

СУДОВОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

SHIP POWER EQUIPMENT

УДК 621.43.018.7:536.8

DOI: 10.37890/jwt.vi82.584

Анализ эффективности продувочно-выпускной системы двухтактного дизеля при использовании регулируемого соплового аппарата турбокомпрессора

В.Л. Колюков

Керченский государственный морской технологический университет, г. Керчь, Россия

Аннотация. В работе исследованы определяющие характеристики продувочно-выпускного тракта судового двухтактного дизеля для широкого диапазона изменения внешних условий эксплуатации и нагрузок штатного варианта и варианта с управляемыми поворотными лопатками соплового аппарата турбины турбокомпрессора. Анализ расходных характеристик показал увеличение расхода воздуха и расхода газа при уменьшении эффективной площади проходного сечения турбины при повороте лопаток. Оценка эффективности продувочно-выпускного тракта проводилась показателями, определяющими качество очистки цилиндров от остаточных продуктов сгорания. В качестве таких показателей приняты: коэффициент остаточных газов, коэффициент наполнения, суммарный коэффициент избытка воздуха. Для штатного варианта переход на утяжеленную винтовую характеристику приводит к снижению коэффициента остаточных газов. В варианте с регулируемым сопловым аппаратом этот коэффициент увеличивается, что может повысить интенсивность отложений нагара на внутренних поверхностях цилиндропоршневой группы. Утяжеление винтовой характеристики не привело к ухудшению наполнения цилиндра зарядом воздуха. Использование регулируемого соплового аппарата позволило повысить суммарный коэффициент избытка воздуха на режимах долевых нагрузок, прирост которого с утяжелением винтовой характеристики увеличился.

Ключевые слова: дизель, продувочно-выпускной тракт, регулируемый сопловой аппарат, турбокомпрессор, расходные характеристики, качество очистки цилиндров, винтовая характеристика.

Analysis of efficiency of a blowdown-exhaust system of a two-stroke diesel engine at use of the adjustable nozzle apparatus of a turbocharger

Viacheslav L. Konyukov

Kerch State Marine Technological University, Kerch, Russia

Abstract. The paper investigates the defining characteristics of the purge-exhaust path of a marine two-stroke diesel engine for a wide range of changes in external operating conditions and loads of the standard variant and the variant with controlled rotating blades of the turbine nozzle apparatus of the turbocharger turbine. The analysis of flow characteristics showed an increase in air and gas flow rates with a decrease in the effective cross-sectional area of the turbine when the blades are rotated. The efficiency of the purge-exhaust path was assessed by the indicators determining the quality of cylinder cleaning from residual combustion products. The following indicators were taken as such: residual gas ratio, filling ratio, total excess air ratio. For the standard variant, the transition to the weighted screw characteristic

leads to a decrease in the residual gas coefficient. In the variant with adjustable nozzle this coefficient increases, which can increase the intensity of deposits of carbon deposits on the inner surfaces of the cylinder-piston group. Weighting of the screw characteristic did not lead to deterioration of the cylinder filling with air charge. The use of adjustable nozzle apparatus allowed to increase the total excess air ratio at the modes of fractional loads, the increase of which with the weighting of the screw characteristic increased.

Keywords: diesel engine, purge-exhaust duct, adjustable nozzle, turbocharger, flow characteristics, cylinder cleaning quality, screw characteristic.

Введение

Проведенные исследования судовых дизелей при управлении расходом воздуха поворотом лопаток регулируемого соплового аппарата (РСА) показали значительные резервы в повышении экономичности и снижения показателей тепловой напряженности, что позволило существенно расширить диапазон допустимых режимов эксплуатации [1, 2, 3, 4]. Связи параметров и ограничения нагрузок дизеля устанавливаются в процессе анализа характеристик систем газообмена и наддува [5, 6]. Эти характеристики представляют зависимости давлений в различных сечениях продувочно-выпускного тракта от расхода рабочего тела и являются расходными характеристиками дизеля. Изменение давлений по циклу дизеля сопровождается изменением температуры рабочего тела. Изменение температуры наддувочного воздуха перед впускными органами при изменении условий эксплуатации незначительно в связи с регулированием системы охлаждения наддувочного воздуха. Значительно в больших пределах изменяется температура газа перед турбиной. Именно через эту температуру проявляется связь расходных характеристик с процессами, протекающими в цилиндрах, системах топливоподачи и воздухообмена [6, 7]. Эти связи сложные, а экспериментальные исследования очень дорогостоящие, поэтому основным способом оценки изменения расходных характеристик дизеля при повороте лопаток РСА и изменении условий эксплуатации является расчетно-теоретический, который базируется на тепловом расчете двигателя при условии, что расчетные эксплуатационные параметры исходного варианта согласуются с результатами заводских тестовых испытаний [8, 9].

Эффективность продувочно-выпускного тракта дизеля можно оценить качеством очистки цилиндров. Основными показателями качества газообмена являются: коэффициент остаточных газов, коэффициент наполнения, суммарный коэффициент избытка воздуха [10, 11]. Эти показатели определяют экономичность рабочих процессов дизеля и надежность элементов цилиндропоршневой группы, которая проявляется в изменении интенсивности отложений.

Изменение внешних условий эксплуатации судна отражается, прежде всего, на коэффициенте утяжеления винтовой характеристики. При этом изменяется частота вращения коленчатого вала и, соответственно, продолжительность процессов цикла, от которой зависят показатели качества газообмена.

Целью работы является анализ основных показателей качества газообмена продувочно-выпускного тракта судового двухтактного дизеля при использовании регулируемого соплового аппарата турбокомпрессора для различных условий эксплуатации.

Материалы и методы исследования

Исследования судового двухтактного дизеля 7S50MC проводились расчетно-теоретическим способом для широкого диапазона изменения внешних условий эксплуатации и нагрузок с использованием программы «Diesel K» [12]. Настройка программы для номинальных внешних условий проводилась по параметрам, полученным при заводских тестовых испытаниях этого двигателя [9]. Внешние

условия эксплуатации соответствовали принятому коэффициенту утяжеления винтовой характеристики, который изменялся в интервале $0,25 \leq \bar{C} \leq 3,6$.

В качестве определяющих расходных характеристик были приняты зависимости относительного давления перед впускными органами от расхода воздуха $p_s/p_0 = f(\bar{G})$ и относительного давления перед турбиной от расхода газа $p_T/p_0 = f(\bar{G}_T)$. Основной характеристикой является $p_s/p_0 = f(\bar{G})$, она непосредственно связана с рабочими процессами компрессора, ее также называют расходной характеристикой дизеля.

Программа «Diesel K» позволяла методом последовательных приближений вычислять показатели качества газообмена продувочно-выпускного тракта. В качестве таких показателей были использованы коэффициент остаточных газов γ_r , представляющий отношение оставшихся газов к количеству воздуха, поступившему в цилиндр, коэффициент наполнения η_n и суммарный коэффициент избытка воздуха α_s .

Коэффициент наполнения определялся по выражению [11],

$$\eta_n = \xi' \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \frac{p_a}{p_s} \frac{T_s}{T_s + \xi \gamma_r T_r}, \quad (1)$$

где ξ' - коэффициент, учитывающий дозарядку цилиндра на линии сжатия; ξ - поправочный коэффициент, учитывающий изменение теплоемкости остаточных газов.

Результаты исследований представлялись в относительном виде, когда значение исследуемого параметра относилось к величине соответствующего параметра для номинальной нагрузки дизеля и номинальных внешних условий эксплуатации. Эти результаты определялись для винтовой характеристики, соответствующей конкретному коэффициенту ее утяжеления.

Сравнение расходных характеристик дизеля и оценка качества газообмена проводилась для штатного варианта турбокомпрессора и варианта с РСА. Обоснование ограничений поворота лопаток приведено в работе [4]. Следует отметить, что диапазон исследованных режимов принимался без учета ограничительных характеристик тепловой и механической напряженности.

Результаты исследования и их обсуждение

Расходные характеристики определяют основное распределение параметров по циклу дизеля, фиксируя перепады давлений по отдельным процессам цикла. На рис.1 приведена основная расходная или гидравлическая характеристика дизеля, представляющая зависимости относительного давления воздуха перед цилиндром от его относительного расхода для различных коэффициентов утяжеления винтовых характеристик \bar{C} . Здесь и далее на рисунках обозначенные позиции зависимостей будут соответствовать: 1 - $\bar{C}=0,75$; 2 - $\bar{C}=1,0$; 3 - $\bar{C}=1,4$; 4 - $\bar{C}=2,0$; 5 - $\bar{C}=3,0$.

Следует отметить, что относительное давление находилось по выражению

$$\bar{p}_s = \frac{p_s/p_0}{p_{sH}/p_0} = \frac{p_s}{p_{sH}}, \quad (2)$$

где индексом «н» обозначено давление номинального режима.

Зависимости, соответствующие исходному варианту турбокомпрессора, показаны штриховыми линиями, а для варианта с РСА сплошными линиями. Из рисунка следует, что для фиксированного давления наддува утяжеление винтовой характеристики приводит к снижению расхода воздуха. Это можно объяснить снижением частоты вращения коленчатого вала при переходе на утяжеленную характеристику.

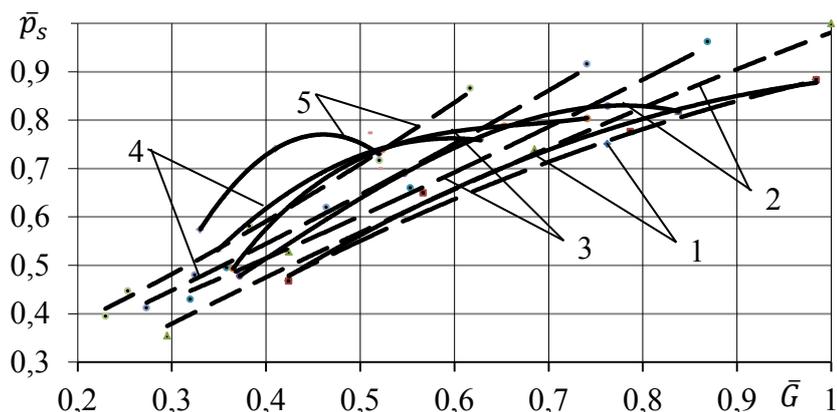


Рис. 1. Расходная характеристика $\bar{p}_s = f(\bar{G})$

В варианте с PCA поворот лопаток вызывает более интенсивное увеличение давления наддува по сравнению с увеличением расхода воздуха, в связи с этим при тех же условиях снижение расхода воздуха больше и составило 20%.

На рисунке 2 представлена расходная характеристика зависимости относительного давления перед турбиной \bar{p}_T от относительного расхода газа \bar{G}_T . Значение \bar{p}_T вычислялось по выражению, аналогичному формуле (2). Из рисунка следует, что для исходного варианта этот вид расходной характеристики носит линейный характер и не зависит от коэффициента утяжеления винтовой характеристики, определяющей внешние условия эксплуатации. Это можно объяснить тем, что дизель 7S50MC укомплектован турбокомпрессором марки MITSUI-MAN B&W NA57/T09052. Исследования турбины этого турбокомпрессора показали, практически, линейную зависимость степени понижения давления в турбине от расхода газа [4].

В варианте с PCA поворот лопаток изменяет гидравлическую характеристику турбины, что приводит к зависимости расходной характеристики от \bar{C} , внешний вид которой подобен характеристике $\bar{p}_s = f(\bar{G})$.

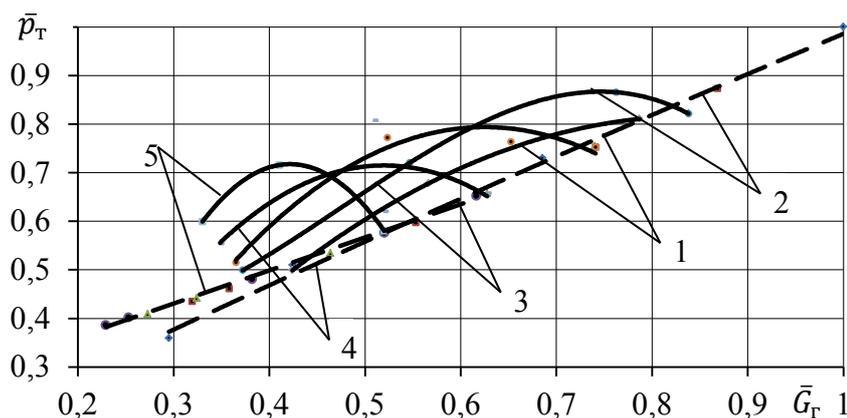


Рис. 2. Расходная характеристика $\bar{p}_T = f(\bar{G}_T)$

Переход на утяжеленную винтовую характеристику при изменении внешних условий эксплуатации сопровождается изменением параметров по рабочим процессам дизеля, а это приводит к изменению мощности турбокомпрессора. На рисунке 3

представлены зависимости относительной мощности турбины турбокомпрессора от нагрузки дизеля для различных коэффициентов утяжеления винтовых характеристик. С утяжелением винтовых характеристик мощность турбины снижается, что связано с уменьшением расхода газа. Использование РСА позволило увеличить мощность турбины на режимах долевых нагрузок, что привело к увеличению давления по циклу дизеля.

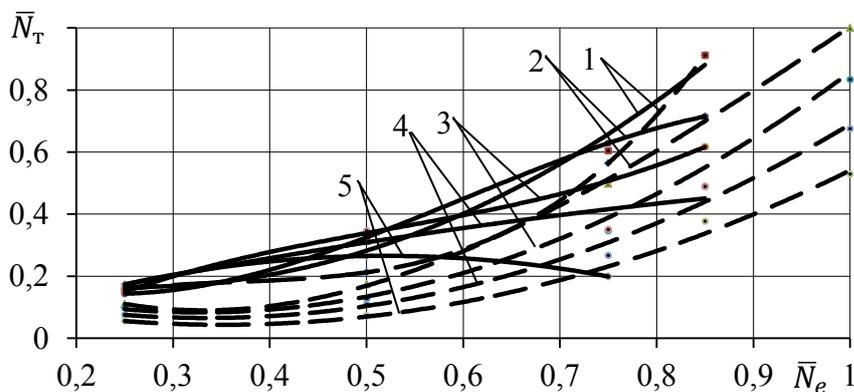


Рис. 3. Зависимость относительной мощности турбины турбокомпрессора от нагрузки дизеля

Температура газа перед турбиной \bar{T}_T влияет на рабочие процессы цикла. Через эту температуру проявляется связь расходных характеристик с процессами, протекающими в цилиндрах, системах топливоподачи и воздухообеспечения. На рис.4 приведены зависимости \bar{T}_T от \bar{N}_e . Увеличение \bar{C} повышает \bar{T}_T , что вызвано уменьшением коэффициента избытка воздуха при горении. Использование РСА позволяет повысить расход воздуха и снизить \bar{T}_T на режимах долевых нагрузок.

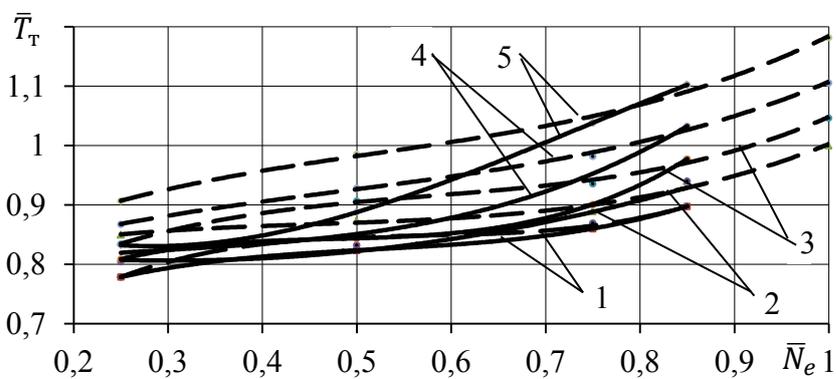


Рис. 4. Относительное изменение температуры газа перед турбиной от нагрузки дизеля

Для оценки эффективности продувочно-выпускного тракта дизеля использовались показатели, характеризующие качество очистки цилиндров от остаточных продуктов сгорания топлива. На рисунках 5, 6, 7 приведены зависимости относительного изменения коэффициента остаточных газов $\bar{\gamma}_r$, коэффициента наполнения $\bar{\eta}_n$ и суммарного коэффициента избытка воздуха $\bar{\alpha}_s$. Утяжеление винтовой характеристики для штатного варианта приводит к снижению $\bar{\gamma}_r$ (рис. 5), что вызвано увеличением перепада давлений на продувку цилиндров (см. рис.1 и рис.2). Дополнительное повышение $\bar{\gamma}_r$ в варианте с РСА увеличивается с понижением частоты вращения коленчатого вала. Следует учесть, что наибольший прирост $\bar{\gamma}_r$

приходится на режимы с пониженной частотой вращения. Это увеличивает время нахождения остаточных продуктов сгорания в цилиндре, что будет способствовать повышенным отложениям нагара на внутренних поверхностях цилиндропоршневой группы.

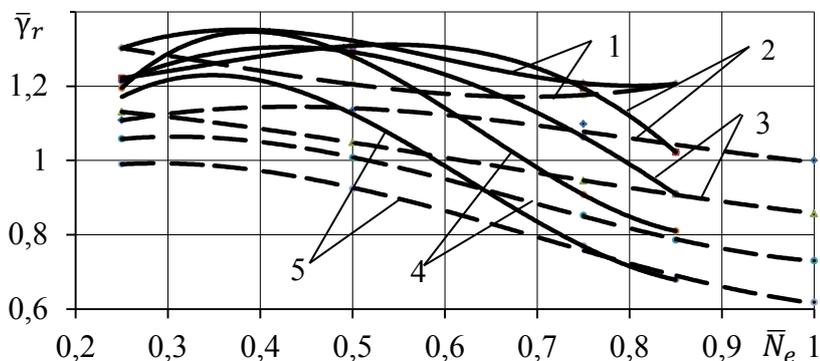


Рис. 5. Относительное изменение коэффициента остаточных газов от нагрузки дизеля

Уменьшение нагрузки дизеля вызывает существенное снижение коэффициента наполнения. Так при понижении \bar{N}_e от 1,0 до 0,5 коэффициент наполнения $\bar{\eta}_H$ снижается на 10% (см. рис.6). Утяжеление винтовой характеристики не сильно увеличивает $\bar{\eta}_H$, изменение которого не превышает 2%. В варианте с РСА $\bar{\eta}_H$ имеет тенденцию к снижению, которое не превышает 1%.

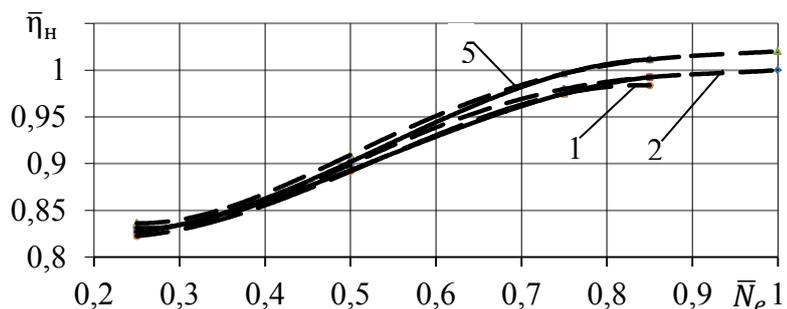


Рис. 6. Относительное изменение коэффициента наполнения от нагрузки дизеля

Незначительное изменение коэффициента наполнения при утяжелении винтовой характеристики свидетельствует о достаточно высокой эффективности продувочно-выпускной системы дизеля.

В ряде источников [10, 11] для качественной оценки эффективности продувочно-выпускного тракта рекомендуют дополнительно использовать суммарный коэффициент избытка воздуха $\bar{\alpha}_s$, изменения которого представлены на рис 7. С утяжелением винтовой характеристики $\bar{\alpha}_s$ падает. Незначительное увеличение $\bar{\eta}_H$ при уменьшении $\bar{\alpha}_s$ для утяжеленных винтовых характеристик можно объяснить снижением частоты вращения дизеля, в результате чего увеличивается время для очистки и наполнения цилиндров.

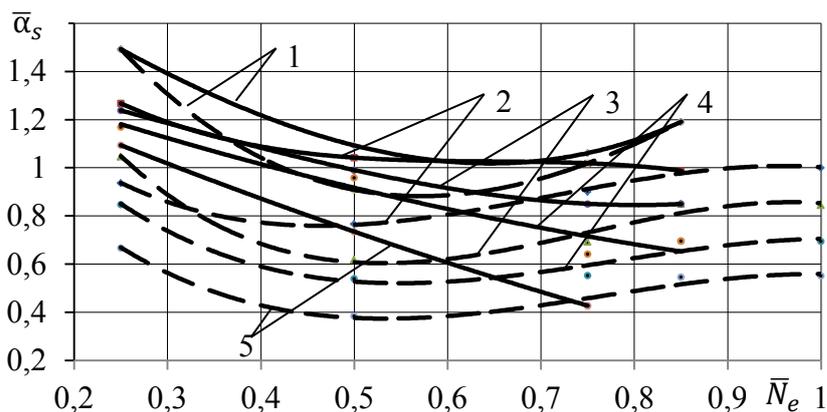


Рис. 7. Изменение $\bar{\alpha}_s$ от нагрузки дизеля

Увеличение мощности турбокомпрессора повысило $\bar{\alpha}_s$ на режимах долевых нагрузок, что связано с увеличением расхода воздуха при повороте лопаток РСА.

Выводы. Исследования продувочно-выпускного тракта двухтактного дизеля выполнены для широкого диапазона изменения внешних условий эксплуатации и нагрузок.

Анализ расходных характеристик показал увеличение расхода воздуха и расхода газа при использовании РСА турбокомпрессора по сравнению со штатным вариантом, который повышается с утяжелением винтовой характеристики. Это вызвано повышением мощности турбокомпрессора по причине снижения эффективной площади проходного сечения при повороте лопаток.

Переход на утяжеленную винтовую характеристику приводит к снижению коэффициента остаточных газов. В варианте с РСА этот коэффициент растет на режимах долевых нагрузок, что может увеличить интенсивность отложений нагара на внутренних поверхностях цилиндропоршневой группы.

Увеличение коэффициента остаточных газов не приводит к снижению коэффициента наполнения. Это связано с уменьшением частоты вращения коленчатого вала при утяжелении винтовой характеристики и увеличением времени на продувку и наполнение цилиндра свежим зарядом воздуха. Незначительное изменение коэффициента наполнения при утяжелении винтовой характеристики свидетельствует о достаточно высокой эффективности продувочно-выпускной системы дизеля.

Использование РСА позволило повысить суммарный коэффициент избытка воздуха на режимах долевых нагрузок, прирост которого с утяжелением винтовой характеристики повышается.

Список литературы

1. Колюков В.Л. Улучшение эксплуатационных параметров четырехтактного дизеля, работающего по винтовой характеристике, путем использования регулируемого соплового аппарата турбокомпрессора при увеличении противодавления на выпуске //Вестник керченского государственного морского технологического университета. Керчь, 2022. Вып. 3. -С.73-89.
2. Turbocharger aftermarket Honeywell Garrett. Garrett variable geometry turbochargers [Text]: Cheshire: Honeywell U.K. LTD, 2003.-32 p. (30e)
3. How does Variable Turbine Geometry Work. [Электронный ресурс]. Режим доступа к статье: <http://paultan.org/archives/2006/08/16/how-does-variable-turbine-geometry-work/>.

4. Конюков В.Л. Проектная оценка диапазона допустимых режимов эксплуатации судового двухтактного дизеля. Научные проблемы водного транспорта. Нижний-Новгород 2024, №78 (1) С. 97-106. DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi78/418>
5. Гаврилов В.С., Камкин С.В., Шмелев В.П. Техническая эксплуатация судовых дизельных установок. Учебное пособие для вузов. – Изд. 3-е перераб. и доп. М.: Транспорт, 1985. – 288 с.
6. Камкин С.В., Возницкий И.В., Шмелев В.П. Эксплуатация судовых дизелей. М.: Транспорт, 1990. 344 с.
7. Дьяченко Н.Х., Костин А.К., Пугачев Б.П., Русинов Р.К., Мельников Г.В. Теория двигателей внутреннего сгорания. Рабочие процессы. - Изд. 2-едоп. И перераб. Л.: Машиностроение, 1974. – 552 с.
8. Шароглазов Б.А., Фарафонов М.Ф., Клементьев В.В. Двигатели внутреннего сгорания: моделирование и расчет процессов. Челябинск: Изд. ЮУрУ.2004. – 344 с.
9. Test Results of Shop Trial. Marine main engine 7S50MC. MITSUI MAN B&W, 200 –17 p.
10. Самсонов В.И., Худов Н.И. Двигатели внутреннего сгорания морских судов. М.: Транспорт, 1990. 368 с.
11. Ваншейдт В.А. Судовые двигатели внутреннего сгорания. Л. Судостроение, 977.392 с.
12. Свидетельство RU2022685277 Российская Федерация. Программа расчета параметров рабочего процесса дизеля с наддувом «Diesel K»: программа для ЭВМ / А.Н. Горбенко. – Оpubл. 22.12.2022, Бюл. №1.

References

1. Konyukov V.L. Uluchsheniye ekspluatatsionnykh parametrov chetyrehtaktnogo dizelya. rabotayushchego po vintovoy kharakteristike. putem ispolzovaniya reguliruyemogo soplovoogo apparata turbokompressora pri uvelichenii protivodavleniya na vypuske [Improving the operational parameters of a four-stroke diesel engine operating according to the screw characteristic by using an adjustable turbocharger nozzle with an increase in the back pressure at the outlet]. //Vestnik kerchenskogo gosudarstvennogo morskogo tekhnologicheskogo universiteta. [Bulletin of the Kerch State Marine Technological University.], Kerch. 2022. Vyp. 3. -pp.73-89. (In Russian)
2. Turbocharger aftermarket Honeywell Garrett. Garrett variable geometry turbochargers [Text]: Cheshire: Honeywell U.K. LTD, 2003.-32 p. (30e)
3. How does Variable Turbine Geometry Work. [Электронный ресурс]. Режим доступа к статье: <http://paultan.org/archives/2006/08/16/how-does-vfrbable-turbine-geometry-work/>
4. Konyukov V.L. Proektnaya ocenka diapazona dopustimyh rezhimov ekspluatatsii sudovogo dvuhtaktnogo dizelya. [Design assessment of the range of permissible operating modes of a marine two-stroke diesel engine] Nauchnye problemy vodnogo transporta. [Scientific problems of water transport] Nizhnij-Novgorod 2024, №78 (1) P. 97-106. DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi78/418> (In Russian)
5. Gavrilov V.S., Kamkin S.V., Shmelev V.T. Tekhnicheskaya ekspluatatsiya sudovykh dizelnykh ustanovok [Technical operation of marine diesel installations]. [Tekst] Uchebnoye posobiye dlya vuzov. 3-e izdaniye pererab. i dop M.: Transport. 1985. – 288 p. (In Russian)
6. Kamkin S.V., Voznitsky I.V., Shmelev V.P. Ekspluatatsiya sudovykh dizelej [Operation of marine diesel engines]. М., Transport, 1990, 344 p. (In Russian).
7. D'yachenko N.H., Kostin A.K., Pugachev B.P., Rusinov R.K., Mel'nikov G.V. Teoriya dvigatelej vnutrennego sgoraniya. Rabochie processy. [Theory of internal combustion engines. Working processes] - Izd. 2-edop. I pererab. L.: Mashinostroenie, 1974. – 552 p. (In Russian).
8. Sharoglazov B.A., Farafontov M.F., Klement'ev V.V. Dvigateli vnutrennego sgoraniya: modelirovanie i raschet processov. [Internal combustion engines: modelling and process calculation]. Chelyabinsk: Izd. YuUrU.2004. – 344 p. (In Russian).
9. Test Results of Shop Trial. Marine main engine 7S50MC. MITSUI MAN B&W, 2004–17 p.
10. Samsonov V.I., Khudov N.I. Dvigateli vnutrennego sgoraniya morskikh sudov. [Internal combustion engines of marine vessels]. М., Transport, 1990. 368 p. (In Russian).
11. Vanshejdt V.A. Sudovye dvigateli vnutrennego sgoraniya [Marine internal combustion engines]. L., Sudostroenie, 1977, 392 p. (In Russian).
12. Svidetelstvo RU2022685277 Rossiyskaya Federatsiya. Programma rascheta parametrov rabocheho protsesssa dizelya s nadduvom «Diesel K»: programma dlya EVM Certificate

RU2022685277 Russian Federation. [The program for calculating the parameters of the working process of a supercharged diesel "Diesel K": computer program] / A.N. Gorbenko. – Publ. 22.12.2022. Вып. №1. (In Russian)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT AUTHORS

Конюков Вячеслав Леонтьевич, канд. техн. наук, доцент кафедры судовых энергетических установок, Керченский государственный морской технологический университет, 298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82, seykgmtu@mail.ru

Viacheslav L. Konyukov, Ph.D. (Engin.), Associate Professor at the department of ship power plants Kerch State Maritime Technological University, 298309, Republic of Crime, Kerch, Ordzhonikidze str., 82, seykgmtu@mail.ru

Статья поступила в редакцию 25.02.2025; опубликована онлайн 20.03.2025.
Received 25.02.2025; published online 20.03.2025.