения, оптимизация режимов охлаждения дизельного двигателя; оптимизация параметров наддува, применение топливной аппаратуры с высокой энергией впрыскивания, оптимизация распыливания топлива за счет применения форсунок с электронным управлением, применение двух- и многоступенчатого впрыска, электронное регулирование рабочих параметров дизельного двигателя [30]–[32], введение в цикл дизеля дополнительных рабочих ходов [33]. Указанные методы требуют более серьезных изменений конструкции двигателя по сравнению с методами первой группы. Реализация методов в различной степени обеспечивает повышение термического, относительного индикаторного и механического КПД, определяющих величину эффективного КПД двигателя.

В свою очередь, методы второй группы требуют дополнительных материальных и временных ресурсов для проведения научных исследований, опытно-конструкторской проработки, доводочных испытаний и опытной эксплуатации. С целью сокращения периода внедрения созданных конструкций необходимо широко использовать моделирование объектов и процессов. Все проводимые модернизации судовых дизелей должны соответствовать требованиям Правил классификационных обществ: Российского морского регистра судоходства и Российского речного регистра судоходства, касающихся энергетических установок судов или проходить их свидетельство.

Заключение (Conclusion)

Предлагаемая классификация методов совершенствования рабочих процессов судовых дизелей позволяет систематизировать и автоматизировать процедуру выбора направления модернизации судовой энергетической установки, с дальнейшим его подробным исследованием. На основе разработанной схемы планируется создание базы данных имеющихся конструктивных решений и разработок и математических моделей рабочих процессов. В процессе реализации выбора и исследования модернизации судового дизеля с целью совершенствования рабочего процесса новое поколение судовых дизельных двигателей приобретет следующие положительные характеристики:

- многотопливность;
- оптимальное давление впрыска топлива;
- максимально допустимое давление цикла;
- комбинированные механизмы контроля выбросов, встроенные в двигатель;
- проведение технического обслуживания на основе оценки реального состояния двигателя в условиях эксплуатации;
- возможность сбора, передачи и обработки данных о работе двигателя в режиме реального времени с целью оптимизации работы судна;
- удаленное подключение к данным, позволяющее проводить диагностику двигателя и выбор корректирующих действий.

Создание и внедрение прогрессивных технологий, определяющих основные направления развития судовых дизелей, являются перспективными тенденциями в судостроении и смежных областях техники. Непрерывно продолжающееся совершенствование судовых дизелей, обеспечивающее повышение их энергоэффективности и экологической безопасности, позволяет с большой долей вероятности утверждать, что дизельный двигатель выдержит испытание временем, оставаясь основным двигателем для большинства судов в мире в долгосрочной перспективе, а также будет широко использоваться в перспективных гибридных судовых энергетических установках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. MEPC.1/Circ.681. Interim guidelines on the method of calculation of the energy efficiency design index for new ships. — London: International Maritime Organization, 2009. — 8 p.
2. MEPC.1/Circ.684. Guidelines for voluntary use of the ship energy efficiency operational indicator (EEOI). — London: International Maritime Organization, 2009. — 10 p.
3. *Ерофеев В. Л.* Управление энергоэффективностью объектов морской техники и судовых двигателей внутреннего сгорания: монография / В. Л. Ерофеев [и др.]; под ред. В. Л. Ерофеева, В. А. Жукова. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2018. — 184 с.
4. ГОСТ Р 51541–99. Энергосбережение. Энергетическая эффективность, состав показателей. Общие положения. — М.: ИПК Издательство стандартов, 2000. — 8 с.
5. ГОСТ Р 51387–99. Энергосбережение. Нормативно-методическое обеспечение. Основные положения. — М.: ИПК Изд-во стандартов, 2000. — 16 с.
6. Распоряжение Правительства РФ от 29 февраля 2016 г. № 327-р «Стратегия развития внутреннего водного транспорта Российской Федерации на период до 2030 года» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://government.ru/docs/22004/> (дата обращения: 10.08.2020).
7. *Ерофеев В. Л.* Неточность термодинамических определений и терминов – путь к вечному двигателю второго рода / В. Л. Ерофеев, В. А. Жуков, А. С. Пряхин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 6 (40). — С. 140–149. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-140-149.
8. *Ерофеев В. Л.* О качестве и достоверности научно-технической информации / В. Л. Ерофеев, В. А. Жуков, О. В. Мельник // Сб. тез. докладов нац. науч.-практ. конф. проф.-преп. сост. ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова». — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2019. — С. 76–78.
9. *Тузов Л. В.* Идеальный термодинамический цикл ДВС с изохорным и изотермическим способами подвода теплоты / Л. В. Тузов, Н. Б. Ганин, А. С. Пряхин // Двигателестроение. — 2015. — № 1 (259). — С. 3–6.

10. Ерофеев В. Л. Пределы повышения энергетической эффективности топливоиспользования поршневого ДВС / В. Л. Ерофеев, Н. Б. Ганин, А. С. Пряхин // Двигателестроение. — 2015. — № 2 (260). — С. 33–38.

11. Choi B. C. Thermodynamic analysis of a transcritical CO₂ heat recovery system with 2-stage reheat applied to cooling water of internal combustion engine for propulsion of the 6800 TEU container ship / B. C. Choi // Energy. — 2016. — Vol. 107. — Pp. 532–541. DOI: 10.1016/j.energy.2016.03.116.

12. Ерофеев, В. Л. О возможностях использования вторичных энергетических ресурсов в судовых ДВС / В. Л. Ерофеев, В. А. Жуков, О. В. Мельник // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 570–580. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-570-580.

13. Zhu S. A review of waste heat recovery from the marine engine with highly efficient bottoming power cycles / S. Zhu, K. Zhang, K. Deng // Renewable and Sustainable Energy Reviews. — 2020. — Vol. 120. — Pp. 109611. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109611.

14. Liu X. Performance analysis and optimization of an electricity-cooling cogeneration system for waste heat recovery of marine engine / X. Liu, M. Q. Nguyen, M. He // Energy Conversion and Management. — 2020. — Vol. 214. — Pp. 112887. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.112887.

15. Dere C. Effect analysis on energy efficiency enhancement of controlled cylinder liner temperatures in marine diesel engines with model based approach / C. Dere, C. Deniz // Energy Conversion and Management. — 2020. — Vol. 220. — Pp. 113015. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.113015.

16. Lion S. A review of emissions reduction technologies for low and medium speed marine Diesel engines and their potential for waste heat recovery / S. Lion, I. Vlaskos, R. Taccani // Energy Conversion and Management. — 2020. — Vol. 207. — Pp. 112553. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.112553.

17. Larsen U. Expansion of organic Rankine cycle working fluid in a cylinder of a low-speed two-stroke ship engine / U. Larsen, J. Wronski, J. G. Andreasen, F. Baldi, L. Pierobon // Energy. — 2017. — Vol. 119. — Pp. 1212–1220. DOI: 10.1016/j.energy.2016.11.069.

18. Sellers C. Field operation of a 125kW ORC with ship engine jacket water / C. Sellers // Energy Procedia. — 2017. — Vol. 129. — Pp. 495–502. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.09.168.

19. Liu X. A novel waste heat recovery system combining steam Rankine cycle and organic Rankine cycle for marine engine / X. Liu, M. Q. Nguyen, J. Chu, T. Lan, M. He // Journal of Cleaner Production. — 2020. — Vol. 265. — Pp. 121502. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121502.

20. Ouyang T. Design and optimisation of an advanced waste heat cascade utilisation system for a large marine diesel engine / T. Ouyang, G. Huang, Z. Su, J. Xu, F. Zhou, N. Chen // Journal of Cleaner Production. — 2020. — Vol. 273. — Pp. 123057. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123057.

21. Pan P. Thermo-economic analysis and multi-objective optimization of S-CO₂ Brayton cycle waste heat recovery system for an ocean-going 9000 TEU container ship / P. Pan, C. Yuan, Y. Sun, X. Yan, M. Lu, R. Bucknall // Energy Conversion and Management. — 2020. — Vol. 221. — Pp. 113077. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.113077.

22. Feng Y. Thermodynamic analysis and performance optimization of the supercritical carbon dioxide Brayton cycle combined with the Kalina cycle for waste heat recovery from a marine low-speed diesel engine / Y. Feng, Z. Du, M. Shreka, Y. Zhu, S. Zhou, W. Zhang // Energy Conversion and Management. — 2020. — Vol. 206. — Pp. 112483. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.112483.

23. Ерофеев В. Л. Энергетический и эксергетический подходы к оценке повышения эффективности тепловых двигателей / В. Л. Ерофеев, В. А. Жуков, А. С. Пряхин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 5. — С. 1017–1026. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1017-1026.

24. Tsitsilonis K.M. A novel systematic methodology for ship propulsion engines energy management / K. M. Tsitsilonis, G. Theotokatos // Journal of Cleaner Production. — 2018. — Vol. 204. — Pp. 212–236. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.08.154.

25. Barone G. Sustainable energy design of cruise ships through dynamic simulations: Multi-objective optimization for waste heat recovery / G. Barone, A. Buonomano, C. Forzano, A. Palombo, M. Vicidomini // Energy Conversion and Management. — 2020. — Vol. 221. — Pp. 113166. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.113166.

26. Tran T. A. Effect of ship loading on marine diesel engine fuel consumption for bulk carriers based on the fuzzy clustering method / T. A. Tran // Ocean Engineering. — 2020. — Vol. 207. — Pp. 107383. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.107383.

27. Бабаев А. И. Влияние свойств топлива на токсичность отработавших газов дизелей / Анализ технического уровня и тенденций развития ДВС / А. И. Бабаев // Информцентр - НИИД. — М., 1994. — Вып. 10. — С. 3–35.
28. Дудышев В. Д. Экономия топлива и снижение токсичности бензиновых двигателей / В. Д. Дудышев // Экология и промышленность России. — 2003. — № 5. — С. 39–41.
29. Курников А. С. Разработка методики проектирования комплекса систем обеспечения обитаемости и повышения экологической безопасности судов на основе активированных окислительных технологий / А.С. Курников // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. Вып. 5: Судовая и промышленная энергетика. — 2003. — № 5. — С. 9–27.
30. Kaluza P. The complex network of global cargo ship movements / P. Kaluza, A. Kölzsch, M. T. Gastner, B. Blasius // Journal of the Royal Society Interface. — 2010. — Vol. 7. — Is. 48. — Pp. 1093–1103. DOI: 10.1098/rsif.2009.0495.
31. MAN Diesel & Turbo. (2008, August 19). Exhaust Gas Emission Control Today and Tomorrow. Retrieved December 2010 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: www.mandieselturbo.com/files/news/files09187/7780-0060-00ppr.pdf (дата обращения: 12.08.2020).
32. Безюков О. К. Охлаждение транспортных двигателей внутреннего сгорания / О.К. Безюков, В.А. Жуков, В.Н. Тимофеев. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2015. — 272 с.
33. Жуков В. А. Двигатели с шеститактным рабочим циклом: порядок работы и схемы коленчатых валов / В. А. Жуков, А. И. Яманин, О. В. Мельник // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 6. — С. 1244–1254. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1244-1254.

REFERENCES

1. MEPC.1/Circ.681. *Interim guidelines on the method of calculation of the energy efficiency design index for new ships*. London: International Maritime Organization, 2009.
2. MEPC.1/Circ.684. *Guidelines for voluntary use of the ship energy efficiency operational indicator (EEOI)*. London: International Maritime Organization, 2009.
3. Erofeev, V. L., V. A. Zhukov, O. V. Mel'nik, O. K. Bezyukov, E. V. Erofeeva, and A. A. Martynov. *Upravlenie energoeffektivnost'yu ob'ektov morskoi tekhniki i sudovykh dvigatelei vnutrennego sgoraniya: monografiya*. Edited by V. L. Erofeev, V. A. Zhukov. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2018.
4. GOST R 51541–99. Energy conservation. Energy efficiency. Composition of indicators. Basic concept. M.: IPK Izdatel'stvo standartov, 2000.
5. GOST R 51387–99. Energy conservation. Norm-method securing. Basic concept. M.: IPK Izdatel'stvo standartov, 2000.
6. Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 29 fevralya 2016 g. № 327-r «Strategiya razvitiya vnutrennego vodnogo transporta Rossiiskoi Federatsii na period do 2030 goda». Web. 10 Aug. 2020 <<http://government.ru/docs/22004/>>.
7. Erofeev, Valentin Leonidovich, Vladimir Anatolevich Zhukov, and Alexander Sergeyevich Pryakhin. “Inexactitude of thermodynamical definition and terms is a way to the perpetual engine of the second kind.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 6(40) (2016): 140–149. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-140-149.
8. Erofeev, V. L., V. A. Zhukov, and O. V. Mel'nik. “O kachestve i dostovernosti nauchno-tekhnicheskoi informatsii.” *Sb. tez. dokladov nats. nauchno-prakt. konf. prof.-prepod. Sost. FGBOU VO «GUMRF imeni admirala S.O. Makarova»*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2019. 76–78.
9. Tuzov, L. V., N. B. Ganin, and A.S. Pryakhin. “Ideal thermodynamic cycle for reciprocating engine with isochoric and isothermal heat supply.” *Dvigatelaystroeniye* 1(259) (2015): 3–6.
10. Yerofeev, V. L., N. B. Ganin, and A. S. Pryakhin. “Fuel efficiency enhancement resources.” *Dvigatelaystroeniye* 2(260) (2015): 33–38.
11. Choi, Byung Chul. “Thermodynamic analysis of a transcritical CO₂ heat recovery system with 2-stage reheat applied to cooling water of internal combustion engine for propulsion of the 6800 TEU container ship.” *Energy* 107 (2016): 532–541. DOI: 10.1016/j.energy.2016.03.116.
12. Erofeev, Valentin L., Vladimir A. Zhukov, and Olesya V. Melnik. “On the possibilities of using secondary energy resources in marine engine.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.3 (2017): 570–580. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-570-580.

13. Zhu, Sipeng, Kun Zhang, and Kangyao Deng. "A review of waste heat recovery from the marine engine with highly efficient bottoming power cycles." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 120 (2020): 109611. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109611.
14. Liu, Xiangyang, Manh Quang Nguyen, and Maogang He. "Performance analysis and optimization of an electricity-cooling cogeneration system for waste heat recovery of marine engine." *Energy Conversion and Management* 214 (2020): 112887. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.112887.
15. Dere, Caglar, and Cengiz Deniz. "Effect analysis on energy efficiency enhancement of controlled cylinder liner temperatures in marine diesel engines with model based approach." *Energy Conversion and Management* 220 (2020): 113015. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.113015.
16. Lion, Simone, Ioannis Vlaskos, and Rodolfo Taccani. "A review of emissions reduction technologies for low and medium speed marine Diesel engines and their potential for waste heat recovery." *Energy Conversion and Management* 207 (2020): 112553. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.112553.
17. Larsen, Ulrik, Jorrit Wronski, Jesper Graa Andreasen, Francesco Baldi, and Leonardo Pierobon. "Expansion of organic Rankine cycle working fluid in a cylinder of a low-speed two-stroke ship engine." *Energy* 119 (2017): 1212–1220. DOI: 10.1016/j.energy.2016.11.069.
18. Sellers, Christopher. "Field operation of a 125kW ORC with ship engine jacket water." *Energy Procedia* 129 (2017): 495–502. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.09.168.
19. Liu, Xiangyang, Manh Quang Nguyen, Jianchu Chu, Tian Lan, and Maogang He. A novel waste heat recovery system combining steam Rankine cycle and organic Rankine cycle for marine engine / X. Liu, M. Q. Nguyen, J. Chu, T. Lan, M. He // *Journal of Cleaner Production*. – Volume 265, 20 August 2020, 121502//doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121502.
20. Ouyang, Tiancheng, Guicong Huang, Zixiang Su, Jisong Xu, Feng Zhou, and Nan Chen. "Design and optimization of an advanced waste heat cascade utilization system for a large marine diesel engine." *Journal of Cleaner Production* 273 (2020): 123057. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123057.
21. Pan, Pengcheng, Chengqing Yuan, Yuwei Sun, Xiping Yan, Mingjian Lu, and Richard Bucknall. "Thermo-economic analysis and multi-objective optimization of S-CO₂ Brayton cycle waste heat recovery system for an ocean-going 9000 TEU container ship." *Energy Conversion and Management* 221 (2020): 113077. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.113077.
22. Feng, Yongming, Zhiqiang Du, Majed Shreka, Yuanqing Zhu, Song Zhou, and Wenping Zhang. "Thermodynamic analysis and performance optimization of the supercritical carbon dioxide Brayton cycle combined with the Kalina cycle for waste heat recovery from a marine low-speed diesel engine." *Energy Conversion and Management* 206 (2020): 112483. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.112483.
23. Erofeev, Valentin L., Vladimir A. Zhukov, and Alexandr S. Pryachin. "Energy and exergy approaches to assessment enhance the efficiency of heat engines". *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.5 (2017): 1017–1026. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1017-1026.
24. Tsitsilonis, Konstantinos-Marios, and Gerasimos Theotokatos. "A novel systematic methodology for ship propulsion engines energy management." *Journal of Cleaner Production* 204 (2018): 212–236. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.08.154.
25. Barone, Giovanni, Annamaria Buonomano, Cesare Forzano, Adolfo Palombo, and Maria Vicidomini. "Sustainable energy design of cruise ships through dynamic simulations: Multi-objective optimization for waste heat recovery." *Energy Conversion and Management* 221 (2020): 113166. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.113166.
26. Tran, Tien Anh. "Effect of ship loading on marine diesel engine fuel consumption for bulk carriers based on the fuzzy clustering method." *Ocean Engineering* 207 (2020): 107383. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.107383.
27. Babaev, A. I. "Vliyanie svoistv topliva na toksichnost' otrabotavshikh gazov dizelei / Analiz tekhnicheskogo urovnya i tendentsii razvitiya DVS." *Informtsentr – NIID. M.*, 1994. Vol. 10. Pp. 3–35.
28. Doudyshev, V. D. "Saving fuel and reducing toxicity of gasoline engines." *Ecology and Industry of Russia* 5 (2003): 39–41.
29. Kurnikov, A. S. "Development of a technique of designing of a complex of systems of maintenance habitability and increase of ecological safety of ships on the basis of the activated oxidizing technologies." *Bulletin of VSAWT* 5 (2003): 9–27.
30. Kaluza, Pablo, Andrea Kölzsch, Michael T. Gastner, and Bernd Blasius. "The complex network of global cargo ship movements." *Journal of the Royal Society Interface* 7.48 (2010): 1093–1103. DOI: 10.1098/rsif.2009.0495.
31. MAN Diesel & Turbo. (2008, August 19). Exhaust Gas Emission Control Today and Tomorrow. Retrieved December 2010. Web. 12 Aug. 2020 <www.mandieselturbo.com:/files/news/files/9187/7780-0060-00ppr.pdf>.

32. Bezyukov, O. K., V. A. Zhukov, and V. N. Timofeev. *Okhlazhdenie transportnykh dvigatelei vnutrennego sgoraniya*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S.O.Makarova, 2015.

33. Zhukov, Vladimir A., Alexander I. Yamanin, and Olesya V. Melnik. "Six storke engines: operating procedure and schemes of crankshafts." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 10.6 (2018): 1244–1254. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1244-1254.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ерофеев Павел Андреевич — аспирант

Научный руководитель:

Черный Сергей Григорьевич

ФГБОУ ВО «Керченский Государственный
Морской Технологический Университет»

298309, Российская Федерация, г. Керчь,
ул. Орджоникидзе, 82.

e-mail: pavel.erofeev.95@mail.ru

Жуков Владимир Анатольевич —

доктор технических наук, доцент

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7

e-mail: va_zhukov@rambler.ru, zhukovva@gumrf.ru

Черный Сергей Григорьевич —

кандидат технических наук, доцент

ФГБОУ ВО «Керченский Государственный
Морской Технологический Университет»

298309, Российская Федерация, г. Керчь,
ул. Орджоникидзе, 82

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени

адмирала С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация,

г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7

e-mail: sergiiblack@gmail.com, kaf_koib@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Erofeev, Pavel A. — Postgraduate

Supervisor:

Chernyi, Sergei G.

Kerch State Maritime
Technological University

82 Ordzhonikidze Str., Kerch, 298309,
Russian Federation

e-mail: pavel.erofeev.95@mail.ru

Zhukov, Vladimir A. —

Dr. of Technical Sciences, associate professor

Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping

5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation

e-mail: va_zhukov@rambler.ru, zhukovva@gumrf.ru

Chernyi, Sergei G. —

PhD, associate professor

Kerch State Maritime
Technological University

82 Ordzhonikidze Str., Kerch, 298309,
Russian Federation

Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping

5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation

e-mail: sergiiblack@gmail.com, kaf_koib@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 31 июля 2020 г.

Received: July 31, 2020.