

УДК 621.43.018.7:536.8
DOI: 10.37890/jwt.vi79.494

Расширение диапазона допустимых нагрузок судового четырехтактного дизеля при использовании регулируемого соплового аппарата турбокомпрессора

В.Л. Конюков

Керченский государственный морской технологический университет, г. Керчь, Россия

Аннотация. В работе выполнен анализ влияния регулируемого соплового аппарата турбокомпрессора на параметры и критерии, определяющие тепловую и механическую напряженность главного судового четырехтактного дизеля. Разработана методика построения ограничительных характеристик механической и тепловой напряженности с использованием аппроксимационных зависимостей параметров и критериев, полученных расчетно-теоретическим способом. Выявлены основные показатели, ограничивающие диапазон предельно допустимых нагрузок дизеля по механической и тепловой напряженности в исходном варианте и в варианте с регулируемым сопловым аппаратом. Установлено, что увеличение угла поворота лопаток регулируемого соплового аппарата до предельно допустимого значения вызывает снижение параметров тепловой напряженности, в результате чего расширяется зона предельно допустимых режимов эксплуатации дизеля. В то же время повышаются параметры и критерии, определяющие механическую напряженность дизеля, но сокращение зоны предельно допустимых нагрузок по механической напряженности не снижает диапазон предельно допустимых нагрузок, установленный изменением показателей тепловой напряженности.

Ключевые слова: дизель, регулируемый сопловой аппарат, турбокомпрессор, эксплуатационные параметры, винтовая характеристика, коэффициент утяжеления, тепловая и механическая напряженность.

Expansion of the range of permissible loads of a marine four-stroke diesel engine when using an adjustable turbocharger nozzle apparatus

Viacheslav L. Konyukov

Kerch State Marine Technological University, Kerch, Russia

Abstract. The paper analyses the influence of the adjustable turbocharger nozzle apparatus on the parameters and criteria determining the thermal and mechanical stress of the main marine four-stroke diesel engine. The methodology of construction of limiting characteristics of mechanical and thermal stress using approximation dependences of parameters and criteria obtained by calculation-theoretical method is developed. The main parameters limiting the range of maximum permissible diesel engine loads on mechanical and thermal stress in the initial variant and in the variant with adjustable nozzle apparatus are revealed. It is established that the increase in the angle of rotation of blades of the adjustable nozzle apparatus up to the maximum permissible value causes a decrease in the parameters of thermal stress, as a result of which the zone of maximum permissible modes of operation of the diesel engine expands. At the same time, the parameters and criteria determining the mechanical stress of the diesel engine increase, but the reduction of the zone of maximum permissible loads on mechanical stress does not reduce the range of maximum permissible loads established by changing the thermal stress parameters.

Keywords: diesel engine, adjustable nozzle unit, turbochargers, operational parameters, screw characteristic, weighting coefficient, thermal and mechanical stress.

Введение

Изменение режима работы главного судового двигателя сопровождается, как правило, изменением соотношения эффективной мощности и частоты вращения [1]. Практически, при переходе на новый режим эксплуатации меняется винтовая характеристика, которая определяется конструктивными особенностями корпуса судна, гребного винта, обрастанием корпуса и условиями плавания (осадкой, метеорологической обстановкой, состоянием акватории, режимом буксирования и т.п.) [2]. Снижение частоты вращения главного двигателя при утяжелении винтовой характеристики приводит к уменьшению мощности турбокомпрессора по причине понижения расхода воздуха и, как следствие, расхода газа [3], [4]. Одновременно при этом падает давление наддува, в результате чего уменьшается давление рабочего тела в характерных точках цикла. Ранее выполненные исследования по влиянию непосредственного управления расходом наддувочного воздуха регулируемым сопловым аппаратом (РСА) турбокомпрессора показали высокую эффективность такого воздействия на режимах долевых нагрузок [5], [6]. Использование РСА, прежде всего, повышает экономичность дизеля и способствует снижению параметров и критериев, определяющих тепловую напряженность цилиндропоршневой группы [7]. На основании этого можно сделать предположение об увеличении диапазона допустимых режимов эксплуатации дизеля при управлении параметрами наддувочного воздуха поворотом лопаток РСА.

Производители дизелей на основании исследований и опыта эксплуатации назначают ограничительные характеристики, которые определяют диапазон предельно допустимых и рекомендуемых режимов эксплуатации. Эти фирмы не считают возможным делиться результатами исследований и критериями, на основании которых назначены ограничительные характеристики даже с персоналом, обеспечивающим эксплуатацию оборудования [2], [8].

В работе [9] выполнен анализ соответствия ограничительных характеристик определяющих параметров и критериев тепловой и механической напряженности, полученных расчетно-теоретическим способом, ограничительным характеристикам, установленным заводом-изготовителем для судового четырехтактного дизеля [10]. Установлено, что заводские ограничительные характеристики предельно допустимых и рекомендуемых режимов эксплуатации соответствуют расчетным ограничительным характеристикам, полученным для максимальной температуры цикла и температуры газа в конце процесса расширения в цилиндре. Максимальная температура цикла влияет на термические напряжения элементов цилиндропоршневой группы (ЦПГ) дизеля, а температура газа в конце процесса расширения в цилиндре влияет на тепловое состояние выпускного клапана [11]. Характеристики, построенные по этим температурам можно отнести к ограничительным характеристикам тепловой напряженности элементов ЦПГ дизеля.

Целью исследования является анализ эффективности регулируемого соплового аппарата для расширения диапазона допустимых нагрузок главного судового четырехтактного дизеля при работе по винтовой характеристике.

Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследований принят широко распространенный на морских судах судовой четырехтактный дизель марки 8L58/64 фирмы MAN-B&W, работающий на винт фиксированного шага (ВФШ). Номинальные характеристики дизеля приведены в работе [7]. Исследования проводились расчетно-теоретическим способом с использованием программы расчета рабочего процесса дизеля «Diesel-K» [12]. Методика исследований приведена в работе [9].

Коэффициент утяжеления винтовой характеристики \bar{C} определялся как отношение мощности утяжеленного режима к мощности номинального режима,

соответствующего номинальной винтовой характеристике ($\bar{C} = 1,0$), для конкретной частоты вращения и изменялся в интервале $0,25 \leq \bar{C} \leq 3,6$, что позволило охватить диапазон всех допустимых режимов эксплуатации. При этом относительная мощность $\bar{N}_e = N_e/N_{e0}$ изменялась в интервале $0,25 \leq \bar{N}_e \leq 1,0$. Частота вращения при переходе на утяжеленную или облегченную винтовую характеристику вычислялась по выражению

$$n = n_0 \sqrt[3]{\frac{\bar{N}_e}{\bar{C}}} \quad (1)$$

Оценка надежности дизеля при изменении условий его эксплуатации проводилась с помощью основополагающих параметров и критериев, определяющих его механическую и тепловую напряженность [2, 3, 9]. Для оценки механической напряженности дизеля приняты критерии: максимальное давление сгорания топлива p_z ; среднее эффективное давление цикла p_e ; среднее давление по времени цикла p_c ; максимальная скорость нарастания давления $\frac{dp}{d\varphi}$; степень повышения давления при сгорании топлива $\lambda = \frac{p_z}{p_c}$. Тепловая напряженность элементов ЦПГ оценивалось параметрами и критериями: температурой газа за цилиндром при условии перемешивания газа с продувочным воздухом T_i ; средней по времени температурой цикла T_{cp} ; максимальной температурой газа по циклу T_z ; температурой газа в конце процесса расширения в цилиндре T_b ; средним тепловым потоком через стенки цилиндра к охлаждающей воде q_o ; условным критерием теплонапряженности поршня (критерий Костина) K_n ; условным критерием теплонапряженности цилиндра (критерий Камкина) K_c ; относительной потерей теплоты в охлаждающую воду q_w . В качестве предельных величин перечисленных параметров и критериев принимались значения, полученные в результате заводских тестовых испытаний и теплового расчета дизеля для номинального режима.

Построение ограничительных характеристик, соответствующих определяющим параметрам и критериям напряженности дизеля выполнялось по результатам тепловых расчетов дизеля для принятых диапазонов \bar{C} и \bar{N}_e , при условии максимально допустимого для данного режима поворота лопаток РСА, обеспечивающего $p_z = p_{z0}$ или принятой минимально допустимой степени понижения давления при продувке цилиндров ($e_{пр} = 1,05$). Предварительно, для каждого режима в исходном варианте (без РСА) методом последовательных приближений вычислялось давление наддува по гидравлической характеристике турбины, полученной по результатам тестовых испытаний дизеля и тепловых расчетов.

Обработка результатов исследований проводилась для относительных значений параметров, которые находились из соотношений

$$\bar{B} = \frac{B}{B_0}, \quad \bar{n} = \frac{n}{n_0} \quad (2)$$

где B – значение параметра или критерия, соответствующего частоте вращения n конкретной винтовой характеристики;

B_0, n_0 – значения соответственно параметра и частоты вращения, соответствующие стопроцентной мощности конкретной винтовой характеристики.

По результатам тепловых расчетов определялись регрессионные зависимости между частотой вращения и параметром, характеризующим тепловую или механическую напряженность. С помощью регрессионных уравнений вычислялась частота вращения коленчатого вала, соответствующая предельному значению исследуемого параметра. По полученной, таким образом, частоте вращения коленчатого вала определялась мощность дизеля для каждой утяжеленной характеристики, определяемой коэффициентом утяжеления \bar{C} . Эта мощность играла роль предельно допустимого значения для соответствующего эксплуатационного

параметра, превышение которой вызывало превышение допустимой напряженности по исследуемому параметру [9]. В качестве примера на рис.1 приведена регрессионная зависимость относительной частоты вращения коленчатого вала от относительного среднего эффективного давления.

По полученному уравнению (приведено на диаграмме) находилась частота вращения, соответствующая предельному значению \bar{p}_e для каждой утяжеленной винтовой характеристики. Предельно допустимое значение относительной мощности, соответствующее \bar{n} находилось по выражению

$$\bar{N}_e = \bar{C} \cdot \bar{n}^3. \tag{3}$$

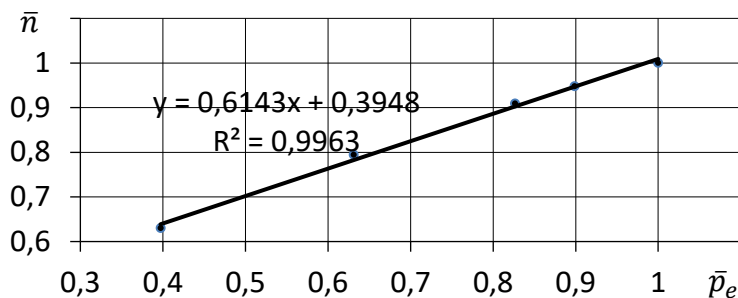


Рис. 1. Зависимость относительной частоты вращения от относительной величины среднего эффективного давления

Результаты исследования и их обсуждение

Уменьшение угла установки лопаток соплового аппарата в результате их поворота приводит к увеличению мощности турбины турбокомпрессора. При этом повышается давление наддува и, соответственно, максимальное давление цикла p_z , а так же снижается степень понижения давления при продувке цилиндров. Эти параметры являются ограничителями при повороте лопаток РСА. На рис.2 приведены зависимости предельно допустимого угла поворота лопаток РСА θ от относительной мощности дизеля при различных коэффициентах утяжеления винтовой характеристики. Из рисунка следует, что для облегченных винтовых характеристик диапазон изменения θ снижается, а для утяжеленных винтовых характеристик повышается. Одновременно, с увеличением мощности турбокомпрессора, повышается коэффициент избытка воздуха при горении и снижается температура газа в характерных точках цикла. При этом снижаются параметры и критерии тепловой напряженности деталей ЦПГ дизеля.

Анализ ограничительных характеристик тепловой и механической напряженности ЦПГ этого дизеля, выполненный в работе [9] показал, что определяющими параметрами тепловой напряженности являются температуры T_z и T_b . Ограничительные характеристики, построенные по этим температурам, практически, совпадают. Фирма MAN-B&W для этого дизеля назначила характеристику предельно допустимой нагрузки и характеристику рекомендуемых режимов эксплуатации [10]. Эти характеристики представляют, практически, эквидистантные кривые относительно характеристик $T_z = \text{const}$ ($T_b = \text{const}$), первая из которых проходит через точку $\bar{N}_e = 0,95$, $\bar{n} = 0,95$, вторая, через точку $\bar{N}_e = 0,85$, $\bar{n} = 1,0$.

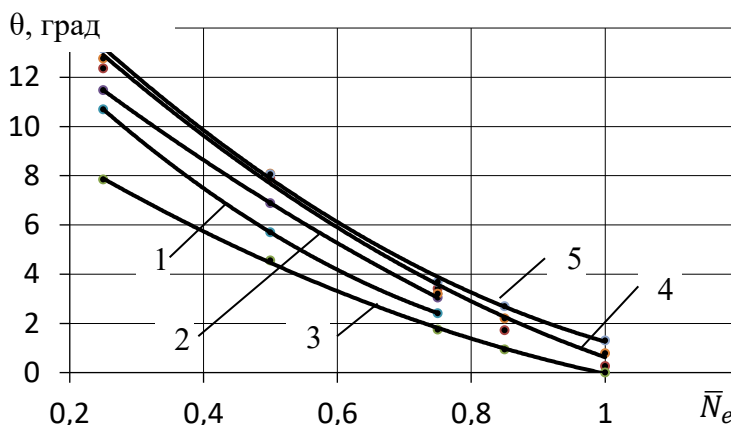


Рис. 2. Зависимость θ от нагрузки дизеля для различных коэффициентов утяжеления: 1- $\bar{C}=0,5$; 2- $\bar{C}=0,75$; 3- $\bar{C}=1,0$; 4- $\bar{C}=1,4$; 5- $\bar{C}=2,0$

На рис. 3 представлены определяющие ограничительные характеристики тепловой напряженности ЦПГ, полученные расчетным путем. Здесь: 1 – характеристика $p_e=\text{const}$ ($M_e=\text{const}$); 2 – характеристика предельно допустимой нагрузки (назначена фирмой MAN-B&W); 3 – характеристика $T_z=\text{const}$; 4 – характеристика $T_b=\text{const}$; 5 – характеристика $T_{cp}=\text{const}$; пунктирными линиями обозначены характеристики исходного варианта, сплошными варианта с РСА.

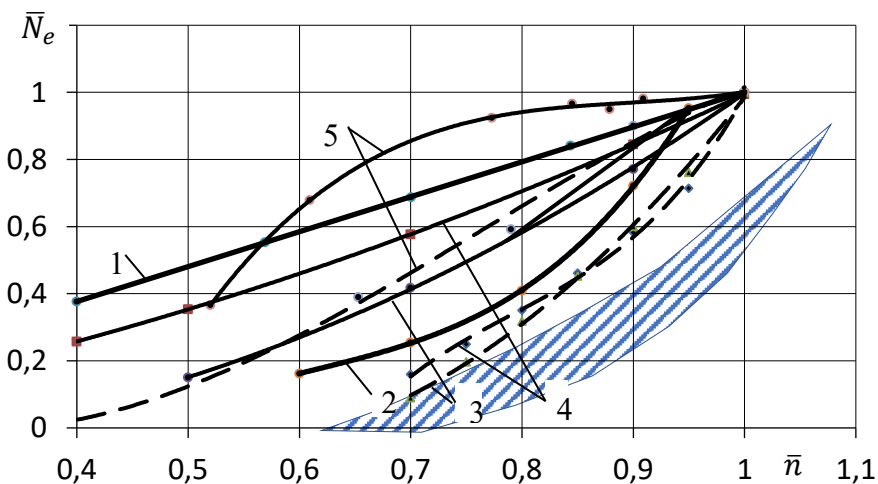


Рис. 3. Определяющие ограничительные характеристики тепловой напряженности

Исследования показали, что использование РСА турбокомпрессора расширяет зону допустимых режимов по всем параметрам и критериям тепловой напряженности дизеля. При этом определяющей ограничительной характеристикой становится кривая $T_z=\text{const}$. Таким образом, для $\bar{N}_e=0,5$ диапазон предельно допустимых режимов эксплуатации дизеля по тепловой напряженности увеличивается на 30%. Это справедливо, если за предельно допустимое значение T_z принять величину, соответствующую номинальному режиму ($\bar{N}_e=1,0$, $\bar{n}=1,0$). Диапазон расширения допустимых режимов эксплуатации на рис.3 выделен штриховкой.

Повышение давления наддува путем поворота лопаток РСА турбокомпрессора приводит к увеличению давления рабочего тела в характерных точках цикла, что повышает механическую напряженность дизеля. На рис.4 показаны определяющие ограничительные характеристики механической напряженности. Здесь: 1 – характеристика $p_e = \text{const}$ ($M_e = \text{const}$); 2 – характеристика предельно допустимой нагрузки (назначена фирмой MAN-B&W); 3 – характеристика $p_z = \text{const}$; 4 – характеристика $(\frac{dp}{d\phi}) = \text{const}$; 5 – характеристика $\lambda = \text{const}$; пунктирными линиями обозначены характеристики исходного варианта, сплошными варианта с РСА. Для исходного варианта характеристика $\lambda = \text{const}$ имеет крутой характер по причине существенного снижения степени повышения давления при горении топлива, в то время как для варианта с РСА уменьшение нагрузки повышает λ .

Исследования показали, что поворот лопаток РСА в установленном интервале углов вызывает существенное увеличение динамических показателей механической напряженности. Если в исходном варианте определяющей характеристикой механической напряженности была зависимость $p_e = \text{const}$ ($M_e = \text{const}$), то в варианте с РСА определяющей становится характеристика $(\frac{dp}{d\phi}) = \text{const}$. Следует отметить, что характеристика $(\frac{dp}{d\phi}) = \text{const}$ практически совпадает с определяющей ограничительной характеристикой тепловой напряженности $T_z = \text{const}$. В связи с этим расширение диапазона предельно допустимых режимов по тепловой напряженности при использовании РСА не ограничивается определяющими характеристиками механической напряженности.

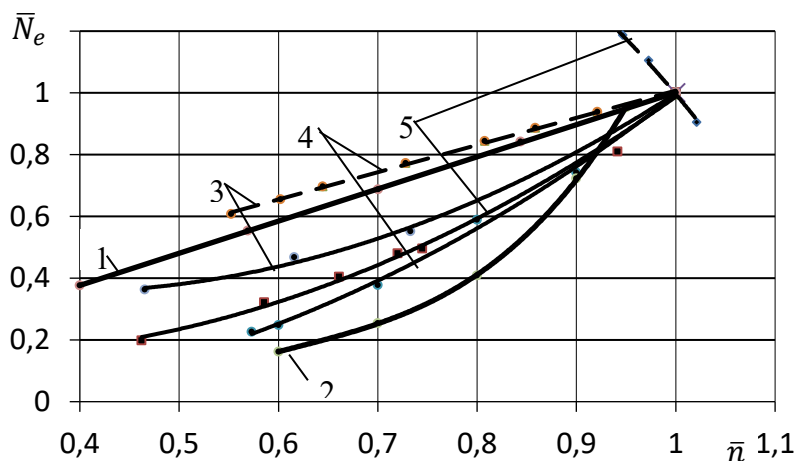


Рис. 4. Определяющие ограничительные характеристики механической напряженности

Выводы

В работе выполнено сопоставление ограничительных характеристик, назначенных дизельной фирмой и ограничительных характеристик, полученных по определяющим параметрам механической и тепловой напряженности дизеля в исходном варианте и варианте с РСА на основании расчетно-теоретических исследований рабочего процесса четырехтактного дизеля. Это позволило расширить диапазон допустимых режимов эксплуатации путем непосредственного воздействия на расход наддувочного воздуха поворотом лопаток РСА.

Использование РСА турбины турбокомпрессора позволяет снизить определяющие показатели и критерии тепловой напряженности и существенно расширить диапазон предельно допустимых режимов эксплуатации. В исходном

варианте определяющей ограничительной характеристикой тепловой напряженности является зависимость $T_b = \text{const}$, влияющая на тепловое состояние выпускного клапана, что соответствует результатам, полученным в работе [11]. В варианте с РСА при максимально допустимом угле поворота лопаток определяющей характеристикой тепловой напряженности становится зависимость $T_z = \text{const}$, влияющая на термические напряжения элементов ЦПГ.

Использование РСА турбокомпрессора вызывает заметное повышение параметров и критериев механической напряженности, особенно динамических, и определяющей ограничительной характеристикой механической напряженности становится зависимость $(\frac{dp}{d\varphi}) = \text{const}$. При этом увеличение параметров и критериев механической напряженности не снижает диапазон предельно допустимых нагрузок, установленный изменением показателей тепловой напряженности.

Список литературы

1. 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.
2. Кацман Ф.М. Эксплуатация пропульсивного комплекса морского судна. М.: Транспорт, 1987 – 223 с.
3. Олейников Б. Н. Техническая эксплуатация дизелей судов флота рыбной промышленности. М.: Агропромиздат, 1986. 269 с.
4. Камкин С.В., Возницкий И.В., Шмелев В.П. Эксплуатация судовых дизелей. М.: Транспорт, 1990. 344 с.
5. Turbocharger aftermarket Honeywell Garrett. Garrett variable geometry turbochargers [Text]: Cheshire: Honeywell U.K. LTD, 2003.-32 p. (30e)
6. How does Variable Turbine Geometry Work. [Электронный ресурс]. Режим доступа к статье: <http://paultan.org/archives/2006/08/16/how-does-vfrbale-turbine-geometry-work/>.
7. Конюков 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.
8. Васькевич Ф.А., Зубко С.С. Оценка параметров рабочего процесса главного судового дизеля по данным эксплуатационных испытаний. Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки, 2018, №3,с. 89-94.
9. Конюков В.Л. Оценка диапазона допустимых нагрузок судового четырехтактного дизеля на основе тепловых расчетов. //Вестник керченского государственного морского технологического университета. Керчь, 2023. Вып. 1. -С.73-81.
10. Shop Test Protocol. Marine main engine 8 L 58/64. – Augsburg: MAN-B&W, 2006. – 27 p.
11. Горб С.С., Сандлер А.К., Будуров Н.И. Повышение эффективности работы главного двигателя корректировкой упора гребного винта. Автоматизация судовых технических средств. Вып. 25, 2019, с. 35-52
12. Свидетельство RU2022685277 Российская Федерация. Программа расчета параметров рабочего процесса дизеля с наддувом «Diesel-K»: программа для ЭВМ / А.Н. Горбенко. – Опул. 22.12.2022, Бюл. №1.

References

1. 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)
2. Katsman F.M. Ekspluatatsiya propulsivnogo kompleksa morskogo sudna. [Operation of a propulsive complex of a marine vessel]. M.: Transport. 1987 – 223 p. (In Russian)
3. Oleinikov B. N. Tekhnicheskaya ekspluatatsiya dizelei sudov flota rybnoi promyshlennosti [Technical operation of diesel engines on fishing vessels]. Moscow, Agropromizdat, 1986. 269 p.

4. Kamkin S.V., Voznitsky I.V., Shmelev V.P. Ekspluatatsiya sudovykh dizelej [Operation of marine diesel engines]. M., Transport, 1990, 344 p. (In Russian).
5. Turbocharger aftermarket Honeywell Garrett. Garrett variable geometry turbochargers [Text]: Cheshire: Honeywell U.K. LTD, 2003.-32 p. (30e)
6. How does Variable Turbine Geometry Work. [Электронный ресурс]. Режим доступа к статье: <http://paultan.org/archives/2006/08/16/how-does-vfbable-turbine-geometry-work/>.
7. Konyukov V.L. Uluchsheniye ekspluatatsionnykh parametrov chetyrekhtaktnogo dizelya. rabotayushchego po vintovoy kharakteristike. putem ispolzovaniya reguliruyemogo soploвого 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)
8. Vaskevich F.A., Zubko S.S. Otsenka parametrov rabocheго protsessa glavnogo sudovogo dizelya po dannym ekspluatatsionnykh ispytaniy. [Evaluation of the parameters of the working process of the main marine diesel engine according to operational tests] Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskiye nauki. [News of universities. The North Caucasus region. Technical sciences], 2018. №3.pp. 89-94. (In Russian)
9. Konyukov V.L. Ocenka diapazona dopustimyykh nagruzok sudovogo chetyrekhtaktnogo dizelya na osnove teplovykh raschetov.[Estimation of the range of permissible loads of a marine four-stroke diesel engine based on thermal calculations]. //Vestnik kerchenskogo gosudarstvennogo morskogo tekhnologicheskogo universiteta. [Bulletin of the Kerch State Marine Technological University] Kerch, 2023. Vyp. 1. -pp.73-81. (In Russian)
10. Shop Test Protocol. Marine main engine 8 L 58/64. – Augsburg: MAN-B&W, 2006. – 27 p.
11. Gorb S.S., Sandler A.K., Budurov N.I. Povysheniye effektivnosti raboty glavnogo dvigatelya korrektsionnoy upora grebnogo vinta. [Improving the efficiency of the main engine by adjusting the propeller stop]. Avtomatizatsiya sudovykh tekhnicheskikh sredstv. [Automation of ship technical means]. Vyp. 25. 2019. pp. 35-52 (In Russian)
12. Gorbenko A.N. Programma rascheta parametrov rabocheго processa dizelya s nadduvom «Diesel-K»: programma dlya EVM [Program for calculating the working process parameters of a supercharged diesel engine “Diesel-K”: computer program] Certificate RF RU2022685277, Publ. 12.22.2022, Bulletin № 1. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT AUTHORS

Конюков Вячеслав Леонтьевич, к. т. н.,
доцент кафедры судовых энергетических
установок, Керченский государственный
морской технологический университет,
298309, Республика Крым, г. Керчь, ул.
Орджоникидзе, 82, e-mail: seykgmtu@mail.ru

Viacheslav L. Konyukov, Ph.D. (Eng.),
Associate Professor at the Department of ship
power plants, Kerch State Maritime
Technological University, 298309, Republic of
Crimea, Kerch, Ordzhonikidze str., 82, e-mail:
seykgmtu@mail.ru

Статья поступила в редакцию 22.03.2024; опубликована онлайн 20.06.2024.
Received 22.03.2024; published online 20.06.2024.