

УДК 621.125

DOI: 10.37890/jwt.vi84.639

Результаты экспериментального исследования теплофизических параметров современных главных высокооборотных электронно-управляемых двигателей

А.В. Лисаченко

ORCID: 0009-0007-9537-3692

Н.И. Николаев

ORCID: 0000-0003-1319-3609

В.В. Герасиди

ORCID: 0009-0008-1673-3192

*Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова,
Новороссийск, Россия*

Аннотация. В работе представлены результаты теплотехнических испытаний современных электронно-управляемых высокооборотных главных двигателей фирмы Caterpillar серии 3500, установленных на морских судах. Экспериментальные исследования проводились в течение 10 лет на выборке из 80 двигателей, эксплуатирующихся на морских буксирах. Накопленный опыт в проведении экспериментальных исследований контроля технического состояния безразборным методом диагностики позволит перейти от классических подходов технической эксплуатации до новых, входящих в систему удаленного контроля и управления судовых технических средств автономных судов в эксплуатации. Методика экспериментального исследования включает классический подход к проведению таких испытаний и современный подход с передачей данных в офис компании судовладельца. В ходе исследований получен обширный информационно-статистический банк данных по теплофизическим параметрам (давление наддувочного воздуха, температура отработавших газов, расход топлива) для моделей двигателей 3512, 3516 в широком диапазоне нагрузок, преимущественно на частичных режимах работы. Построены обобщенные зависимости теплофизических параметров для каждой модели. Показано, что накопленный опыт диагностики позволяет перейти от классических методов эксплуатации к системам удаленного мониторинга и управления судовыми техническими средствами, что является основой для развития автономного судовождения. Разработанная методика может быть рекомендована для применения на других типах высокооборотных двигателей морских судов.

Ключевые слова: электронно-управляемый двигатель, контроль, техническое состояние, диагностика, методика, экспериментальное исследование.

Results of an experimental study of the thermophysical parameters of modern high-speed electronically controlled main engines

Alexey V. Lisachenko

ORCID: 0009-0007-9537-3692

Nikolay I. Nikolaev

ORCID: 0000-0003-1319-3609

Viktor V. Gerasidi

ORCID: 0009-0008-1673-3192

Admiral Ushakov State Maritime University, Novorossiysk, Russia

Abstract: This paper presents the results of thermotechnical tests of modern electronically controlled high-speed main engines from the Caterpillar 3500 series, installed on marine vessels. Experimental studies were conducted over 10 years on a sample of 80 engines operating on marine tugboats. A condition monitoring methodology was developed, combining classical testing approaches with modern methods of remote data transmission and analysis. The research resulted in an extensive informational and statistical database on thermophysical parameters (boost pressure, exhaust gas temperature, fuel consumption) for engine models 3512, 3516 under a wide range of loads, predominantly at partial modes. Generalized dependencies of the thermophysical parameters for each model were constructed. It is shown that the accumulated diagnostic experience enables a transition from classical maintenance methods to remote monitoring and control systems for ship technical equipment, forming a basis for the development of autonomous navigation. The developed methodology can be recommended for application to other types of marine high-speed engines.

Keywords: high-speed diesel engine, electronic control system, technical diagnostics, thermophysical parameters, partial loads, marine power plant, remote monitoring

Развитие морского флота Российской Федерации, включая суда обеспечения, буксиры и суда типа «река-море», характеризуется активным внедрением современных высокооборотных двигателей (ВОД) с электронными системами управления. Выполненный анализ, построенных морских судов портового флота в РФ, показал, что (рисунок 1): большинство двигателей импортного производства; 69% доли ВОД - это двигатели фирмы Caterpillar; значительную часть времени эксплуатации ВОД работают на частичных нагрузках (менее 50% от номинальной); наработка ВОД составляет до 2500 часов в год; такие ВОД предполагают регулярные регламентные работы, которые в настоящее время затруднены; в процессе эксплуатации ВОД зарождаются отказы и повреждения на частичных нагрузках, а существующая система предупреждения и защиты двигателей, например, Caterpillar, ориентирована на режимы работы двигателей близким к номинальным.

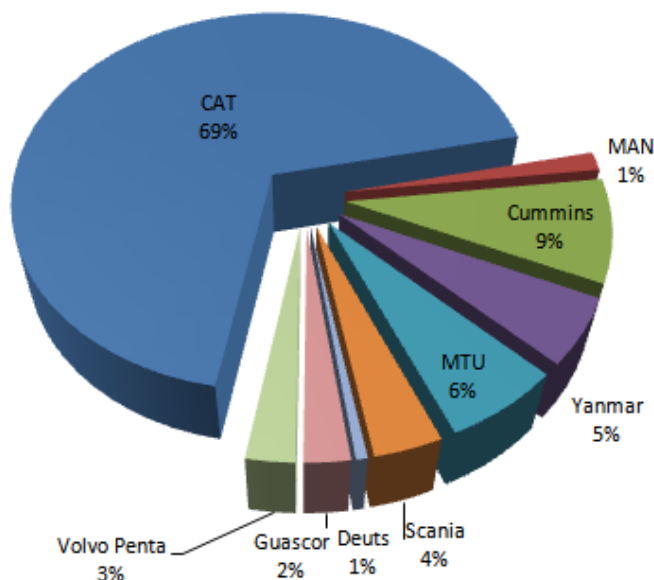


Рис. 1. Диаграмма распределения по производителям судовых высокооборотных двигателей, устанавливаемых в качестве главных [1]

Отсутствие сервисного обслуживания электронно-управляемых ВОД, возникающие отказы на частичных нагрузках и повреждения элементов ВОД и т.д.,

приводят к снижению безопасности мореплавания, простоя судов, значительным затратам судовладельцев на ремонт. В связи с этим, актуальны задачи, связанные с комплексом мер по контролю, обобщению и разработке предложений по нормированию параметров работы ВОД на частичных нагрузках.

Анализ литературных источников показал, что большая часть работ российских ученых и зарубежных посвящена теоретическому исследованию энергетического оборудования. Для главных ВОД описываются общие признанные недостатки технической эксплуатации или конструкционные особенности двигателей. Однако ценной информации, касающейся эксплуатации современных главных ВОД, и в разных отраслях промышленности и на флоте, работающих на различных видах топлива, нет. Например, теплотехнический контроль ВОД в эксплуатации по значениям важных параметров для работы ВОД, по которым можно было бы оценить техническое состояние (хорошее, удовлетворительное, неудовлетворительное) и спрогнозировать возможную неисправность главных ВОД, для предотвращения аварий, которые приведут к нарушению безопасности мореплавания и большим эксплуатационным затратам.

Контроль за качеством процесса сгорания топлива и улучшения эксплуатационных показателей судовых ВОД и СОД рассматривается в работах [2-7]. Выполняется обобщение рабочих параметров ВОД и СОД и их диагностика в процессе эксплуатации на основе показателей мощности, стохастических процессов судовой электрической системы. Рассматриваются основные понятия вибрационного мониторинга состояния и диагностики энергетического оборудования в целом.

Однако, в настоящее время, классификационные общества вводят в практику методы освидетельствования судов на основе данных о фактическом состоянии, с применением методов и средств технического диагностирования МОД и СОД в эксплуатации [8]. Таким образом, разработка и внедрение методики контроля ТС ВОД сегодня является актуальной, как для судовладельца в экономии эксплуатационных расходов, так и для надзорных органов при освидетельствовании механизмов.

Таким образом, анализ условий эксплуатации, литературных источников, отказов и неисправностей современных ВОД показывает:

- ВОД фирмы «Caterpillar» находят широкое применение на морских судах вспомогательного флота РФ;
- двигатели автоматизированы и управление рабочим процессом осуществляет электронная система, в которую запрограммированы постоянные предельные значения рабочих параметров независимо от режима эксплуатации;
- основными режимами работы главных ВОД являются режимы малых и частичных нагрузок;
- малые часы наработки до 2000-2500 часов в год;
- кратковременные режимы главных ВОД во всем диапазоне изменения нагрузки от холостого хода до номинальной;
- все отказы и повреждения, элементов ВОД, были выявлены в ходе контроля теплофизических параметров при эксплуатации на частичных режимах и режимах пониженных нагрузок.

Целью работы является - формирование комплекса научно-обоснованных технических решений оценки технического состояния высокооборотных двигателей Caterpillar (CAT) морских судов на основе контроля, обобщения и разработки рекомендаций по нормированию теплофизических параметров в широком диапазоне изменения режимов работы.

Объектами экспериментального исследования являются электронно-управляемые ВОД фирмы "Caterpillar" моделей CAT 3512B и CAT 3516B, установленные в качестве главных двигателей на судах вспомогательного флота серии "Б", "Т". Двигатели соответствуют международным экологическим нормам Tier 3/Stage IIIA

благодаря технологии ACERT (Advanced Combustion Emissions Reduction Technology), которая интегрирует системы топливоподачи, газообмена и электронного управления [9, 10].

Основной задачей теплотехнических испытаний ВОД, является анализ работы пропульсивной установки судна в целом и определение технического состояния двигателя в частности. Например, на судах вспомогательного флота Азово-Черноморского бассейна преобладают электронно-управляемые ("Electronic Control") высокооборотные двигатели фирмы Caterpillar (рисунок 2). Оснащение их блоком электронного управления, позволяет изменять, получать и контролировать рабочие параметры и хранить историю эксплуатации с момента постройки двигателя. Однако производители таких двигателей не дают полную информацию по действиям при возникновении отказа, в свою очередь, предлагают свои услуги на Российском рынке, что негативно сказывается на оперативность управления технической эксплуатацией флота [11-14].

Типы судов								
Кол-во	10		4		2		2	
Пропульсивная установка								
	винторулевые колонки		дизель-редукторная		дизель-редукторная			
Кол-во	24				8			
Двигатели								
	CAT C 32ACERT				CAT 3512B, CAT 3516B			
Кол-во	4		10		8			

Рис. 2. Объекты экспериментального исследования

Из рисунка 2 видно, что модель CAT 3500B составляет максимальное количество двигателей и входит во все пропульсивные установки и комплексы исследуемых судов. Технические характеристики исследуемых главных двигателей определены заводом-изготовителем в соответствии с международными стандартами (SAE J1349, ISO 3046/1, DIN 6271, BS 5514) и представлены в таблице 1. Из таблицы 1 видно, что двигатели CAT3512, CAT 3516 - V-образные под углом 60°. На всех исследуемых двигателях установлены электронные насос-форсунки, которые в процессе эксплуатации могут менять количество цикловой подачи топлива, заданной от блока электронного управления.

Методика эксперимента включала проведение теплотехнических испытаний с пошаговым изменением частоты вращения коленчатого вала и фиксации теплофизических параметров. Контролировались давление наддувочного воздуха,

температура отработавших газов, расход топлива, нагрузка и удельный расход топлива.

Таблица 1

Технические характеристики двигателей CAT 3500B

Наименование	CAT 3512B	CAT 3516B
Мощность Ne, кВт	700-1200	1100-2100
Номинальная частота вращения коленчатого вала двигателя, мин ⁻¹	1600-1925	
Частота вращения холостого хода, мин ⁻¹	650	
Число и расположение цилиндров	12 V-образным расположением под углом 60°	16 V-образным расположением под углом 60°
Диаметр цилиндра, мм	170	
Ход поршня, мм	190	
Степень сжатия	13,5:1	
Схема всасывания свежего заряда воздуха	Чисто газотурбинный наддув	
Объем одного цилиндра, л	4,3	
Общий объем цилиндров, л	51,8	69,1
Направление вращения коленчатого вала (со стороны маховика)	Против часовой стрелки (стандартное исполнение)	
	По часовой стрелки (индивидуальный заказ)	
Способ впрыска топлива	Электронные насос-форсунки	
Способ запуска	Пневмо стартер	
Расчетное противодействие в системе отработавших газов, кПа	2,5	
Максимальное допустимое противодействие отработавших газов, кПа	5,0	

Сбор данных осуществлялся как классическими методами (с помощью переносных диагностических комплексов), так и путем дистанционного съема информации с бортовой системы электронного управления (БЭУ) двигателя с последующей передачей в береговой центр обработки данных.

Результаты испытаний, как пример, двигателей CAT 3512B морских буксиров серии «Б» приведены на рисунках 3-7.

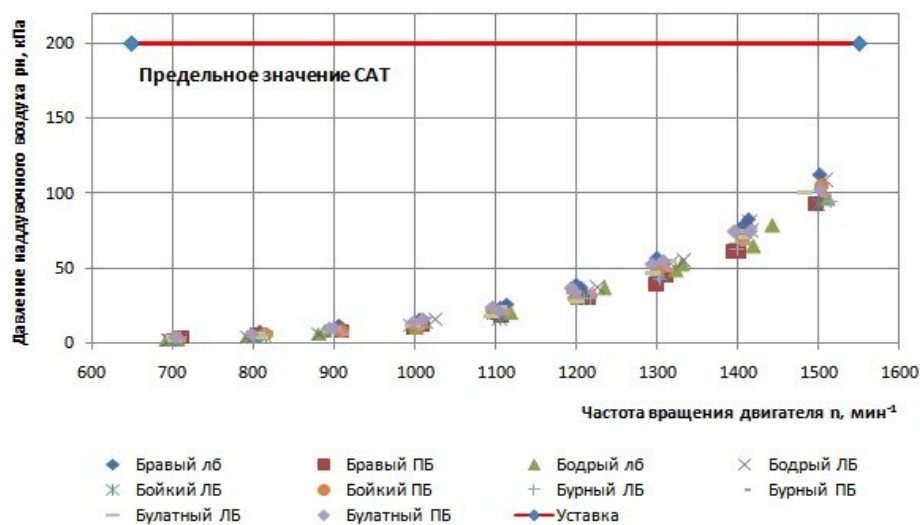


Рис. 3. Зависимость давления наддувочного воздуха от частоты вращения двигателей CAT3512B морских буксиров серии «Б»

Анализ зависимости давления наддувочного воздуха от частоты вращения (Рис. 1) выявил, что в диапазоне нагрузок 30–40% $\overline{Ne}_{ном}$ (при частоте вращения 650–1200 мин⁻¹) значение давления минимально (0–50 кПа). Его интенсивный рост наблюдается при дальнейшем увеличении частоты вращения, что указывает на эффективную работу системы наддува только на средних и высоких нагрузках.

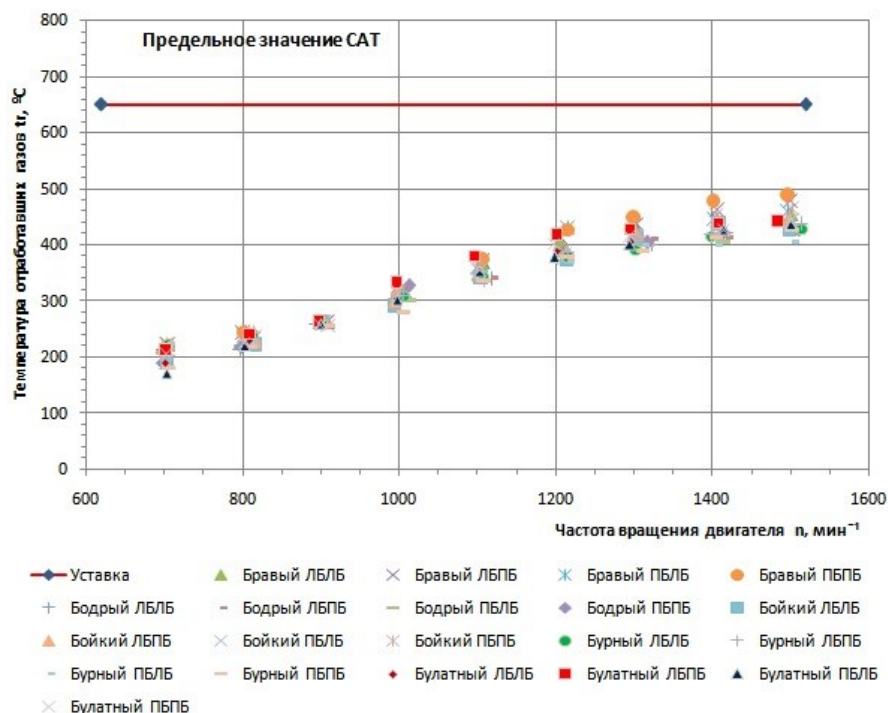


Рис. 4. Зависимость температуры отработавших газов от частоты вращения двигателей CAT3512B морских буксиров серии «Б»

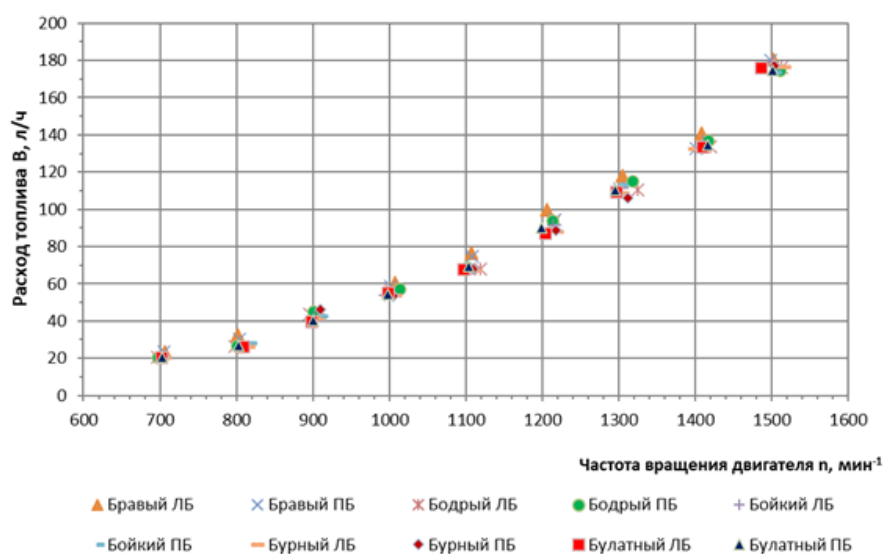


Рис. 5. Зависимость расхода топлива от частоты вращения двигателей CAT3512B морских буксиров серии «Б»

Значение температуры отработавших газов исследуемых двигателей лежат в пределах 400 - 500°C (рисунок 4) на режимах, близких к эксплуатационным, и не выходят за пределы значений (650 °C), установленных заводом изготовителем.

На рисунке 5 показана зависимость расхода топлива двигателей CAT 3512B от частоты вращения двигателя. Так можно сравнить нагруженность двух двигателей на одном судне, либо на серии судов.

Информация о расходе топлива поступает на монитор персонального компьютера через сервисную программу CAT ET от БЭУ, который получил данное значение, рассчитав по заданному алгоритму взаимодействия значений теплофизических параметров (частота вращения двигателя, нагрузка на двигатель, атмосферное давление), полученных от датчиков двигателя в зависимости от режима работы двигателя.

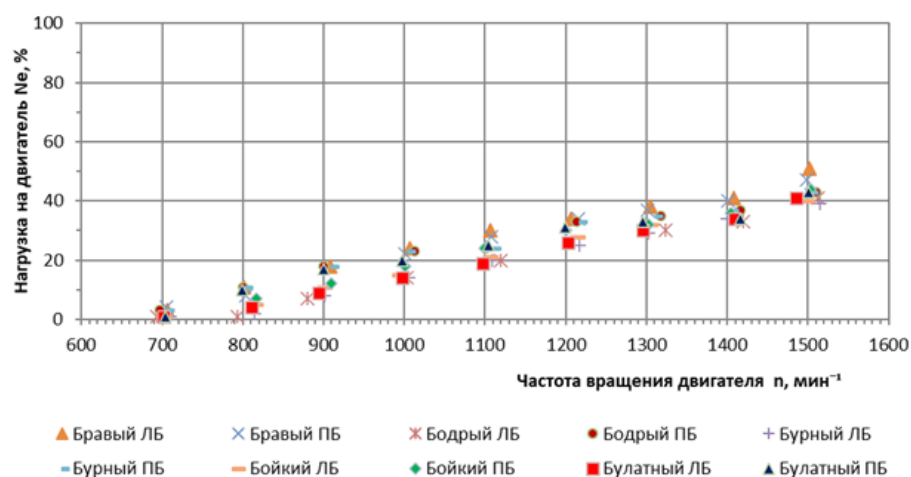


Рис. 6. Зависимость нагрузки от частоты вращения двигателей CAT3512B морских буксиров серии «Б»

БЭУ выводит на экран оператора зависимость нагрузки $\overline{Ne}_{ном}$, % на двигатель от частоты вращения n , мин^{-1} (рисунок 6). Что является примером работы датчика частоты вращения, который передает сигнал в систему БЭУ для сравнения с требуемым значением положения рукоятки оборотов на ходовом мостике. Из рисунка видно, что на всем диапазоне изменении режимов работы исследуемых двигателей морских буксиров, нагрузка не превысила $50\%\overline{Ne}_{ном}$.

Так по рисунку 7 видно, как изменяются значения удельного расхода топлива в зависимости от частоты вращения двигателя. Например, двигатель ЛБ м/б «Бравый» при нагрузке $40\%\overline{Ne}_{ном}$ имеет более повышенный расход топлива, чем двигатели остальных судов. А рисунок 5 показывает, что нагрузка м/б «Бравый» равной $40\%\overline{Ne}_{ном}$ соответствует 1400 мин^{-1} . Двигатели судна, например, м/б «Булатный» при нагрузке $40\%\overline{Ne}_{ном}$ достигают 1500 мин^{-1} соответственно с большим расходом топлива равным 176 л/ч , чем расход топлива м/б «Бравый» равный 135 л/ч .

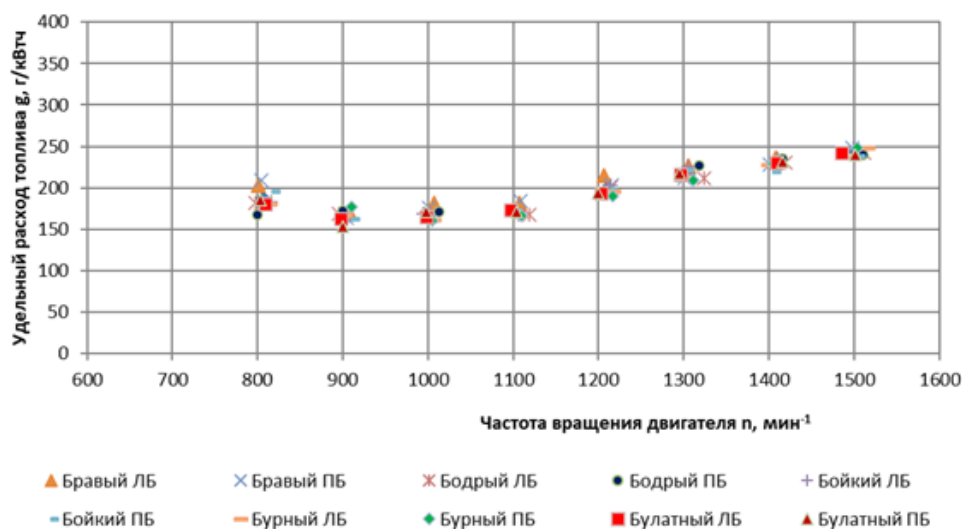


Рис. 7. Зависимость удельного расхода топлива от частоты вращения двигателей CAT3512B морских буксиров серии «Б»

Следовательно, рисунок 6 показывает наиболее оптимальный (эффективный) режим работы двигателей. Например, м/б «Бравый» при нагрузке $19\%\overline{Ne}_{ном}$ имеет удельный расход топлива равным 180 г/кВтч , а м/б «Булатный» - 153 г/кВтч . Такой анализ режимов работы судов позволяет определить техническое состояние двигателей в любой момент времени, а сделать вывод о продлении ремонтного интервала в зависимости от состояния позволит диагностика теплофизических параметров за указанный промежуток времени [15-17].

Заключение

Анализ отказов и неисправностей главных высокооборотных двигателей показал, что аварии систем и элементов высокооборотных двигателей Caterpillar являются результатом работы двигателей на частичных нагрузках и следствием отсутствия рекомендаций по нормированию теплофизических параметров на этих режимах.

Экспериментальные исследования теплофизических параметров главных высокооборотных двигателей Caterpillar моделей 3512, 3516 позволили собрать и накопить информационно-статистический банк данных теплофизических параметров в широком диапазоне изменения режимов работы.

Разработанная методика контроля технического состояния ВОД может быть рекомендована для применения на других типах высокооборотных двигателей морских судов, эксплуатирующихся на частичных режимах работы.

Список литературы

1. Современные системы по контролю работы высокооборотных двигателей морских судов / В.В. Герасиди, А.В. Лисаченко / Эксплуатация морского транспорта. 2016. № 2 (79). С. 74-78.
2. Ципленкин, Г.Е. Улучшение топливной экономичности двигателей за счет оптимизации систем наддува/ Г.Е. Ципленкин, В.И. Иовлев. // Двигателестроение.- 2014.-№3.- С. 16 – 22
3. Смирнов, А.В. Перспективный тип опор турбокомпрессоров ДВС/ А.В. Смирнов // Двигателестроение.- 2014.-№2.- С. 23 – 25.
4. Николаев, Н.И. Вибрационные характеристики современных турбокомпрессоров с радиально-осевой турбиной высокооборотных двигателей в эксплуатации / Н.И. Николаев, В.В. Герасиди, А.В. Лисаченко// Эксплуатация морского транспорта.- 2015.- №2(75).- С 56-60.
5. Оценка состояния турбокомпрессора высокооборотного двигателя в эксплуатации по параметрам вибрации / Н.И. Николаев, В.В. Герасиди, А.В. Лисаченко // Материалы пятой Всероссийской межотраслевой научно-технической конференции: «Актуальные проблемы морской энергетики». – СПб: РИО ГМТУ, 2016. С. 159-161.
6. М.Д. Генкин. Вибрации в технике. – Том 5. – М.: Машиностроение, 1981. –496 с.
7. Контроль состояния двигателя фирмы «Caterpillar» CAT 3512 грунтонасосной установки земснаряда по вибрационным параметрам / Хекерт Е.В., Николаев Н.И., Герасиди В.В. // Морские интеллектуальные технологии. №4. – СПб: РИО «НИЦ «МОРИНТЕХ», – №1., т.1 2018.
8. Анализ теплотехнических параметров на основе опыта применения переносных диагностических комплексов современных морских главных высокооборотных двигателей / А.В. Лисаченко, В.В. Герасиди // Эксплуатация морского транспорта. 2020. № 4 (97). С. 89-94.
9. ГОСТ 10448—2014 Двигатели внутреннего сгорания. Поршневые. Приемка. Методы испытаний - М.: Стандартинформ, 2015.-21 с.
10. ГОСТ 18322-78. Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения. - М.: Стандартинформ, 2007.-12 с.
11. Р.В. Кузьмин. Техническое состояние и надежность судовых механизмов. – Л.: Судостроение, 1974. – 336 с.
12. Соловьёв, А. В. Интеллектуальная система управления классификационной деятельностью на водном транспорте // Речной транспорт (XXI век). 2017. № 84. С. 40–42.
13. Соловьёв, А. В. Концепция единого целеориентированного управления судовой энергетической установкой // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адм. гос. ун-та мор. и реч. флота им. адм. С. О. Макарова. 2017. Т. 9. № 5. С. 1027–1039.
14. Стецюк, А.Е. Основы технической диагностики. Теория распознавания. Учебное пособие / А.Е. Стецюк, Я.Ю. Бобровников - Хабаровск : Изд. ДВГУПС, 2012.- 69 с.
15. Зверев, Г.Я. Оценка надёжности изделия в процессе эксплуатации / Г.А. Зверев -М.: Комкнига, 2006. - 96 с.
16. Исаева, М.В. Разработка инвариантных экспериментально-теоретических моделей для контроля теплонапряженности цилиндропоршневой группы судовых дизелей по косвенным параметрам: дис. ... канд. тех. наук: 05.08.05 / Исаева Марина Васильевна. - Калининград., 2018. - 146 с.
17. Мартынов, Н.П. Основы теории надёжности и диагностики. Учебное пособие / Н.П. Мартынов и др. - СПб. : Изд. ВМИИ, 2003. - 242 с.

References

1. Gerasidi, V. V., & Lisachenko, A. V. (2016). Modern systems for monitoring the operation of high-speed marine engines. *Ekspluatatsiya Morskogo Transporta*, *2*(79), 74–78.

2. Tsiplenkin, G. E., & Iovlev, V. I. (2014). Improving engine fuel efficiency by optimizing supercharging systems. *Dvigatelistroyeniye*, *3*, 16–22.
3. Smirnov, A. V. (2014). A promising type of support for internal combustion engine turbochargers. *Dvigatelistroyeniye*, *2*, 23–25.
4. Nikolaev, N. I., Gerasidi, V. V., & Lisachenko, A. V. (2015). Vibrational characteristics of modern turbochargers with radial-axial turbines of high-speed engines in operation. *Ekspluatatsiya Morskogo Transporta*, *2*(75), 56–60.
5. Nikolaev, N. I., Gerasidi, V. V., & Lisachenko, A. V. (2016). Assessment of the condition of a high-speed engine turbocharger in operation based on vibration parameters. In **Proceedings of the 5th All-Russian Interdisciplinary Scientific and Technical Conference: "Current Problems of Marine Power Engineering"** (pp. 159–161). Saint Petersburg: RIO GMTU.
6. Genkin, M. D. (1981). *Vibrations in engineering: Vol. 5. Mashinostroenie*.
7. Hekert, E. V., Nikolaev, N. I., & Gerasidi, V. V. (2018). Monitoring the condition of the Caterpillar CAT 3512 engine of a dredger's soil pump unit based on vibration parameters. *Morskiye Intellektualnyye Tekhnologii*, *1*(1).
8. Lisachenko, A. V., & Gerasidi, V. V. (2020). Analysis of thermotechnical parameters based on experience in using portable diagnostic complexes for modern marine main high-speed engines. *Ekspluatatsiya Morskogo Transporta*, *4*(97), 89–94.
9. Russian Federation. (2015). **GOST 10448-2014. Internal combustion engines. Piston engines. Acceptance. Test methods**. Standartinform.
10. Russian Federation. (2007). **GOST 18322-78. System for maintenance and repair of equipment. Terms and definitions**. Standartinform.
11. Kuzmin, R. V. (1974). Technical condition and reliability of ship mechanisms. *Sudostroyeniye*.
12. Solovyov, A. V. (2017). Intelligent system for managing classification activities in water transport. *Rechnoy Transport (XXI Vek)*, *84*, 40–42.
13. Solovyov, A. V. (2017). The concept of unified goal-oriented control of a ship's power plant. *Vestnik Gosudarstvennogo Universiteta Morskogo i Rechnogo Flota Imeni Admirala S.O. Makarova*, *9*(5), 1027–1039. <https://doi.org/10.21821/2309-5180-2017-9-5-1027-1039>
14. Stetsyuk, A. E., & Bobrovnikov, Ya. Yu. (2012). Fundamentals of technical diagnostics. Recognition theory. Izdatelstvo DVGUPS.
15. Zverev, G. Ya. (2006). Product reliability assessment during operation. KomKniga.
16. Isaeva, M. V. (2018). Development of invariant experimental-theoretical models for monitoring the thermal stress of the cylinder-piston group of marine diesel engines using indirect parameters [Candidate dissertation, Kaliningrad State Technical University].
17. Martynov, N. P., et al. (2003). Fundamentals of reliability and diagnostics theory. Izdatelstvo VMiI.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Лисаченко Алексей Витальевич, кандидат технических наук, преподаватель кафедры Эксплуатация судовых механических установок, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924, г. Новороссийск, пр-т Ленина, 93, e-mail: alexx.liss@yandex.ru

Николаев Николай Иванович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Эксплуатация судовых механических установок, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924, г. Новороссийск, пр-т Ленина, 93

Герасиди Виктор Васильевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры

Alexey V. Lisachenko, Ph.D. (Eng), the Lecturer of department operation of marine mechanical installations, Admiral Ushakov State Maritime University Russia, Novorossiysk, Lenin's avenue, 93, e-mail: alexx.liss@yandex.ru

Nikolay I. Nikolaev, the professor, Dr.Sci.Tech., the professor of department operation of marine mechanical installations, Admiral Ushakov State Maritime University Russia, Novorossiysk, Lenin's avenue, 93

Viktor V. Gerasidi, Ph.D. (Eng), the assistant professor of department operation of marine

Эксплуатация судовых механических
установок, Государственный морской
университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова,
353924, г. Новороссийск, пр-т Ленина, 93

mechanical installations, Admiral Ushakov
State Maritime University Russia,
Novorossiysk, Lenin's avenue, 93, e-mail:
gerasidi@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 04.08.2025; опубликована онлайн 20.09.2025.
Received 04.08.2025; published online 20.09.2025.