

Раздел 3 СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

УДК 621.431.74:621.43.052
DOI: 10.34046/aumsuomt95/10

АВАРИЯ ТУРБОКОМПРЕССОРА ДВИГАТЕЛЕЙ “CATERPILLAR” МОРСКИХ СУДОВ

*А.В. Лисаченко, аспирант кафедры ЭСМУ
В. В. Герасиди, кандидат технических наук, доцент*

В данной статье приводится анализ технической эксплуатации элементов систем наддува современных судовых высокооборотных двигателей на основе периодически полученных теплотехнических параметров в эксплуатации при помощи штатных блоков управления фирмы "Caterpillar". В настоящее время не существуют нормативных документов контроля технического состояния судовых ТК ВОД четырехтактных двигателей оснащенных БЭУ по теплотехническим и вибрационным параметрам, полученных с переносных диагностических комплексов заводов изготовителей. Развитие дефекта ТК при существующих методах диагностики практически невозможно обнаружить.

Ключевые слова: турбокомпрессор, высокооборотный двигатель, неисправность, подшипник скольжения, дефект, морское судно.

This article provides an analysis of the technical operation of the elements of turbocharging systems of modern marine high-speed engines based on periodically obtained thermal parameters in operation using standard control units of the company "Caterpillar". Currently, there are no regulatory documents for monitoring the technical condition of ship's TC - four-stroke engines equipped with BEU for thermal and vibration parameters obtained from portable diagnostic complexes of manufacturers. The development of a TC defect with existing diagnostic methods is almost impossible to detect.

Keywords: turbocharger, high-speed engine, malfunction, sliding bearing, defect, marine vessel.

Повышение уровня безопасности мореплавания связано с внедрением методов контроля и оценки технического состояния (ТС) судовых технических средств, которые должны своевременно обнаруживать неисправности на ранней стадии ее возникновения и развития. Это дает возможность уменьшить риски, связанные с отказами и повреждениями судовых технических средств.

На современных морских и речных судах (буксирах, судах снабжения, поисково-спасательных и т.п.) устанавливают современные высокооборотные двигатели (ВОД) с наддувом. На рисунке 1 приведено соотношение ВОД различных производителей, установленных на указанных выше морских судах в качестве главных двигателей, поднадзорных Российскому морскому регистру судоходства (РМРС) по состоянию на 2019 г. ВОД фирмы «Caterpillar» составляют 69% от общего количества дизелей.

ВОД фирмы «Caterpillar» оснащены локальными системами диагностики – блоками электронного управления (БЭУ) [1]. БЭУ современных ВОД предназначены для:

- параметрического контроля: температуры охлаждающей жидкости в охладителе наддувочного воздуха $t_{\text{охла}}(^{\circ}\text{C})$, давления наддува $p_{\text{нд}}(\text{кПа})$, температуры охлаждающей жидкости зарубашечного пространства двигателя $t_{\text{ож}}(^{\circ}\text{C})$, относительной нагрузки на двигатель $\bar{N}_e(\%)$, давления моторного масла $p_{\text{м}}(\text{кПа})$, частоты вращения коленчатого вала $n_{\text{к.в.}}(\text{мин}^{-1})$, давления топлива $p_{\text{т}}(\text{кПа})$, температуры отработавших газов правого/левого борта V-образного двигателя $t_{\text{ог.п/б}}/t_{\text{ог.л/б}}(^{\circ}\text{C})$;

- предупреждения обслуживающего персонала о нештатной ситуации при превышении значений контролируемых технико-экономических параметров двигателя во время работы, ограничивая его работу путем снижения нагрузки и даже аварийной остановки двигателя;

- хранения информации, так называемую историю двигателя, которая включает в себя не только память значений параметров, но и причины аварийных остановок двигателя с момента его ввода в эксплуатацию.

Во время работы дизеля в его элементах, в том числе и в турбокомпрессоре (ТК), происходят определенные изменения, которые приводят к постепенной или внезапной утрате заложенной в

проекте работоспособности, т.е. к отказам. Возможно также появление дефектов, которые не приведут к отказу, а проявятся в виде повреждения, приводящего к изменению (обычно

снижению) параметров и характеристик ТК. Такие неисправности обычно выявляются при разборке ТК.

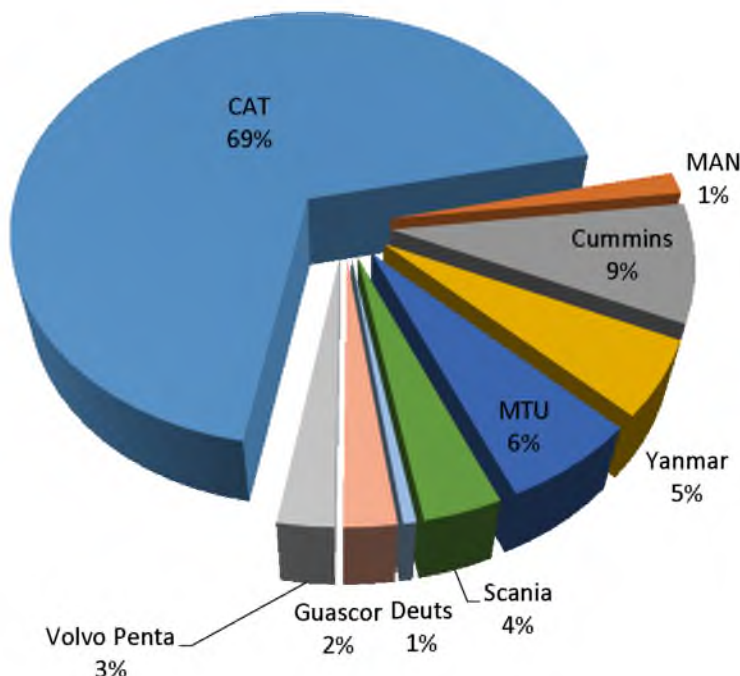


Рисунок 1 – Количество высокооборотных двигателей различных производителей, установленных на морских судах поднадзорных РМРС

Анализ отказов, комплектующих деталей судовых дизелей, показывает, что, наряду с коленчатым валом и шатуном, ТК характеризуется частой заменой компонентов:

1. По данным Регистра Ллойда, общая тенденция надежности судовых дизелей характеризуется таким соотношением количества отказов ТК к общему количеству отказов двигателя: 22% - для малооборотных двигателей; 11% - для среднеоборотных двигателей; 4% - для высокооборотных двигателей соответственно [2]. В статье также отмечается, что для четырехтактных двигателей количество дефектных деталей составляют несколько больший процент, по сравнению с двухтактными. По-видимому, связано с высокой температурой газа (рисунок 2) [3].

Из рисунка 2 видно, что температура отработавших газов, например, двигателя «MTU» (линия 1) при $n_{ГД} = 600 \text{ мин}^{-1}$ составляет 200°C . При увеличении $n_{ГД}$ в диапазоне частот вращения $1100 \div 1700 \text{ мин}^{-1}$, в момент подключения к работе второго ТК температура отработавших газов увеличивается и находится в пределах от $450 \dots 520^\circ\text{C}$. При увеличении частоты вращения двигателя

свыше $1900 \div 2000 \text{ мин}^{-1}$ в работе находятся два ТК. При $n_{ГД} = 2400 \text{ мин}^{-1}$, температура отработавших газов увеличивается до 680°C . Температура отработавших газов двигателя «Caterpillar» (линия 2), при $n_{ГД} = 700 \text{ мин}^{-1}$, составляет 240°C , а затем, при увеличении $n_{ГД}$ до 1200 мин^{-1} до 440°C и, далее, при $n_{ГД} = 1500 \text{ мин}^{-1}$ ее значения составляют 470°C .

Частота замен неповреждённых подшипников существенно превышает замену повреждённых (18%).

2. В докладах на конференции SIMAS, начиная с 2000 гг., сообщается о работах производителей ТК, направленных на снижение незапланированных простоев в работе судовых дизелей из-за большого количества отказов ТК. Устранение этих отказов является составной частью оптимизации эксплуатационных расходов. Для улучшения конструкции ТК изготовитель должен: знать *как, куда и почему* возникают вибрации, и как их можно избежать или минимизировать; обеспечить оборудование датчиками и правилами технической эксплуатации, предохраняющими агрегат от разрушения [4, 5].

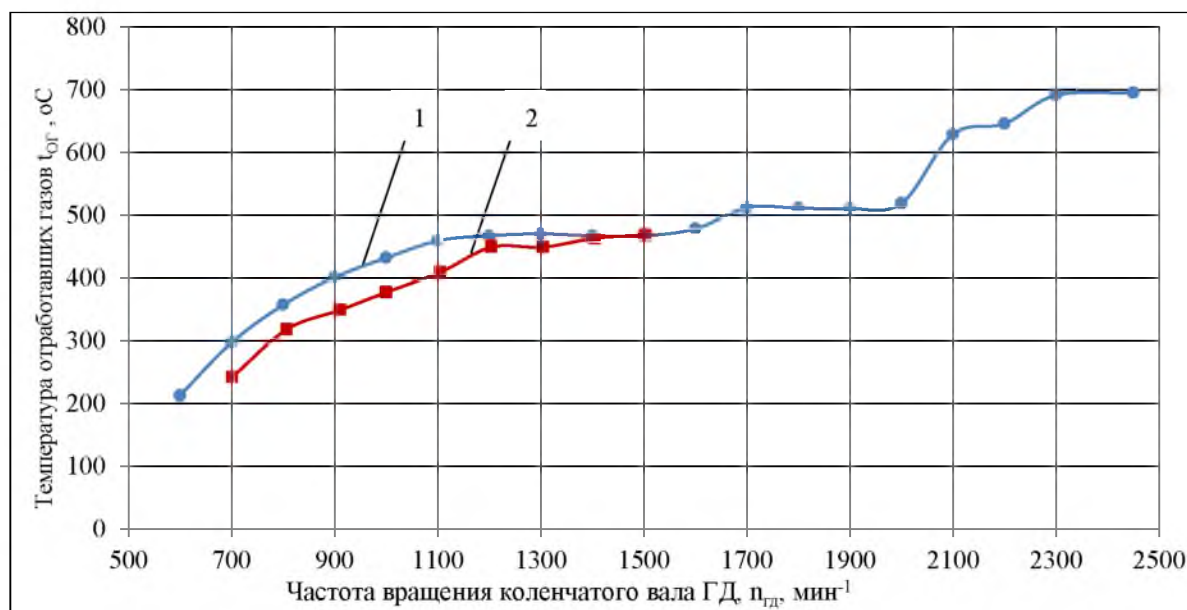


Рисунок 2 – Зависимость температуры отработавших газов ГД от частоты вращения:
1 – ГД «MTU» 10V2000 M93; 2 – ГД «Caterpillar» CAT 3512B

3. Техническая эксплуатация современных ВОД, оснащенных БЭУ, показывает, что имеют место отказы и повреждения ТК, при которых блок БЭУ не предупреждал аварию: повреждение лопаток компрессора и подшипниковых узлов, износ шеек ротора, задымление со стороны воздушного фильтра (рисунок 3) и т.п. Так, например, при проведении ходовых испытаний на морском буксире с главными двигателями фирмы «Caterpillar» модели 3512B (наработка 16100 часов), во время выполнения диагностических процедур сервисным инженером и установления

оператором разных эксплуатационных режимов, в момент сохранения данных во внешнюю память переносного компьютера – произошел отказ ТК. В результате чего, произошло задымление со стороны воздушного фильтра, изменение цвета улитки компрессора, повреждение лопаток компрессора

Количество подобных отказов, в основном при малых нагрузках, составляет за десятилетний период наших наблюдений 8,5% от общего количества ТК 300 единиц [5, 6].

А)



Б)



Рисунок 3 – Фото улитки и рабочего колеса компрессора турбокомпрессора
а) до аварии; б) после аварии

Ниже приводятся пример аварии и результаты контроля вибрации двигателя и ТК современных ВОД фирмы «CATERPILLAR» серии CAT 3500, CAT C18. Система газотурбинного наддува двигателей состоит из двух ТК левого и

правого борта с промежуточным охлаждением наддувочного воздуха, работающих на общий ресивер; отработавшие газы, через соответствующие коллекторы правого и левого бортов подводятся к турбине ТК (рисунок 4).

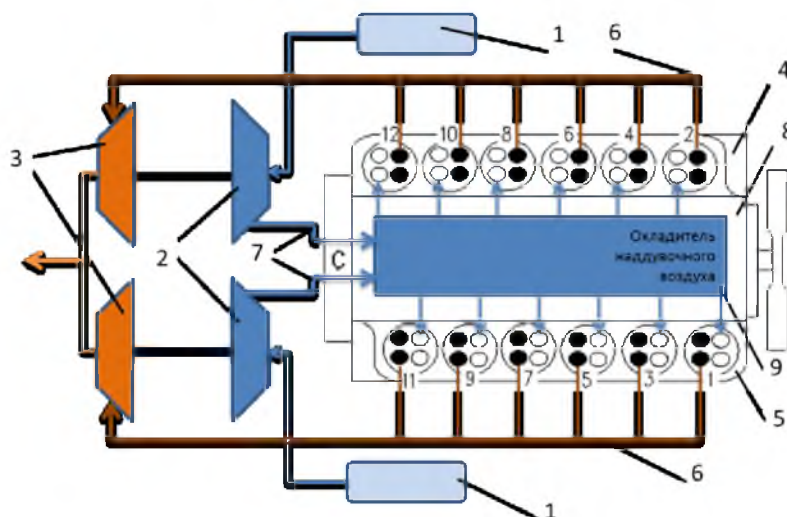


Рисунок 4 – Система наддува дизеля «Caterpillar» CAT 3512B:

- 1 – воздушный фильтр; 2 – компрессор; 3 – турбина; 4 – расположение четных цилиндров (левый борт);
5 – расположение нечетных цилиндров (правый борт); 6 – выход отработавших газов; 7 – наддувочный воздух;
8 – ресивер; 9 – охладитель наддувочного воздуха

После прохождения регламентного технического обслуживания ТО2 (период 2000 часов) двигателя фирмы «Caterpillar» модели CAT C18 при наработке 2300 часов, произошла авария по причине отказа одного из двух ТК (рисунок 5).

Последствием этой аварии стало вывод двигателя из эксплуатации на шесть месяцев, закупка нового ТК, закупка сменно-запасных частей при ремонте двигателя. Стоимость всех эксплуатационных расходов составила около 3 млн рублей.



а)



б)

Рисунок 5 – Фото деталей ТК главного двигателя фирмы "Caterpillar" CAT C18 после аварии
а) элементы неисправного ТК; б) в сборе

При проведении запланированных работ и проверке всех систем двигателей после выполнения технического обслуживания (ТО2), двигатели были запущены и прогреты. Судно вышло в море на ходовые испытания со скоростью до 40 узлов (номинальная скорость). Сослов экипажа, повышение оборотов двигателей было плавное. После

10 минут устойчивой работы систем двигателей на режиме номинальной нагрузки, на двигателе левого борта произошел отказ одного из двух турбокомпрессоров. Это сопровождалось сильным хлопком и металлическим шумом, после чего двигатель был остановлен для инспекции и поиска источника шума. Выяснено, что причиной

этому стал отказ ТК. После чего, ТК силами судового состава был частично демонтирован и оставлен на палубе судна, в ожидании прибытия сервисного представителя фирмы "Caterpillar". Полная разборка и описание неисправности ТК осуществлялась в сервисном центре производителя. Имея недостаточную информацию о начале развития дефекта, и первоначально разобранным ТК в отсутствие сервисного инженера САТ, авторы выполнили анализ аварии и предполагаемые причины отказа ТК.

На рисунке 5 показано фото деталей ТК двигателя САТ С18 фирмы Caterpillar в разобранном виде после аварии. При осмотре деталей ТК видно, что:

1. Гайка 1 на границе сопряжения с рабочим колесом компрессора 3 имеет значительный натир по всей прижимной плоскости. Поскольку, прижимная гайка под динамометрическим усилием держит колесо компрессора на валу ТК, то такой характер износа (натир), вероятнее всего, - ослабление гайки во время вращения ротора ТК 3.

2. Повреждение рабочего колеса компрессора 3 имеет равномерный износ истирания по основанию корня лопаток с рабочей и тыльной стороны крыльчатки, а далее, по длине колеса, кромки лопаток изогнуты и обломаны. Причем, излом местами имеет свежую структуру, местами

– старение, что говорит о постепенном изнашивании колеса компрессора. Посадочное место вала 2 и рабочего колеса 3 имеют натир.

3. Промежуточная упорная втулка 4 (или центрирующая втулка) (рисунок 5) имеет сломанный упорный бурт. Это связано с перемещением вала ротора по оси.

4. Упорный гребень 6 (подпятник) имеет незначительный износ, а его центрирующая втулка 7 имеет следы вдавливания в упорную часть вала ротора.

5. Шейка ротора подшипника скольжения 8 (ближе к компрессору) сильно изношена. Визуально имеется значительное выкрашивание подшипника о вал. В этом месте, где расположен переход диаметров вала ротора от компрессорной части к основной центральной и турбинной части, произошел облом с частичным утонением вала за счет его скручивания.

6. Подшипник 9, расположенный ближе к рабочему колесу турбины, имеет следы естественного износа и не имеет деформаций при повреждении ТК. Визуально наблюдается значительное отличие между внутренним диаметром подшипника и диаметром вала. В этом случае, имеется возможность замера диаметра вала и внутреннего диаметра подшипника скольжения (таблица 1).

Таблица 1 – Данные обмеров подшипников и ротора ТК ВОД САТ С18

П/п	Место замера	Сторона компрессора, мм	Сторона турбины, мм
1.	Диаметр вала ТК	14,98	14,98
2.	Внутренний диаметр подшипника ТК	15,28	15,23
3.	Диаметральный зазор в подшипнике с валом	0,30	0,25

К сожалению, производитель не дает допустимых зазоров в подшипниках. Имеющийся длительный опыт ремонта ТК подобного типа для двигателей САТ показывает, что максимальный диаметральный зазор составляет 0,15 мм при наработке 15000 часов. Это примерно в 2 раза меньше, указанного в таблице 1.

По нашему мнению, для предотвращения подобной аварии ТК необходимо контролировать в эксплуатации вибрацию ТК и сигнал от вибродатчика выводить на блок БЭУ двигателя. Чтобы в случае превышения допустимого уровня вибрации ТК авария была предупреждена и двигатель

остановлен. Для примера, на рисунке 6 приведены спектры вибрации, полученные при контроле вибрации на корпусе ТК двигателя САТ 3512В.

Таким образом, периодические резкие изменения нагрузки на двигатель при переходном режиме маневрирования судном создали условия для помпажа ТК. Увеличенные зазоры в подшипниках привели к чрезмерным радиальным перемещением вала ротора ТК, и к заклиниванию рабочего колеса компрессора о корпус с последующим разрывом вала ротора ТК.

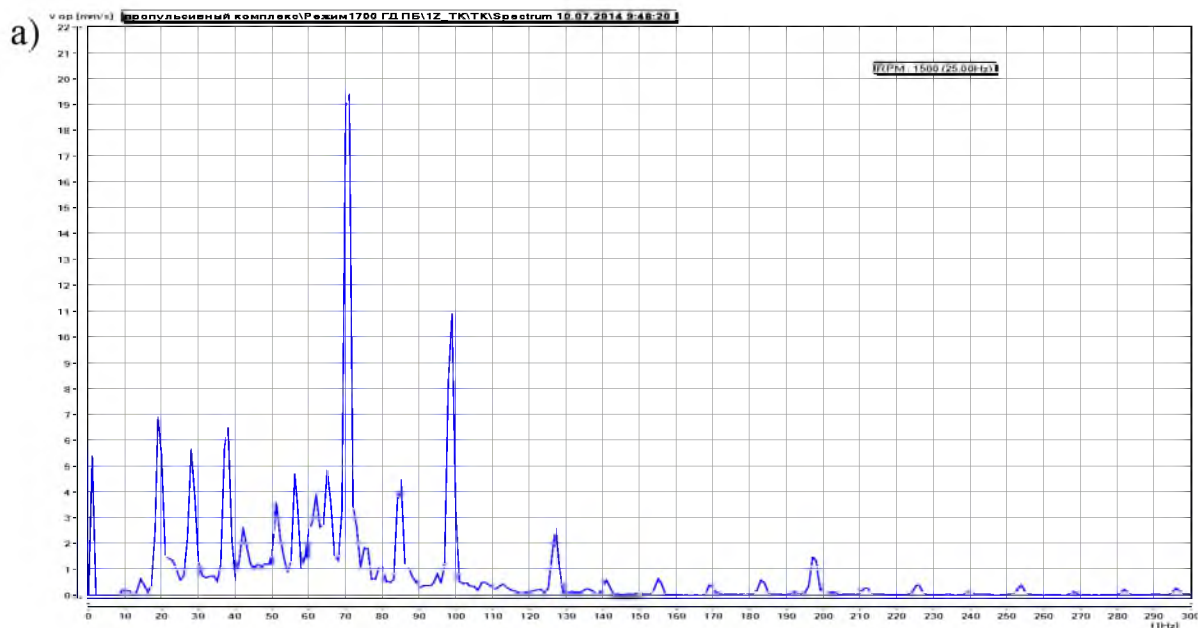


Рисунок 6 – Спектры в вертикальном направлении на корпусе ТК ВОД фирмы Caterpillar CAT 3512B при частоте вращения 1700 мин⁻¹:

а) виброскорость в диапазоне частот 0 до 300 Гц; б) виброскорость в диапазоне частот от 300 Гц до 2500 Гц; в) виброускорения в диапазоне частот от 0 до 12500 Гц

Выводы

1. Существующие локальные диагностические комплексы и компьютерная диагностика теплотехнических параметров не дают достаточной информации для контроля технического состояния ДВС в целом.

2. Необходимо наряду с теплотехническим контролем ТС ВОД рекомендовать вибрационный контроль.

3. Сочетание таких методов контроля улучшит систему оценки технического состояния ТК и двигателя в целом, позволит определить начало развития дефекта и снизить расходы на эксплуатацию.

Литература

1. CAT Service information system. Электронный ресурс. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cat.com>.
2. Ципленкин Г.Е., Иовлев В.И. Данные регистра Ллойда по отказам турбокомпрессоров на дизелях морского флота // Двигателестроение. – 2012.
3. Лисаченко А.В., Гриценко М.В., Жильцов А.С. Особенности систем наддува современных высокооборотных двигателей морских судов // Эксплуатация морского транспорта. – 2018. – №7. – С 100-105.
4. Николаев Н.И. Повышение эффективности и надежности турбокомпрессоров судовых двигателей в эксплуатации: монография. – СПб.: «Судостроение», 2009. – 230 с.

5. Николаев Н.И., Савченко В.А. Современное состояние и техническая эксплуатация турбонаддувочных агрегатов: монография. – СПб.: «Судостроение», 2005. – 114 с.
6. Лисаченко А.В. Анализ причин аварии турбокомпрессора главного двигателя CAT 3512B морского буксира // Международная научно-техническая конференция «Двигатели – 2013». – Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет, 2013. – 209 с.

REFERENCES

1. SAT Service information system. Elektronnyj resurs. [Elektronnyj re-surs]. – Rezhim dostupa: <http://www.cat.com>.
2. Ciplenkin G.E., Iovlev V.I., Dannye registra Lloyda po otkazam turbokompressorov na dizelyah morskogo flota. Dvigatelistroenie, 2012 g.
3. Lisachenko A.V., Gricenko M.V., ZHil'cov A.S., Osobennosti sistem nadduva sovremennykh vysokooborotnykh dvigatelej morskikh sudov // Eksplyuatsiya morskogo transporta, №7, 2018, No-vorossiysk, s 100-105.
4. Nikolaev N.I. Povyshenie effektivnosti i nadezhnosti turbokompressorov sudovykh dvigatelej v ekspluatatsii. Monografiya – SPb.: «Sudostroenie», 2009, 230s.
5. Nikolaev N.I., Savchenko V.A. Sovremennoe sostoyanie i tekhnicheskaya ekspluatatsiya turbonadduvochnykh agregatov: Monografiya. - SPb.: «Sudostroenie», 2005, 114s.
6. Lisachenko A.V. Analiz prichin avarii turbokompressora glavnogo dvigatelya SAT 3512V morskogo buksira // Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya «Dvigateli – 2013». Habarovsk: Tihookeanskij gosudarstvennyj universitet, 2013. – 209s.