

УДК 621.438

А.Г. Андриец, канд. техн. наук,

В.Н. Литошенко, доцент, канд. техн. наук

Севастопольский национальный технический университет

Студгородок, Стрелецкая балка, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: andriets1@mail.ru

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОТРАБОТКИ МЕТОДИКИ И СРЕДСТВ ОЧИСТКИ ЗАГРЯЗНЕННОГО ГТД ТВЕРДЫМ ОЧИСТИТЕЛЕМ

Приведены результаты экспериментальной отработки методики и средств очистки твердым очистителем натурального газотурбинного двигателя (ГТД) установки М35 судна на воздушной подушке проекта «Зубр».

Процесс загрязнения проточной части ГТД морских судов происходит значительно интенсивнее на судах с динамическими принципами поддержания: судах на воздушной подушке (СВП) и подводных крыльях, причем в штормовую погоду и на малых скоростях движения процесс загрязнения ускоряется. В середине 1980-х годов эта задача встала также перед проектировщиками и эксплуатационным персоналом экранопланов.

Загрязнение происходит в результате постепенного отложения в проточной части ГТД морской соли, продуктов сгорания и других жидких и твердых частиц (пыли, сажи), вносимых с воздухом. При этом наихудшие последствия вызывает попадание в проточную часть частиц (паров) масла (засасываются через лабиринтные уплотнения подшипников) и выхлопных газов, которые, осаждаясь, действуют, как клейкая основа, и способствуют налипанию других частиц, образуя липкие, трудносмываемые отложения. Следствием загрязнения проточной части являются: – снижение КПД, расхода воздуха относительно расхода топлива, что приводит к помпажу и повышению температуры газа на выходе из камеры сгорания, снижению мощности ГТД; – сульфатная коррозия, особенно в горячей части ГТД при соединении отложений с серой, содержащейся в продуктах сгорания топлива.

Восстановление рабочих параметров ГТД промывкой жидкими моющими средствами требует остановки ГТД и специальной технологии с прогревом и охлаждением двигателя, которая занимает несколько часов. Кроме того, даже специальные жидкие очищающие средства не удаляют липкие маслянистые загрязнения. Промывка жидкими средствами на работающем двигателе может осуществляться только на нерасчетных режимах работы и обладает существенными недостатками [1]: соль, попадая с моющей жидкостью из компрессора в высокотемпературную часть работающего ГТД, вызывает особенно интенсивную коррозию. Кроме того, при испарении жидкости увеличивается объемный расход рабочего тела через компрессор,

что уменьшает углы атаки, способствуя получению отрицательных углов, вплоть до помпажа.

При проектировании энергетической установки М35 с ГТД типа ДР71 для СВП "Зубр" проектантом НПП "Машпроект" было решено разработать методику и конструктивные средства для возможности очистки проточной части от загрязнений без остановки ГТД, так как суда такого типа в особых условиях не имеют времени для остановки ГТД и промывки жидким моющим средством в течение нескольких часов. Опыт проведения модельных испытаний в стендовых условиях по применению твердого очистителя на работающем компрессоре показал хорошие результаты [2]; установлено, что процесс отложений в проточной части носит сложный характер, трудно моделируется [3] и требует натурных исследований.

Твердый очиститель должен удовлетворять следующим требованиям:

- исключать нагарообразование и эрозию лопаточного аппарата;
- частицы очистителя не должны следовать линиям тока газового потока, контактируя с поверхностями лопаток под углом, обеспечивающим эффект соскребывания отложений;
- не засорять каналы воздушного охлаждения высокотемпературных элементов проточной части, зазоры в уплотнениях и т.д.;
- обладать малой зольностью и слабой прилипаемостью остатка – чтобы в случае отложений в горячей части ГТД частиц расплавленного очистителя обеспечивалась возможность последующей отмывки этих отложений жидким моющим средством.

Из ранее применявшихся в опытах очистителей (мелкодробленый каменный уголь, композиции гранулированных химических соединений, рис и т.д.) таким требованиям в большей степени отвечает очиститель органического происхождения карбобласт – измельченная скорлупа косточек абрикосов и грецких орехов. Для очистки ГТД ДР71 мощностью 8 МВт карбобласт просеивался через два сита с ячейками 1 мм и 2,5 мм, проверялся на отсутствие каменных, стеклянных и других очень твердых включений; размер частиц применяемого карбобласта составлял 1...2,5 мм с удельным весом 0,66 кг/дм³.

Анализ результатов предыдущих испытаний, расчетных и литературных данных [2] показал, что во время очистки обороты ГТД должны снижаться до некоторых оптимальных значений, так как при оборотах компрессора, близких к номинальным, все лопатки компрессора имеют положительный или нулевой угол атаки; частицы очистителя отстают от потока воздуха и натекают на лопатки с положительным углом атаки, контактируя только с их вогнутой стороной. Для контакта частиц с выпуклой стороной лопаток необходимо создать режим с отрицательными углами атаки, для чего уменьшить окружную скорость u в большей степени, чем скорости w_1

и c_2 (относительная скорость на входе и абсолютная скорость потока на выходе рабочего колеса компрессора).

Соответствующий режим в компрессоре возможен при уменьшении оборотов, причем по мере уменьшения числа оборотов увеличивается число ступеней от последней ступени к первой, работающих с отрицательными углами атаки. Причина этого - непропорциональное изменение числа оборотов двухкаскадных компрессоров и расхода воздуха через них. Получению отрицательных углов атаки на лопатках компрессора способствует и подаваемый очиститель, объем которого незначительно увеличивает объемный расход рабочего тела через компрессор

Предприятием-изготовителем для установки М35 был доработан ГТД ДР71 для возможности очистки твердым очистителем: в проточной части на внутренней обечайке перед отверстием отбора воздуха на охлаждение турбинных лопаток были установлены отбойные козырьки с целью предотвращения попадания очистителя в каналы охлаждения.

Испытания ДР71 по отработке методики очистки проводились в море на плавстенде в условиях, приближенных к эксплуатационным: форсунками распыливался раствор морской воды соленостью $35 \pm 5\text{‰}$ (г соли/кг воды), который поступал на вход двигателя, пройдя секцию натуральных центробежных сепараторов диаметром 220 мм, устанавливаемых на СВП "Зубр" для сепарации крупных капель морского аэрозоля. При испытаниях ГТД с целью более быстрого засоления его до достижения предельных согласно инструкции по эксплуатации изменений параметров потока, вторая ступень очистки воздуха (сетчатые фильтры) была снята. Полученные результаты обрабатывались по известным методикам, и в приведенном виде параметры ГТД сравнивались с параметрами чистого и загрязненного двигателя. Согласно инструкции по эксплуатации, условием для очистки было предельное по сравнению с исходной повышение температуры газа t_4 за турбиной низкого давления (ТНД), равное 25°C .

В начальной стадии исследований ГТД на плавстенде снималась исходная характеристика с чистой проточной частью на режимах $(0,3 \dots 1,0) N_e$ и проводилось засоление проточной части через фильтры-сепараторы до достижения $\Delta t_4 = 25^\circ\text{C}$; характеристика загрязненного ГТД снималась на режимах $(0,3 \dots 1,0) N_e$.

На следующей стадии исследований на работающем ГТД на каждом из пониженных режимов в диапазоне $(0,5 \dots 0,8) N_e$ после тепловой стабилизации режима вводилось 3 дозы карбобласта по 0,33 кг размером частиц $1 \dots 2,5$ мм, т.е. одна доза составляла около 0,01 от расхода воздуха через ГТД в режиме очистки. Введение карбобласта производилось дозатором, в котором доза карбобласта 0,33 кг равномерно делилась на 4 порции, вводимых по окружности входного сечения ГТД через 90° у обтекателя ("кока"); доза карбобласта подавалась в течение $2 \dots 3$ с сжатым воздухом к корню

лопаток входного направляющего аппарата. После стабилизации режима (около 1 мин) контролировалась температура t_4 и частоты вращения компрессоров низкого (КНД) и высокого (КВД) давления; на этом же режиме вводилась вторая доза карбобласта, затем аналогичным образом на этом же режиме – третья доза. Одна очистка заключалась в введении трех доз по 0,33 кг карбобласта. После этого снималась характеристика ГТД с регистрацией параметров на всех режимах работы.

В момент введения дозы очистителя в ГТД отмечался мгновенный (1...2 с) скачок температуры t_4 на 30...60°C. Когда испытания проводились в темное время суток, наблюдался вылет из дымохода раскаленных частиц карбобласта. После введения в проточную часть на разных режимах 8...10 доз карбобласта проводилась промывка ГТД жидким моющим средством "Синвал" по технологии предприятия-изготовителя.

Проведенные испытания показали, что на работающем загрязненном ГТД с $\Delta t_4 = 25^\circ\text{C}$ после введения первой дозы карбобласта 0,33 кг температура уменьшается на 20...22°C, после введения второй дозы она падает на 2...3°C, ввод третьей дозы приводит уже к незначительному снижению температуры t_4 на 1...2°C или не влияет совсем. Следовательно, с целью уменьшения количества вводимого в проточную часть карбобласта и уменьшения его отложений на лопатках для восстановления характеристик ГТД достаточно ввода двух доз карбобласта. Наилучшие результаты очистки получены на режимах $(0,6...0,7)N_e$ с наименьшими величинами центробежных сил : после введения 2...3 доз карбобласта параметры ГТД восстановились, осмотр проточной части с помощью смотрового перископического устройства РВП-496 показал удовлетворительное состояние очищаемых поверхностей.

Для сравнения с отложениями в проточной части выполнен анализ частиц карбобласта. Спектр отложений на лопатках первой ступени турбины высокого давления аналогичен спектру частиц карбобласта: обнаружены следы элементов Cu, Na, Mg, Ag, Pb. Возможность прилипания частиц карбобласта к лопаткам проверялась в муфельной печи при температуре от 100 до 950°C: при 250°C происходит обугливание частиц, при 450°C – спекание золы, при 650°C – прилипание золы к стенкам тигля; сцепление золы с поверхностью тигля увеличивается при подъеме температуры до 950°C. Следовательно, при очистке карбобластом максимальная температура в проточной части ГТД не должна превышать 650°C.

Для дозирования и подачи в проточную часть дозы карбобласта 0,33 кг

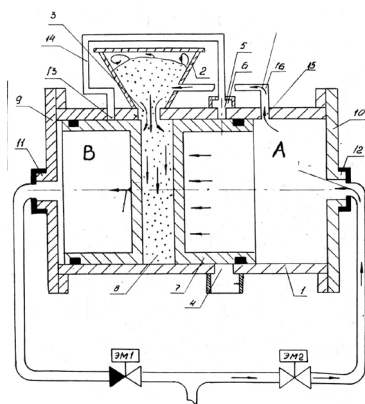


Рисунок 1 – Схема дозатора карбобласта

четырьмя равными порциями разработан, изготовлен и испытан дозатор карбобласта. На рисунке 1 изображена схема дозатора карбобласта с подводщими трубопроводами сжатого воздуха и электромагнитными клапанами. Сжатый воздух давлением 0,4...0,6 МПа подавался к дозатору из переходника между КНД и КВД. При подаче сжатого воздуха в полость А открытием электромагнитного клапана ЭМ2 поршень 7 перемещается влево до упора в крышку 9 в положение загрузки карбобласта 3 из бункера 2. При этом в определенный момент через отверстие 15 в бункер 2 поступает из полости А

сжатый воздух на барботаж карбобласта для заполнения четырех мерных камер 8. Нажатием кнопки "Пуск" пульта управления закрывается клапан ЭМ2 и открывается клапан ЭМ1, сжатый воздух поступает в полость В, поршень 7 перемещается вправо до упора в крышку 10 в положение разгрузки карбобласта. При этом в определенный момент открывается отверстие 13 подачи сжатого воздуха из полости В в ресивер 6 и далее на продувку мерных камер 8, откуда карбобласт выдувается через четыре расходных отверстия 4 в трубопроводы подачи карбобласта на вход. На рисунке 2 изображена схема расположения труб подачи карбобласта в ГТД. На испытаниях выполнено более 320 циклов работы дозатора, периодически проверялась равномерность выдачи четырех порций и их суммарный вес: дозатор работал надежно без "заеданий" выдавая дозу 0,33 кг равными порциями по 83 ± 3 г.

Техническими условиями на установку М35 предусмотрена очистка ее твердым очистителем. Разработанный метод очистки проточной части ГТД твердым очистителем и конструкция дозатора твердого очистителя защищены тремя авторскими свидетельствами.

Применение этого дозатора для очистки ГТД мощностью в два раза

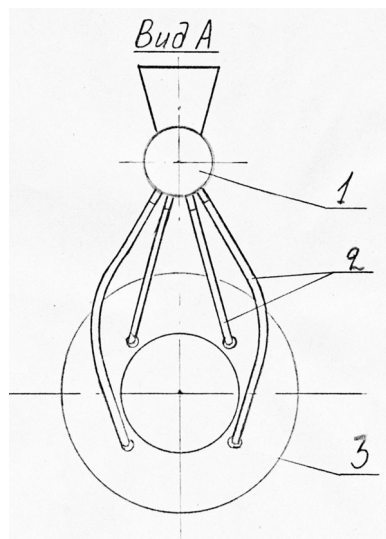


Рисунок 2 – Схема расположения дозатора (1) и труб (2) подачи карбобласта в ГТД (3)

большей, и, следовательно, с большим расходом воздуха не дало положительного результата: количество очистителя должно быть пропорционально расходу воздуха, одна доза очистителя должна примерно составлять 0,01 от расхода воздуха в режиме очистки. Следовательно, для ГТД большей мощности необходимо применять дозатор большего размера или использовать два дозатора аналогичной конструкции. Кроме того, в связи с ростом ометаемой площади лопаточного аппарата и диаметра корпуса более мощных ГТД рекомендуется увеличить до 6...8 количество точек ввода карбобласта в проточную часть. Для уточнения количества вводимого карбобласта для ГТД отличающейся от М35 мощности, необходимы исследования на соответствующем натурном двигателе или перерасчет имеющихся данных с учетом расхода воздуха, ометаемой площади элементов проточной части и предельной окружной скорости лопаток.

Очистка твердым очистителем может применяться и в ГТД с теплоутилизационным контуром (ТУК), однако требует особой проработки в части режимов ГТД во время очистки и др. Например, в установках М25 мощностью 18 МВт с ТУК конструкции НПП "Машпроект" ролкеров типа "Атлантика", а именно транспортно-десантного корабля ВМФ США "Rou M. Wheat" и других этого типа под флагом Великобритании, очистка производится на режиме не выше $0,3 N_e$ с подачей карбобласта в зону первичного воздуха каждой из десяти жаровых труб.

В настоящее время в связи с возобновлением строительства кораблей ВМФ прорабатывается возможность применения очистки твердым очистителем нового ГТД, разрабатываемого для строящихся кораблей ВМФ. Сфера использования ГТД постоянно расширяется: они применяются в качестве привода в газоперекачивающих агрегатах, локомотивных и автотранспортных двигателях, условия их эксплуатации значительно отличаются друг от друга. Требования к эксплуатационной надежности и долговечности постоянно возрастают, что требует в зависимости от конструкции систем подготовки рабочего воздуха, оснащения ГТД обязательными стандартизованными системами очистки проточной части от загрязнений и проведения научных и экспериментальных исследований по их разработке.

Выводы.

1. Очистка загрязненного ГТД твердым очистителем - карбобластом - эффективная кратковременная операция, не требующая остановки двигателя, которая может производиться поочередно на каждом из работающих ГТД со снижением мощности до $(0,6...0,7) N_e$ при максимальной температуре в проточной части не выше 650°C .
2. В проточную часть достаточно подать две дозы карбобласта по 0,33 кг (каждая около 0,01 от расхода воздуха на режиме очистки) с размером частиц карбобласта 1...2,5 мм. На всех испытанных режимах очистки

применение карбобласта не приводило к эрозии лопаток и загрязнению охлаждающего воздуха.

3. Доработка проточной части ГТД (установка козырьков на внутренней обечайке перед отверстием отбора воздуха на охлаждение) эффективно предотвращает попадание частиц карбобласта в охлаждающий воздух.

4. После нескольких очисток карбобластом, но не позднее, чем после введения 8...10 доз в ГТД, производить промывку проточной части жидким моющим средством.

5. Дозатор карбобласта работает надежно, подавая на вход ГТД дозу 0,33кг равномерно четырьмя порциями.

6. Для натуральных ГТД с мощностью и расходом воздуха существенно отличающихся от ГТД типа ДР71 установки М35, необходимы дальнейшие исследования для уточнения параметров очистки карбобластом: определение достаточной дозы и количества точек подвода его в проточную часть, а также защиты каналов отбора охлаждающего воздуха и др.

Библиографический список

1. Вудворд Дж. Морские газотурбинные установки: Пер. с англ / Дж. Вудворд. — Л.: Судостроение, 1979. — 360 с.
2. Слободянюк Л.И. Из опыта удаления отложений с компрессорных лопаток / Л.И.Слободянюк, Т.П.Бубенцова // Судостроение. — 1974. — №12. — С. 23 – 24.
3. Ронкин Л.М. Исследование отложений в проточной части газотурбогенератора / Л.М. Ронкин // Судостроение. — 1980. — № 11. — С. 32 – 34.

Поступила в редакцию 16.01.2004 г.