

УДК 62-503.55

Н. И. Николаев,
д-р техн. наук, профессор,
ГМУ имени адмирала Ф.Ф. Ушакова;

В. В. Герасиди,
канд. техн. наук, преподаватель,
ГМУ имени адмирала Ф. Ф. Ушакова;

А. В. Лисаченко,
аспирант,
ГМУ имени адмирала Ф. Ф. Ушакова

АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПО НАГРУЗКАМ СОВРЕМЕННЫХ ВЫСОКООБОРОТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ CAT 3500 СЕРИИ МОРСКИХ БУКСИРОВ

MODERN HIGH-SPEED ENGINES CAT 3500 SERIES OF MARINE TUGS ANALYSIS OF LOADS EXPERIMENTAL DATA

Выполнен анализ главных двигателей марки «Caterpillar» модели CAT 3500В морских буксиров посредством переносного диагностического устройства. Получены зависимости нагрузки от частоты вращения коленчатого вала двигателя при швартовном и ходовом режимах эксплуатации. Показано, что разница нагрузки для двигателей на швартовных режимах по отношению к нагрузкам на ходовых режимах эксплуатации составляет примерно 10 %. Подтверждено, что удельный расход топлива при значении менее 10 % $Ne_{ном}$ завышен по сравнению со значениями, полученными при стендовых испытаниях аналогичных двигателей CAT 3500В. Доказано, что эксплуатация двигателя при частоте вращения менее 900 мин⁻¹ приводит к повышенному расходу топлива. Показано, что благоприятные режимы работы двигателей при швартовных и ходовых режимах работы лежат в пределах 10–40 % $Ne_{ном}$. Сделаны выводы по анализу работы высокооборотных двигателей морских буксиров в течение всего периода эксплуатации.

The tug's main engine analysis of loading is made by portable diagnostic device. Dependence between load and RPM are received during mooring and running modes operation. The ten percent is shown different between mooring mode and running mode. Specific fuel consumption of till 10 % $Ne_{ном}$ is above the reference engine. It is proved that 900 min⁻¹ or less of the engine operation leads to increased fuel consumption. Specific fuel consumption is satisfactory between 10–40 % $Ne_{ном}$ during mooring and running modes of operation. Conclusions are made to tugs high-speed engines operating analysis at the all of life time.

Ключевые слова: двигатель, диагностика, морской буксир, нагрузка, частота вращения коленчатого вала.

Key words: engine, engine diagnostics, tug, load, crankshaft, revolution per minutes.

В ПОРТАХ Российской Федерации в связи с ростом с начала 2000 г. внешнеторгового оборота эксплуатируются новые морские буксиры дедвейтом от 20 т до 800 т [1]. На таких буксирах находят широкое применение высокооборотные дизели (ВОД) фирм «Caterpillar», «Cummins», «MTU» и др. мощностью от 200 кВт до 2500 кВт. По данным проведенного анализа построенных судов в РФ под наблюдением РМРС за период 2000–2012 гг. 53,1 % судов используют ВОД фирмы «Caterpillar».

В настоящее время для морских буксиров характерными (основными) режимами эксплуатации главных двигателей являются режимы пониженных нагрузок. В качестве главных двигателей на таких судах применяются два ВОД с наддувом номинальной мощностью от 1000 до 2100 кВт [1], расположенных по правому и левому борту. Эксплуатация двигателей на режимах пониженных нагрузок менее 50 % от номинальной мощности $Ne_{ном}$ приводит к снижению технико-

экономических показателей дизеля и надежности судна в целом [2]. В связи с этим проведение натурных испытаний на судах для определения характерных режимов работы двигателей и расхода топлива является актуальной задачей.

Объектом экспериментального исследования являются современные судовые ВОД производства фирмы «Caterpillar» модели CAT 3500В номинальной мощностью до 1230 кВт и номинальной частотой вращения до 1850 мин⁻¹. На рис. 2 а представлены статистические данные по нагрузке главных ВОД морских буксиров, полученные на основании постоянного мониторинга в течение 10 лет эксплуатации при помощи универсальной мобильной системы. Как правило, эта система четко определена, т.е. заданы все контролируемые параметры и границы их допустимых изменений. Имеющаяся информация о рабочих процессах используется в выводе параметров на дисплей оператора и в системах диагностики оборудования дизельных двигателей фирмы и называется «Caterpillar Electronic Technician» (сокращенно – «CAT ET») – рис. 1.

Дизельный двигатель CAT 3500В оснащен электронным блоком эффективного управления (БЭУ), который контролирует рабочие параметры двигателя. БЭУ способен принимать решения в случае, когда определенные параметры достигают допустимых пределов. Эти решения выражены в трех ответных действиях: «ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ», «СНИЖЕНИЕ НАГРУЗКИ», «ОСТАНОВ». То или иное действие программируется в БЭУ посредством диагностической программы CAT ET, имеющей следующие возможности:

- ввод согласованных параметров;
- программирование степени контроля параметров (уставка, контроль предельно допустимых параметров);
- программирование времени срабатывания сигнала.

Система слежения БЭУ активируется после запуска двигателя, когда частота вращения коленчатого вала достигнет на 50 мин⁻¹ ниже значения оборотов холостого хода.



Рис. 1. Общий вид диагностического оборудования CAT ET

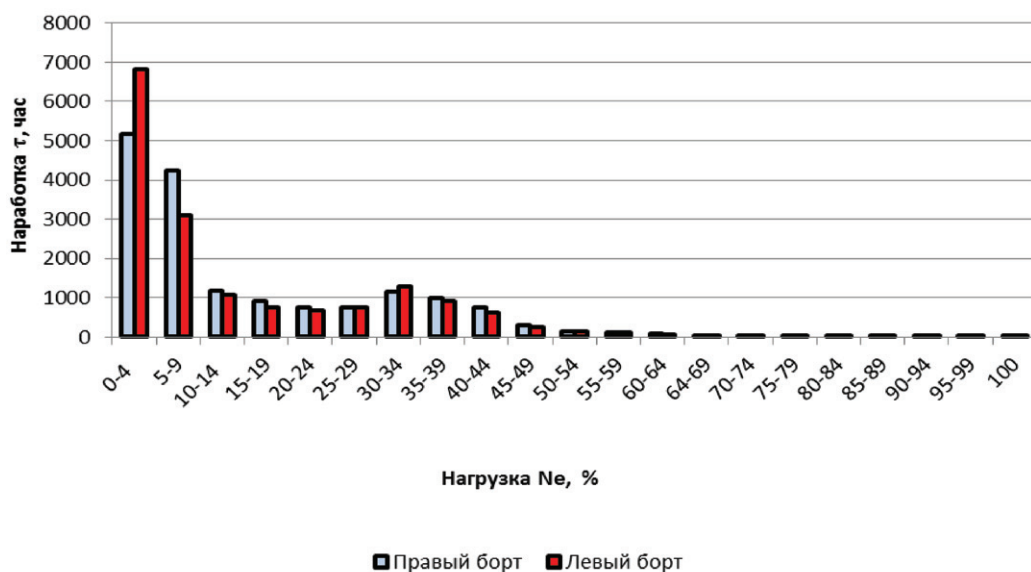
Оператор (вахтенный механик) наблюдает за двигателем во время его работы, считывая показания приборов, выведенных на приборную панель. При возникновении кодов неисправности двигатель реагирует согласно заложенной в него программе. В это время оператор должен найти разъяснение соответствующего кода и принять надлежащие меры, что приводит к определенным временным трудностям. Средства диагностики CAT ET представлены в виде одной компьютерной программы и адаптера, являющегося связующим элементом двигателя (БЭУ) и компьютера. На монитор переносного компьютера (ноутбук) выводятся данные о двигателе в режиме реального времени. В таблице приведено сравнение контролируемых параметров при помощи переносной системы диагностики (CAT ET) и приборной панели двигателя.

**Сравнение основных контролируемых параметров
при помощи диагностического комплекса CAT ET и приборной панели двигателя**

Основные контролируемые параметры	Диагностический комплекс CAT ET	Приборная панель двигателя CAT 3500B
1. Температура охлаждающей жидкости воздухоохладителя, °C	+	+
2. Сопротивление в воздушном фильтре, кПа	+	
3. Атмосферное давление, кПа	+	
4. Давление наддувочного воздуха, кПа	+	+
5. Состояние холодного режима двигателя	+	
6. Температура охлаждающей жидкости, °C	+	+
7. Давление картерных газов, кПа	+	+
8. Отключение цилиндра	+	
9. Диагностические сообщения	+	+
10. Напряжение питания БЭУ	+	
11. Идентификация двигателя (серийный номер)	+	
12. Частота вращения двигателя (фактические мин ⁻¹)	+	+
13. Частота вращения двигателя (требуемые мин ⁻¹)	+	
14. Нагрузка на двигатель, %	+	
15. Состояние систем двигателя	+	
16. Состояние сигнально-предупредительных систем двигателя	+	
17. Температура выхлопных газов, °C	+	+
18. Давление топлива, кПа	+	+
19. Перепад давления топлива на фильтре, кПа	+	+
20. Уровень антифриза в системе	+	
21. Максимальное сопротивление в воздушном фильтре, кПа	+	
22. Давление масла в системе, кПа	+	+
23. Положение топливной рейки в процентах	+	
24. Номинальный предел подачи топлива	+	
25. Состояние функции «калибровки датчиков»	+	
26. Общее потребление топлива, л/ч	+	+

На рис. 2 а приведена гистограмма нагрузок ГД CAT 3500 в течение всего периода эксплуатации, откуда видно, что нагрузка на двигатели 0–15 % $Ne_{ном}$ приходится на большую часть (до 80 %) эксплуатационного времени морского буксира, при режиме средних нагрузок (30–50 % $Ne_{ном}$) двигатели отработали 7 % от общего эксплуатационного периода.

а)



б)

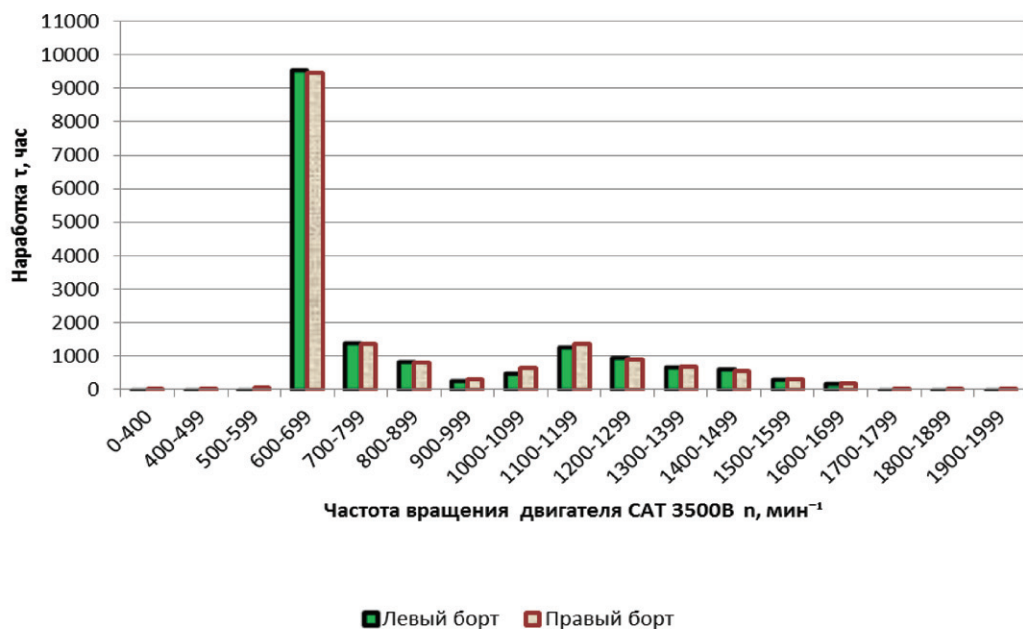


Рис. 2. Гистограммы нагрузок (а) и частоты вращения (б) главных двигателей CAT 3500B морского буксира в течение всего периода эксплуатации

На основании имеющегося статистического материала по нагрузкам и частоте вращения двигателя можно определить характерные режимы работы по приведенной на рис. 2 б гистограмме, откуда видно, что наибольшее количество времени (примерно 9500 ч) двигатель работает при частоте вращения коленчатого вала $n = 600\text{--}699$ мин⁻¹. При частоте вращения 1500 мин⁻¹ двигатель отработал примерно 1000 ч эксплуатационного времени при нагрузке, в соответствии с рис. 3, равной 40 % $N_{e\text{ном}}$, что также подтверждается временем работы двигателя (примерно 1000 ч) при режиме 40 % $N_{e\text{ном}}$ в соответствии с рис. 2 а.

Испытания двигателей фирмы «Caterpillar» серии CAT 3500B дизельной энергетической установки морских буксиров выполнены в соответствии с разработанной и согласованной с судовладельцем программой испытаний, основанной на рекомендациях завода-изготовителя двигателей CAT 3500B.

Условия проведения ходовых и швартовных испытаний:

- температура охлаждающей жидкости зарубашечного пространства составляет не менее 60 °С;
- волнение моря – не более 3–4 балла;
- скорость ветра – не более 5 м/с;
- диапазон частоты вращения коленчатого вала двигателя – от 1500 мин⁻¹ до 700 мин⁻¹ с шагом 100 мин⁻¹ при уменьшении и увеличении нагрузки. Подключение и установка диагностического адаптера осуществляется согласно штатному расположению соединительных разъемов [3].

При анализе проведенных операций (швартовный или ходовой режим) были определены основные показатели нагрузок на главные двигатели в зависимости от частоты вращения. На рис. 3 приведены такие зависимости нагрузок, откуда видно, что на протяжении всего диапазона частоты вращения двигателя от 1500 мин⁻¹ до 700 мин⁻¹ разница между нагрузкой при швартовном и ходовом режимах работы составляет 10 %. Анализ работы показал, что от общего времени швартовной операции не более 1 % приходится на работу двигателя на максимальной нагрузке (50 % $Ne_{ном}$), остальное время соответствует малым нагрузкам (от 5 % до 25 % $Ne_{ном}$). Из рис. 3 видно, что характер изменения нагрузки от частоты вращения ГД в диапазоне от 1500 до 700 мин⁻¹ на швартовном режиме работы лежит в пределах от 50 % до 7 % $Ne_{ном}$, на ходовом режиме – от 40 % до 3 % $Ne_{ном}$.

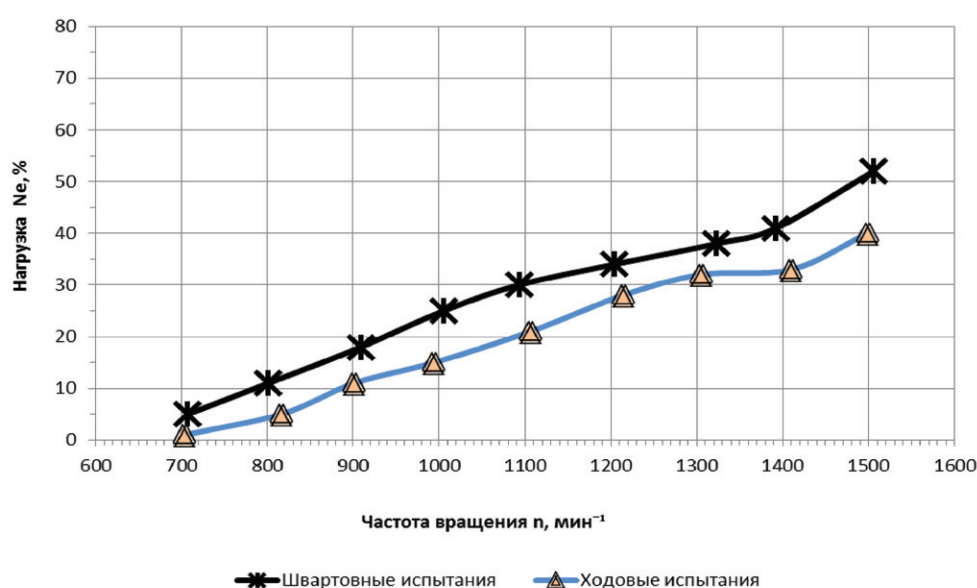


Рис. 3. Зависимость нагрузки от частоты вращения главного двигателя САТ 3500В

Таким образом, проведение теплотехнических испытаний двигателей САТ 3500В морских буксиров позволило получить характеристики, определяющие экономические показатели работы двигателей на режимах частичных нагрузок.

Влияние режима низких нагрузок на работу двигателя можно оценить при помощи зависимостей, полученных на рис. 4, где показано натурное определение удельного эффективного расхода топлива на ходовых режимах работы двигателя путем сравнения с эталонным значением (стендовые испытания). Из рис. 4 а видно, что удельный расход топлива при нагрузке от 10 % до 40 % $Ne_{ном}$ практически совпадает с данными, полученными при стендовых испытаниях двигателя САТ 3500В, что свидетельствует о необходимости эксплуатации двигателей на этих режимах. При сравнении удельного расхода топлива, полученного при ходовых испытаниях, со стендовыми испытаниями видно, что эксплуатация двигателя при частоте вращения менее 900 мин⁻¹ приводит к повышенному расходу топлива.

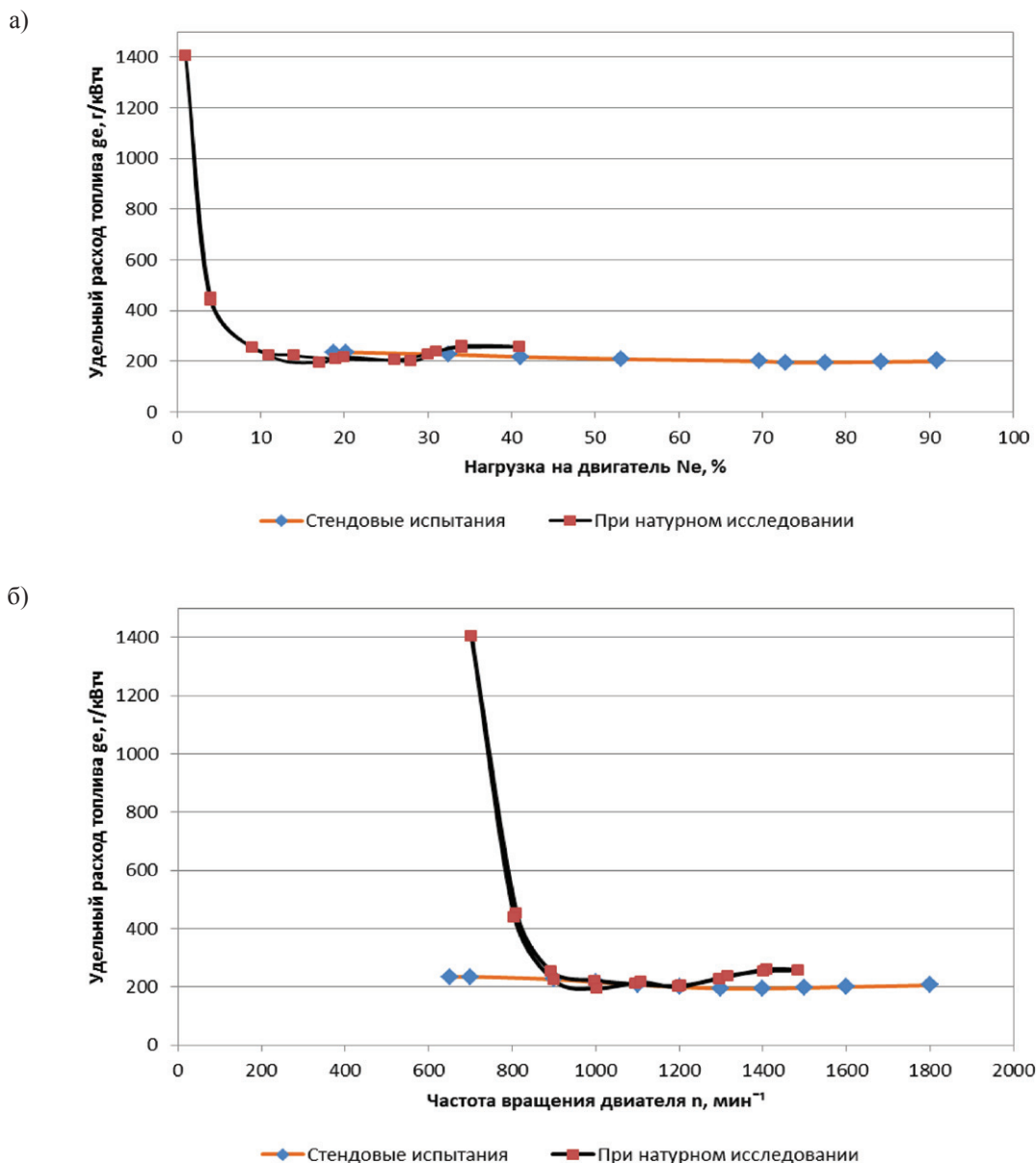


Рис. 4. Зависимость удельного расхода топлива от нагрузки (а) и частоты вращения (б) двигателя CAT 3500B

Ввиду того, что показатель нагрузки в условиях эксплуатации обслуживающий персонал определить не может, на рисунке 4 б удельный расход топлива приведен в зависимости от частоты вращения двигателя, откуда видно, что режим 900–1500 мин⁻¹ соответствует эффективному расходу топлива, полученному при стендовых испытаниях типоразмера двигателя CAT 3500B.

Оценка технического состояния при помощи штатных контрольно-измерительных приборов и переносной системы диагностики (CAT ET) – достаточно трудоемкий процесс для ВОО, работающих в порту. Отдельные измерения параметров и их сопоставление с данными, полученными при стендовых испытаниях, не дают полного представления о техническом состоянии двигателя и его систем. Большую часть эксплуатационного времени нагрузка на двигатель составляет до 10 % $N_{e, ном}$, при которой удельный расход топлива завышен, что может привести к нестабильной

работе отдельных систем и узлов двигателя (топливной аппаратуры) к повреждению компенсаторов газовыпускного тракта, а также повреждению рабочих лопаток ТК) на таких режимах эксплуатации.

Выполненный анализ испытаний ВОД САТ 3500В позволил сделать выводы и дать рекомендации судовладельцу по существующим режимам работы.

Значительную часть эксплуатационного периода морских буксиров главные высокооборотные двигатели работают в диапазоне нагрузок до 50 % от номинальной мощности двигателя, причем для работы на нагрузках до 10–15 % $Ne_{ном}$ (при частоте вращения коленчатого вала двигателя, равной 650–700 мин⁻¹) приходится 80 % эксплуатационного времени.

Нагрузка для двигателей на швартовных режимах больше примерно на 10 % по отношению к нагрузкам на ходовых режимах в эксплуатации во всем диапазоне частоты вращения двигателя.

При швартовном режиме работы морского буксира максимальная нагрузка на ГД составляет до 50 % $Ne_{ном}$. Продолжительность работы при такой нагрузке равна 1 % от общего времени швартовной операции.

При данных режимах работы для сокращения расхода топлива необходимо не допускать работу двигателей при нагрузках до 10–15 % $Ne_{ном}$, а увеличить до 20 % $Ne_{ном}$. Технически для исследуемых буксиров, использующих в составе пропульсивного комплекса винторулевые колонки, увеличить нагрузку реально при неизменной частоте вращения двигателя.

Частота вращения двигателя при ходовом режиме работы должна быть не менее 1000 мин⁻¹.

Необходимо использовать существующую систему контроля параметров работы главного двигателя САТ ЕТ, проводить ежемесячный мониторинг [3].

Список литературы

1. Правила классификации и постройки морских судов. – Т. 2. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2013. – 726 с.
2. Николаев Н. И. Современное состояние и техническая эксплуатация турбонаддувочных агрегатов: монография / Н. И. Николаев, В. А. Савченко. – СПб.: Судостроение, 2005. – 113 с.
3. Технические условия на ремонт двигателей САТ серии 3500В. <http://127.0.0.1/sisweb/media-search/mediaheadennfoframeset.jsp>, САТ 2013.