

УДК 621.436(076)

Т.П. Бубенцова

Севастопольский национальный технический университет,

ул. Университетская, 33, Севастополь, 99053

E-mail: emss@stel.sebastopol.ua

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ ГТН СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ ТВЕРДЫМИ ОЧИСТИТЕЛЯМИ

На основе опыта эксплуатации судовых двухтактных ДВС с наддувом и результатов, полученных в Севастопольском национальном техническом университете при изучении способов очистки компрессоров судовых газотурбинных двигателей, рассматривается возможность применения твердых очистителей для очистки газового тракта газотурбонагнетателей (ГТН) судовых дизелей от отложений.

Многолетний опыт эксплуатации судовых дизелей с газотурбонаддувом показывает, что в процессе эксплуатации происходит постепенное ухудшение технического состояния газотурбонагнетателей (ГТН) и его характеристик из-за загрязнения проточных частей турбины и компрессора. При этом уменьшается проходное сечение и увеличивается сопротивление газового тракта, увеличивается коэффициент остаточных газов в цилиндре, повышается температура выпускных газов и удельный расход топлива. Таким образом, нарушается степень согласованности характеристик дизеля и ГТН, достигнутая при проектировании и доводке [1].

Чтобы обеспечить нормальную работу дизеля в межремонтный период эксплуатации, необходимо периодически производить безразборную очистку турбокомпрессора от загрязнения.

Отложения на лопатках турбины можно условно разделить на три типа: зольные пеплообразные отложения толщиной 0,1...0,3 мм, имеющие высокую шероховатость; сажистые мажеобразные отложения толщиной до 3 мм; твердые пористые отложения, образующиеся при выгорании сажистых отложений и при работе дизелей на высоковязких сортах топлива.

Целью данной статьи является анализ существующих систем промывки проточной части ГТН пресной водой и различными растворами и исследование возможности применения твердых очистителей для удаления отложений из проточной части.

В настоящее время некоторые фирмы предусматривают на дизелях штатные системы для промывки проточной части турбин пресной водой.

Химический анализ отложений в турбине, определение их адгезии говорят о том, что наиболее легко удаляются отложения первого типа; они практически полностью смываются при движении воды по поверхности лопаток. Отложения второго типа толщиной до 1 мм также достаточно хорошо удаляются водой, однако в этом случае необходимо ударное воздействие капель.

Чтобы на лопатках турбины не успевали образовываться значительные отложения, в зависимости от нагрузки и сорта применяемого топлива, промывку необходимо производить через каждые 100...200 часов работы в течение 8...10 минут. Это позволит обеспечить работу турбины практически с постоянным КПД [1].

Однако из-за большой разности температур моющей воды и лопаток турбины пленочный режим поверхностного кипения неустойчив, омывающая жидкостная пленка постоянно разрывается, что снижает эффект очистки; кроме того, лопатки испытывают дополнительные термические напряжения. Поэтому при промывке нужно соблюдать два условия.

1. Промывку следует осуществлять на долевой нагрузке дизеля, при которой температура газов перед турбиной не превышает 523 К (250 °С), а частота вращения турбины не более 4000...5000 мин⁻¹.
2. Моющую воду перед впрыском в турбину надо подогреть до температуры 353...363 К (80...90 °С).

К недостаткам этого метода, кроме необходимости снижения нагрузки дизеля, нужно отнести также и то, что промывается только проточная часть турбины, а на поверхностях утилизационного котла и глушителя нагар остается и удаляется лишь механической чисткой при разборке.

Вместе с тем, в настоящее время мощные малооборотные дизели работают в основном на дешевых высоковязких сортах топлив, при сгорании которых наибольшие отложения наблюдаются на номинальных и близких к ним нагрузках. Это объясняется повышенным содержанием серы, окислов ванадия, золы, натрия и др. Отложения на рабочих лопатках в этих случаях составляют 2...3 мм, а на сопловых — 5...6 мм и имеют твердую пористую структуру, близкую к отложениям третьего типа. При этом образование максимального слоя отложений и его стабилизация происходит за 100...200 часов работы дизеля. Использование воды как средства очистки становится неэффективным [2].

В качестве альтернативного средства для очистки газопротоочной части турбины можно использовать твердые очистители, а именно дробленую скорлупу косточковых культур и различные злаковые, в частности рис, гречку, ячмень и др.

Качество очистки в большой степени зависит от физических свойств материала лопаток и очистителя. Так как твердость материала лопаток превышает твердость очистителя в 15...20 раз, то твердый очиститель будет удалять отложения, не разрушая поверхность лопаток. При этом обязательным условием является отсутствие в очистителе абразивных частиц.

Характер движения частиц карбобласта в турбинной ступени определяется скоростью, давлением, температурой и вязкостью газового потока, концентрацией смеси, скоростью витания и критической скоростью.

Скорость витания представляет собой такую скорость газа в вертикальной трубе, при которой частица, помещенная в трубу, находится в состоянии подвижного равновесия. Для частиц диаметром $d_t = 1...10$ мм скорость витания может быть определена [3] по формуле

$$C_{вит} = 5 \cdot \sqrt{d_t \cdot \frac{p_t}{p_g}},$$

где p_t и p_g – соответственно плотность твердых частиц и газа.

Критическая скорость представляет собой минимальную скорость, при которой твердая частица транспортируется по горизонтальному трубопроводу во взвешенном состоянии.

Критическая скорость может быть определена [4] по формуле

$$C_{кр} = g \sqrt{g \cdot D} \cdot \sqrt{\mu \cdot \frac{p_t \cdot C_{вит}}{p_g \cdot g \cdot d_t} \cdot \frac{\Delta}{D}}.$$

Здесь D – диаметр трубопровода; μ – весовая концентрация воздушной смеси; $C_{вит}$ – скорость витания частиц; Δ – средняя высота выступов шероховатости; d_t – средний диаметр твердых частиц.

Для межлопаточных каналов D – гидравлический диаметр, равный

$$D = 4 \cdot \frac{F}{S},$$

где F – площадь проходного сечения канала; S – периметр канала.

Опыты, проведенные в Севастопольском национальном техническом университете, показали, что плотность ореховой скорлупы раздробленных фруктовых (абрикосовых, персиковых, вишневых, сливовых) косточек лежит в пределах 1,13...1,35 кг/м³. Это соответствует плотности ряда круп, семян и мелкой соли, для которых критическая скорость известна [4, 5] и составляет 10...18 м/с. Скорость витания ориентировочно примерно в 1,5 раза ниже критической. Можно считать, что критическая скорость частиц карбобласта также составит 10...18 м/с. Такая скорость во входной части турбины ГТН соответствует частоте вращения ротора около 20 с⁻¹ (1200 об/мин). При меньших скоростях транспортировка карбобласта через проточную часть будет неудовлетворительной.

Качество удаления отложений с поверхности лопаток в большой степени зависит от физических свойств материала лопаток и очистителя и в первую очередь от твердости. Так как твердость материала лопаток превышает твердость зольных отложений примерно в 10...15 раз принципиально возможно подобрать такой твердый очиститель, который, удаляя отложения, не разрушал бы поверхности лопаток. Таким очистителем и является карбобласт, твердость которого в 10...15 раз ниже твердости материала лопаток. Учитывая также кратковременное воздействие карбобласта можно ожидать, что при его применении абразивного износа не будет. Однако из-за больших окружных скоростей лопаток, особенно на их периферии, абразивный износ возможен, причем эта опасность значительно возрастает при использовании неочищенного карбобласта, имеющего минеральные включения. Поэтому необходимо иметь зависимости, позволяющие оценить возможную эрозию лопаток.

Для определения глубины h и диаметра d отпечатка при ударе частицы карбобласта о поверхность лопатки будем считать, что угол атаки α близок к 90°, так как при малых углах атаки из-за скольжения карбобласта по поверхности лопатки эффект очистки будет незначительным. Предположим, что частица карбобласта имеет шарообразную форму, диаметр ее – d_t , вес – P , и она движется под углом атаки около 90° со скоростью ω_t . Под действием силы инерции частица будет внедряться в металл. Глубина h внедрения будет зависеть от нормальной составляющей этой силы

$$Y_x = \frac{P}{g} \ddot{X},$$

где $\ddot{X} = \frac{d^2 X}{dt^2}$.

Сила сопротивления F внедрению может быть определена из соотношения типа Мейера, которое справедливо и для динамического внедрения [3] $F = a \cdot d^n$, где d – диаметр отпечатка; a, n – константы изнашиваемого материала.

Из геометрических соображений можно принять, что $d^2 = 4x \cdot d_T$, где x – текущая глубина погружения по нормали. Тогда сила сопротивления при внедрении будет равна

$$F_x = 2^n \cdot d_T^{n/2} \cdot a \cdot x^{n/2}.$$

Приравняв силы Y_x и F_x и решая полученное уравнение для граничных условий ($x = 0, \dot{X} = \omega_T \cdot \sin \alpha, x = h, \dot{X} = 0$) после ряда преобразований получаем для определения глубины h и d отпечатка следующие выражения

$$h = 4,6 \cdot 10^{-3} \cdot d_T \cdot \omega_T \cdot HM^{-1/2} \cdot \sin \alpha, \text{ мм}, \quad (1)$$

где HM – твердость Майера, динамическая изнашиваемого материала.

$$d = 2\sqrt{h \cdot d_T}. \quad (2)$$

Известно [3, 6], что процесс износа проходит наиболее интенсивно при углах атаки α , равных: $\alpha = 30 \dots 50^\circ$ – для пластмасс и $\alpha = 40 \dots 60^\circ$ – для металлов.

Так как твердость зольных отложений на лопатках ниже твердости пластмасс, можно считать, что оптимальный угол атаки с точки зрения качества очистки лопаток близок к 90° .

По изложенной выше методике был произведен расчет глубины внедрения и диаметра отпечатка для частиц карбобласта различных размеров и относительных скоростей движения при угле атаки 90° . В качестве материала лопаток были выбраны сталь 1X18H2 и сплав ВТЗ-1, имеющие близкие прочностные свойства. Расчеты показали, что при диаметре частицы $d_T = 4$ мм и скорости ее движения $\omega_T = 240$ м/с глубина и диаметр лунки после удара будут: $h = 0,24$ мм и $d = 2$ мм, что недопустимо.

Как видно из выражения (1), для уменьшения глубины проникновения частиц очистителя в металл лопаток необходимо при увеличении размеров частиц карбобласта уменьшать частоту вращения ротора турбины.

Однако уменьшение абсолютной скорости частицы карбобласта приводит к увеличению угла атаки, а, следовательно, и ударно-абразивного износа. Чтобы уменьшить последний необходимо вводить карбобласт во входную часть турбины со скоростью, близкой к скорости газового потока.

Так как на периферии окружная скорость больше, чем у корня, то и относительная скорость на периферии также будет больше, угол же атаки будет больше у корня, чем на периферии. Поэтому можно ожидать, что у периферии возможно повреждение непосредственно кромки лопатки, тогда как у корня эрозии будет подвержен значительно больший участок поверхности лопатки, прилегающий к кромке с вогнутой стороны.

Минимальная частота вращения турбины определяется критической скоростью потока, составляющей, как уже выше отмечалось, примерно 20^{-1} (1200 об/мин).

Выводы. Применение системы непрерывной очистки газового тракта ГТН приводит к улучшению процессов газообмена и сгорания топлива в цилиндре, снижению удельного расхода топлива и концентрации вредных примесей в выпускных газах. Теоретическое исследование показало, что сухую чистку газовой части ГТН можно производить, не снижая нагрузки двигателя, без опасности эрозионного разрушения лопаток. Дальнейшие исследования связаны с экспериментальной проверкой результатов теоретических исследований.

Библиографический список

1. Корнилов Э.В. Системы газотурбинного наддува судовых дизелей (Основы теории, эксплуатация, конструкции, ремонт) / Э.В. Корнилов, В.П. Бойко. — Одесса: Студия «Негоциант», 2006. — 224 с.
2. Кодымский Э.М. Особенности технической эксплуатации судовых малооборотных дизелей / Э.М. Кодымский. — Одесса: Латстар, 2002. — 132 с.
3. Докторович А.С. Разрушающее действие высоконапорной водопесковой струи / А.С. Докторович // Литейное производство. — 1969. — № 11. — 328 с.
4. Коробов М.Н. Пневно-, гидро- и аэрозоль- транспорт на промышленных предприятиях / М.Н. Коробов, В.Н. Кондаков. — М.: Техника, 1967. — 462 с.
5. Воробьев А.А. Пневмотранспортные установки / А.А. Воробьев. — М.: Машиностроение, 1969. — 246 с.
6. Стыллер В.Е. Пути повышения эрозионной износостойкости конструкций из полимерных материалов / В.Е. Стыллер, С.Н. Ратнер // Вестник машиностроения. — 1971. — № 5. — С. 38–42.

Поступила в редакцию 28.12.2008 г.