

ПРИМЕНЕНИЕ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ОЧИСТКИ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ТУРБОКОМПРЕССОРОВ

В.В. Герасиди, А.Н. Жук, Н.И. Николаев
Государственный морской университет им. адмирала Ф.Ф. Ушакова

Рассмотрены условия загрязнения элементов проточной части турбин среднеоборотных судовых дизелей при работе на различных сортах топлива. Показана низкая эффективность стандартной процедуры очистки элементов ТК водой. Предложен способ очистки элементов радиальных турбин порошками твердых сухих очистителей с различными физическими свойствами. Экспериментально показано, что возможный износ элементов проточной части ТК за время очистки незначителен в сравнении с общим износом в процессе эксплуатации ТК.

Многолетний опыт эксплуатации судовых дизелей с турбонадувом свидетельствует о том, что в процессе их работы происходит неизбежное постепенное ухудшение технического состояния и характеристик турбокомпрессора (ТК). Основной причиной изменения характеристик ТК является занос (загрязнение) проточных частей турбины и компрессора, приводящий к снижению их КПД и изменению пропускной способности. В результате уменьшается расход воздуха для сгорания топлива, повышаются температура отработавших газов и удельный расход топлива. Таким образом, в процессе эксплуатации степень согласованности характеристик дизеля и ТК, достигнутая при расчете, проектировании и доводке, частично или полностью нарушается. Агрессивность химических соединений, входящих в состав отложений, снижает надежность элементов ТК [1, 2].

Процессы образования отложений в компонентах ТК и их влияние на характеристики судовых ДВС специфичны и исследованы недостаточно. К малоизученным явлениям относятся как причины образования заносов, так и способы борьбы с ними.

Отложения на лопатках турбины условно можно разделить на три основных типа:

- зольные — сухие пеплообразные отложения толщиной 0,1–0,3 мм, обладающие относительно высокой шероховатостью;
- сажистые мазеобразные отложения, достигающие толщины 3 мм;

➤ твердые пористые отложения, образующиеся вследствие выгорания отложений второго типа или при работе дизелей на тяжелых высоковязких сортах топлива [3].

Возникновение отложений начинается с образования на лопатках смолистолаковой пленки, появляющейся в результате как высокотемпературного окисления продуктов сгорания топлива непосредственно на металлической поверхности, так и конденсации различных продуктов сгорания, содержащихся в выпускных газах. Количество отложений и их тип определяются многими факторами — температурой поверхности лопаток, сортом применяемого топлива, режимом работы дизеля, конструкцией решеток сопловых аппаратов и рабочих лопаток турбины и т. д.

При температуре газов перед турбиной $t_T < 300$ °С отложения, независимо от сорта топлива, имеют консистенцию густой мази с большой смолистостью (второй тип). Толщина слоя стабилизируется на достаточно высоком уровне (2–3 мм).

При снижении температуры t_T до 200 °С вязкость отложений резко уменьшается, а при $t_T < 150$ °С они становятся жидкими и сдуваются потоком газа.

Переход дизеля на режимы работы с $t_T > 300$ °С приводит к прекращению роста отложений и их высушиванию. Однако толщина ранее образовавшегося слоя при $t_T < 300$ °С почти не уменьшается, а только уплотняется. При $t_T > 400$ °С жидкость полностью выпаривается из слоя отложений, соприкасающихся непосредственно с лопаткой, вследствие чего образуются отложения третьего типа. Дальнейшая эксплуатация дизеля в течение 1–2 ч при $t_T > 500$ °С может привести к отслаиванию отложений (режим «прожога»). «Прожоги» на средних нагрузках дизеля ($350 < t_T < 500$) требуют многочасовой работы, причем всякий кратковременный сброс нагрузки приводит к частичному или полному восстановлению слоя отложений.

Таким образом, загрязнение проточной части турбины — неизбежный фактор эксплуатации, а тип отложений и их толщина зависят главным образом от режимов работы дизеля и сорта топлива.

Вспомогательные дизели танкеров большую часть времени работают при нагрузках 25–60 % от номинальной [4]. Для турбин таких дизелей, эксплуатирующихся на легких сортах топлива, характерны отложения второго типа; толщина отложений достигает 2–3 мм на сопловых и 1–2 мм на рабочих лопатках.

При использовании тяжелых сортов топлива максимальные отложения наблюдаются при работе дизелей на частичных нагрузках. Это объясняется наличием в топливе таких элементов, как сера, окислы ванадия, зола, натрия и др. Отложения на рабочих лопатках турбин в этих случаях составляют 2–3 мм, а на сопловых — 5–6 мм [3] и имеют чрезвычайно твердую пористую структуру, близкую к структуре отложений третьего типа. В состав отложений на лопатках турбин входят пятиокись ванадия, сульфат натрия и другие соединения. Образование максимального слоя отложений и его стабилизация происходят в первые 100–200 ч работы дизеля.

Основными способами очистки проточных частей турбины ТК являются сухая (твердыми очистителями) и влажная (промывка водой). Современная процедура очистки водой турбины судовых двигателей требует снижения нагрузки двигателя до 10–15 % через каждые 50–150 ч. Суммарное время всех этапов очистки (снижение нагрузки, охлаждение, впрыск воды, период сушки повышение нагрузки) составляет примерно один час. Ухудшение характеристик двигателя может быть ограничено приемлемым уровнем за стандартные межремонтные периоды (12–18 тыс. ч), обусловленные условиями эксплуатации [5]. В последние десятилетия использование воды как средства для очистки является типовым и проверенным решением для лопаток радиальных турбин. Однако дизели, работающие на тяжелом топливе с высоким содержанием ванадия, серы и других включений, имеют более высокую температуру на входе ТК, что снижает эффективность очистки водой. Кроме того, очистка водой создает термические напряжения в деталях турбокомпрессора, уменьшая интервалы их замены. Возникает необходимость механической очистки после нескольких сотен часов работы, что требует дополнительного обслуживания и приводит к простоям установки [6].

Таким образом, очистка проточной части турбин ТК среднеоборотных двигателей — актуальная задача. Рекомендованная очистка водой не всегда позволяет достичь нужного результата, а иногда, наоборот, может усугубить проблему [7]. Таким образом, наличие неудаленных отложений в проточной части турбины ТК приводит к изменению параметров наддувочного воздуха, снижению давления наддува, ухудшению продувки

цилиндров дизеля и, как следствие, ухудшению процесса сгорания. В результате повышается температура отработавших газов и увеличивается расход топлива.

Возможным вариантом решения данной проблемы может быть сухая очистка проточной части турбины ТК. Такой вид очистки уже применяется для турбокомпрессоров с осевыми турбинами и показал свою эффективность. Ревизии проточной части очищенных сухим методом турбин показывают, что при периодической очистке крошкой с соблюдением инструкции загрязнения не значительны. Однако производители турбин ТК среднеоборотных двигателей не рекомендуют использовать данный вид очистки ввиду возможного износа элементов проточной части твердой крошкой [8].

Влияние сухих (твердых) очистителей на износ проточной части турбины необходимо и можно исследовать на экспериментальной установке. Для проведения исследований была разработана и создана специальная установка [9]. В программу экспериментального исследования входило изучение влияния на износ образцов: угла атаки, скорости и размера абразива и их структуры и износостойкости образцов. В соответствии с приведенными выше соображениями методика исследования предусматривала закрепление образцов перед соплом так, чтобы был обеспечен угол атаки от 5 до 60°. На рассматриваемой экспериментальной установке был проведен ряд экспериментов.

Исследование проводилось с образцами элементов проточной части турбин современных ТК судовых дизелей:

- образец № 1 — входное устройство ТК фирмы АВВ типа RR с безлопаточным направляющим аппаратом;
- образец № 2 — входное устройство ТК фирмы MAN B&W типа NR с сопловым аппаратом;
- образец № 3 — сопловой аппарат ТК типа NR.

Все испытанные образцы были демонтированы с ТК, проработавших около 4-х лет. ТК и их детали являются оригинальными, и их материал должен соответствовать требованиям производителя [10].

Для исследования влияния твердых сухих очистителей на износ проточной части турбины были взяты следующие материалы.

- Крошка (скорлупа орехов) твердостью 6 по шкале Мосса; масса одной порции составляет 0,0003 кг (применяется для чистки осевых турбин ТК малооборотных двигателей).

- Электрокорунд (Al_2O_3) твердостью 8–9 по шкале Мосса; масса одной порции составляет 0,0003 кг. Топливо обрабатывается алюмини-

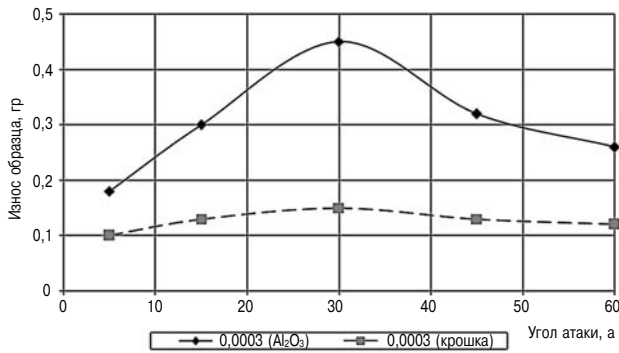


Рис. 1. Зависимость износа образцов от угла атаки струи, содержащей различные абразивы

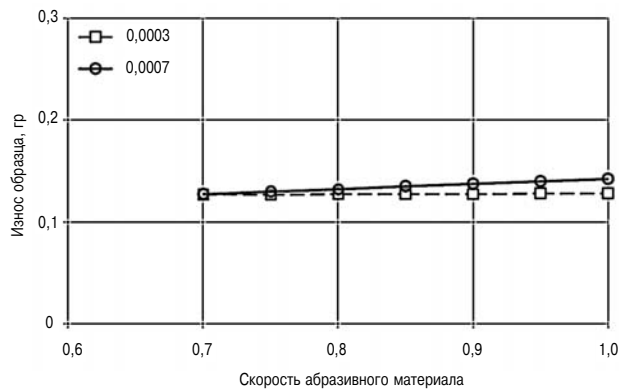


Рис. 2. Зависимость износа образца №1 от безразмерной скорости при различной массе крошки

силикатами, которые в процессе горения окисляются; в результате уходящие газы двигателя содержат твердые оксиды различных химических элементов (Si, Ti, Al, Fe и другие).

На рис. 1, 2 представлены основные результаты исследования влияния на износ образцов угла атаки, скорости и массы абразивного материала.

Проведенные исследования показали, что крошка обладает меньшими абразивными свойствами по сравнению с оксидами металлов. Таким образом, крошку, применяемую для очистки осевых турбин ТК малооборотных двигателей, можно применить также для очистки проточной части турбин среднеоборотных двигателей. Износы, полученные от применения крошки на фоне общего износа элементов ТК в процессе работы дизелей, работающих на тяжелых сортах топлива, будут незначительны, учитывая то, что продолжительность очистки составляет несколько минут через каждые 100–150

часов работы. Чистка крошкой проточной части и элементов радиальных турбин ТК будет способствовать поддержанию КПД ТК и удельного расхода топлива двигателем в заявленных изготовителем пределах.

Литература

1. Башуров Б.П., Шарик В.В. Функциональная надежность турбокомпрессоров систем наддува судовых дизелей. — Двигателестроение. — № 2. — 2005. — С. 23–29.
2. Обозов А.А. Номографический метод оценки эффективности функционирования турбокомпрессоров судовых дизелей // Двигателестроение. — 2007. — № 2. — С. 37–41.
3. Межеричкий А.Д. Турбокомпрессоры систем наддува судовых дизелей. — Л.: Судостроение. — 1986. — 248 с.
4. Герасиди В.В., Николаев Н.И. Анализ нагрузки и расхода топлива судовых дизель-генераторов в широком диапазоне режимов работы // Проблемы эксплуатации водного транспорта и подготовки кадров на юге России: мат. конф. В 2 ч. / Восьмая региональная науч.-техн. Конф. 26–28 ноября 2009 г. — Новороссийск: МГА им. Ф.Ф. Ушакова. — Ч. 2 — 41 с.
5. Gizzi W., Jung M., Cellbrot P., Hauwisen V. Contamination, a challenge for turbochargers in HFO operation. Paper № 176. — CIMAC 2007. — Vienna.
6. Winter T., Rieder R., Werdecker F., Woyke J. Design of Radial Compressor Wheels by Usage of Simplified, Discrete Excitation Functions. Paper № 20. — CIMAC 2007. — Vienna.
7. Герасиди В.В., Дубровин Р.Г. Эксплуатация турбокомпрессоров судовых дизель-генераторов, работающих на тяжелом топливе // Наука и инновации-2009: мат. конф., том 14, технические науки / 5-я Международная науч. — практ. конференция 7–15 ноября 2009 г. — Пшемьсль: Наука и инновации. — 2009. — С. 3–6.
8. Жук А.Н., Епихин А.И. Оценка скорости износа элементов проточной части газовых турбин агрегатов наддува судовых дизелей, работающих на тяжелом топливе. — Двигатели внутреннего сгорания. — 2008. — № 2. — С. 97–101.
9. Герасиди В.В. Экспериментальная установка и методика исследования износа элементов проточной части радиально-осевых турбин турбокомпрессоров судовых дизелей.
10. Николаев Н.И., Березовский Ф.М., Епихин А.И. Исследование химических, металлографических и механических свойств газоприемных корпусов и сопловых аппаратов турбонаддувочных агрегатов с радиально-осевой турбиной // Двигателестроение. — № 3. — 2005.
11. Николаев Н.И., Жук А.Н., Дубровин Р.Г. Оценка эффективности соплового аппарата радиально-осевой турбины газотурбонагнетателя при эрозионном износе продуктами сгорания // Сборник научных трудов НГМА. Новороссийск: Морская государственная академия имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 2007.— Вып. 12 — 3 с.