

УДК 621.9.048.7
DOI: 10.12727/17808

Н.В. Бекренёв, д.т.н.,
М.В. Аврамов, к.т.н.,
А.П. Петровский, инженер,
А.М. Сарсенгалиев, аспирант
(Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,
Россия, г. Саратов, ул. Политехническая, 77)
E-mail: Ajdo5@mail.ru

Новая ультразвуковая технология восстановления работоспособности горелочных устройств газоперекачивающих агрегатов

Выполнен анализ ресурсной наработки горелочных устройств на газоперекачивающих агрегатах. Показана целесообразность восстановления работоспособности не выработавших ресурс устройств. Проведены экспериментальные исследования по ультразвуковой очистке каналов в горелочных устройствах и установлена принципиальная возможность применения данного метода для продления ресурса этих устройств. Это позволяет получить экономический эффект за счет снижения потребности в новых устройствах данного типа.

Ключевые слова: горелочные устройства; ультразвуковая установка; очистка.

N.V. Bekrenev, d.en.s.,
M.V. Avramov, c.en.s.,
A.P. Petrovskiy, engineer,
A.M. Sarsengaliev, postgraduate
(Saratov State Technical University named after Yu.A. Gagarin,
77, Polytekhnicheskaya Street, Saratov, Russia)

New ultrasonic technology of performance restoration of burner devices of gas pumping units

The analysis of the problem of pollution removal from hard-to-reach areas (cavities, closed openings and channels) on complicated-shaped parts of products of power mechanical and aggregate engineering is performed. The chemical composition of pollution on the example of the burner devices is studied. It is determined, that the large amount of deposits on weight consists of oxides of iron and the alloying metals. It is shown, that the most effective method of performance restoration of channels and openings is ultrasonic cleaning. However, this method has restrictions on impact on the hidden (shadow) zones owing to attenuation in cavitation processes. The cleaning method, according to which the combined impact is applied to the cleaned surfaces of the general cavitation and local contact vibration effect of the ultrasonic radiator, leading to high-frequency deformations and tension in deposits of organic and inorganic pollution and to their intensive peeling, is suggested. The technological modes of ultrasonic cleaning are defined experimentally. It is determined, that application of the suggested method allows significantly reduce the time of cleaning of channels and openings with removal to 97-98% of pollution at the brought ultrasonic power in 1 kW in comparison with the existing schemes of the general cavitation cleaning.

Keywords: burner devices; ultrasonic device; cleaning.

Одними из основных элементов газоперекачивающих агрегатов (ГПА) на основе конверсионных газотурбинных двигателей являются камеры сгорания. Паспортными данными регламентируются определенная мощность, частота вращения ротора турбины и выбросы в окружающую среду соединений классов CO_x и NO_x . Опыт эксплуатации горелочных устройств выявил некоторые особенности применения данных систем на ГПА.

Горелочные устройства имеют большое количество рабочих отверстий малого диаметра (0,8...1,0 мм), расположенных радиаль-

но в центральном корпусе и в осевом направлении газоподводящих трубок [1]. В процессе эксплуатации выявляется нарушение требуемых параметров горения газозооной смеси, что связано с отложением, предположительно, соединений сопутствующих горючему газу элементов на стенках каналов и пилоннов. Это вызывает повышенное газодинамическое сопротивление, что приводит к снижению фактической мощности ГПА, а также повышенному содержанию соединений CO_x и NO_x , что сказывается отрицательно на экологических показателях агрегата. В конечном итоге

отмеченные нарушения в работе горелок отрицательно влияют на качество предоставляемых услуг и нарушают нормальную работу по обслуживанию газоперекачивающих агрегатов [2].

Отмеченные нарушения проявляются задолго до выработки горелкой паспортного ресурса (по опыту эксплуатации – при выработке до 6 000 ч против необходимых 24 000 ч), что вызывает необходимость замены комплекта горелок на новый и дополнительные финансовые расходы.

По мнению авторов, можно решить данную проблему за счет восстановления работоспособности горелок, не выработавших паспортный ресурс, путем очистки каналов и рабочих отверстий от загрязнений.

Целью исследований являлось определение технической возможности восстановления работоспособности горелочных устройств путем очистки каналов от загрязнений и обоснование наиболее эффективного метода очистки для его последующей отработки и практического внедрения.

Как известно, очистка отверстий от загрязнений может производиться несколькими методами: механическими; химическими; электрофизическими.

К механическим методам относятся прокачка через отверстия воздушно-абразивной или водно-абразивной струи; обработка вращающимися капроновыми, медными или стальными проволочными щетками; притирка абразивными пастами с последующей промывкой. Все указанные механические методы неприменимы для решения поставленной задачи по причине малого размера отверстий и трудному доступу к ним (очистка щетками и притирка) и, основное, по причине изменения размера отверстия под влиянием силового царапающего действия не только на загрязнения, но и на стенки отверстия.

К химическим методам относится применение химических соединений, растворяющих загрязнения и отделяющих их от основы. Однако эти методы применяются чаще для удаления жировых и других биологических пленок и наслоений и малоэффективны в случае наличия твердых, сплавленных с основой загрязнений, которые наиболее ожидаемы для горелок, работающих в условиях высоких температур. Также немаловажным фактором является экологическая опасность большинства растворителей, применение которых вызовет дополнительные затраты на нейтрализацию отработанных растворов и охрану

труда [3].

Основными электрофизическими методами очистки являются обработка в вакууме газоразрядной плазмой и ультразвуковая очистка в воде и моющих средах на водной основе. Использование газоразрядной плазмы характерно для производства изделий микроэлектроники и электровакуумных приборов. Данный метод осуществляется в вакууме и обеспечивает эффективное удаление пленок всех типов толщиной не более десятков микрометров [3]. Очевидно, в отверстиях горелок возникают отложения значительно большей толщины, поскольку указанные выше пленки не оказывали бы влияния на расход и горение газозооной смеси. К тому же использование сложных вакуумных установок требует специального помещения, обученного персонала и наличия больших вакуумных камер для размещения очищаемых горелок. Это существенно удлиняет цикл обработки и приводит к неоправданным затратам.

В авиационном приборо- и агрегаторостроении, а также при производстве топливной аппаратуры (распылители дизельного топлива) широко применяются методы ультразвуковой очистки [4], позволяющие эффективно удалять загрязнения средней степени твердости и прочности сцепления с основой без нарушения ее поверхности.

Для очистки отверстий используются специальные системы в виде трубчатых (игольчатых) излучателей с прокачкой жидкости через канал. Такие установки были разработаны и внедрены на ряде предприятий в 1970–1990-х гг. в Научно-исследовательском технологическом институте (в настоящее время ОАО «НИТИ-Тесар» г. Саратов). Однако их применение для решения имеющейся проблемы очистки каналов в горелках нецелесообразно по причине высокой трудоемкости раздельной очистки большого количества отверстий. Также следует учитывать технические трудности прокачки моющей среды через игольчатые излучатели очень малого диаметра, поскольку диаметры отверстий в горелках, как указывалось выше, имеют размер порядка 0,85 мм.

Тем не менее, анализ технической литературы и производственного опыта показывает, что ультразвуковая промывка и очистка является наиболее универсальным и эффективным методом для удаления загрязнений с поверхности различных изделий машино- и приборостроения, в частности – карбюраторов, инжекторов, топливных форсунок и т.п.

Метод очистки влияет на количество оста-

точных загрязнений, остающихся на поверхности материала, следующим образом [5]:

- струйная очистка, промывка, ополаскивание – 85 %;
- очистка в бензине – 70 %;
- очистка в парах хлорированных растворителей – 65 %;
- вибрационная очистка – 56 %;
- кипячение в воде – 45 %;
- ручная очистка металлическими щетками – 10 %;
- ультразвуковая очистка – менее 2 %.

Таким образом, в данном случае ультразвуковой метод удаления загрязнений является наиболее эффективным. Однако он требует доработки с учетом отмеченных конструктивных особенностей объекта очистки.

На первом этапе исследовали химический состав отложений методом РЭМ+ЭДРФА при помощи растрового электронного микроскопа MIRAIII MU (Tescan) с энергодисперсионным рентгенфлуоресцентным анализом на детекторе INCAPentaFETx3 (Oxford Instruments) для выбора наиболее эффективной моющей среды.

Материалы анализа результатов исследований химического состава отложений в каналах горелочных устройств, демонтированных из двух различных ГПА, на основе усредненных по шести измерениям данных приведены на рис. 1. Видно, что химический состав отложений в первой и второй пробах принципиально отличается содержанием углерода (во второй пробе примерно в два раза меньше) и составом отложений (во второй пробе отсутствуют сера, кальций, хром, марганец, но присутствует титан). В первой и второй пробах содержится примерно одинаковое количество кислорода и железа; в обоих пробах содержится относительно меньше углерода и серы по сравнению с кислородом и железом, в то же время можно отметить разнообразие металлов.

Элементы, характерные для углеводородного сырья и наиболее вероятные для присутствия в составе магистрального газа в качестве загрязнений, составляют не более 7...4 % мас. от других элементов. То есть, причина зашлакованности отверстий и каналов в горелочных устройствах может заключаться в продуктах взаимодействия природного газа и кислорода атмосферного воздуха, поступающего в смесь за счет эжекции, с материалом корпуса и пилонных при высоких температурах длительного нагрева. Поэтому для очистки можно использовать моющие средства, рекомендуемые для

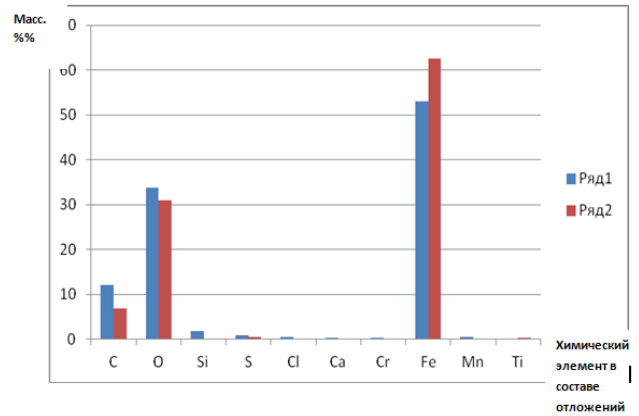


Рис. 1. Распределение химических элементов в составе отложений в двух газоперекачивающих агрегатах

удаления продуктов химической коррозии металлов, например «Вертолин-74».

Проверку возможности различных схем ультразвуковой очистки каналов в горелочных устройствах проводили следующим образом. Для очистки использовали ультразвуковую ванну емкостью 10 л с 7-ю пьезокерамическими преобразователями с резонансной частотой 22 кГц, размещенными в донном излучателе (рис. 2). Питание ванны осуществлялось от тиристорного ультразвукового генератора УГТ-901 мощностью 250 Вт.

Дополнительно исследовали влияние сосредоточенного ультразвукового воздействия стержневым излучателем на процесс удаления загрязнений. Для этой цели использовали установку, представленную на рис. 3.



Рис. 2. Ультразвуковая ванна для исследования общей очистки горелочных устройств



Рис. 3. Установка для ультразвуковой размерной обработки с генератором УГТ-901, использовавшаяся для местной контактной очистки

Результаты очистки оценивали по внешнему виду проблемных зон горелки и на специальном пневматическом стенде (рис. 4).



Рис. 4. Пневматический стенд для оценки пропускной способности горелочных устройств

Методика оценки была принята следующая:

1) эталонную (до эксплуатации) горелку помещали в герметичный цилиндр специального стенда (см. рис. 4);

2) осуществляли накачку воздуха в цилиндр через горелку до получения избыточного давления 0,4 МПа и замеряли кинетику роста давления (время набора давления каждого 0,1 МПа), а также общее время набора давления;

3) согласно п. 2 осуществляли проверку 6-ти периферийных горелочных устройств (центральное устройство не удалось разместить в стенде, требуется его доработка) до и после очистки;

4) строили графики зависимостей кинетики роста давления для эталонной горелки, а также горелок после эксплуатации и после очистки.

Оценка внешнего вида проблемных зон горелочных устройств осуществлялась путем фотографирования цифровой фотокамерой до и после очистки.

В ходе экспериментов были получены следующие результаты.

При общей очистке в ультразвуковой ванне наблюдалось видимое разрушение отложений вблизи отверстий на пилонах и уменьшение темных углеродных отложений на корпусе горелки. При этом после первого цикла очистки вода в ванне приобретала ржавый оттенок, на дне скапливался черный шлам. После замены воды и второго цикла вода становилась более светлой, количество шлама уменьшалось. После третьего цикла шлам не наблюдался, но вода сохраняла светло ржавый оттенок. Внешний вид горелочных устройств до и

после очистки представлен на рис. 5 и 6.

При применении контактной схемы ультразвукового воздействия при определенных условиях на изделии возникали фонтаны распыляемой ультразвуком жидкости (рис. 7), что свидетельствовало о резком росте интенсивности воздействия.

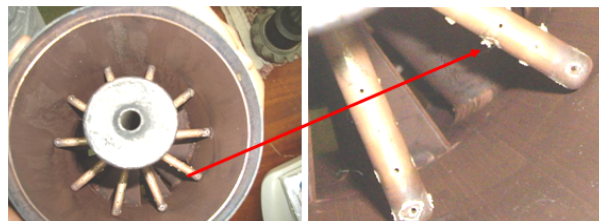


Рис. 5. Внешний вид периферийного горелочного устройства после эксплуатации до ультразвуковой обработки

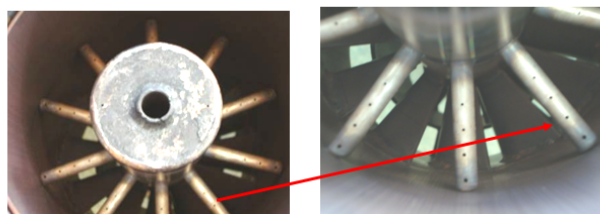


Рис. 6. Внешний вид горелочного устройства после трех циклов обработки



Рис. 7. Фонтаны на торцевой поверхности горелки при специальной схеме ультразвукового воздействия

В связи с тем, что опытная конструкция стенда для контроля пропускной способности горелок не позволяла осуществлять прямые измерения расхода воздуха через рабочие сопла, степень засорения и очистки горелочного устройства оценивали по суммарному времени набора давления в герметичном баллоне, что может косвенно свидетельствовать о расходе воздуха, и по увеличению времени набора каждой последующей ступени прироста давления.

В результате измерений на стенде установлено следующее: средняя скорость набора давления через эталонную горелку составляет 0,035 МПа; средняя скорость набора давления через загрязненную горелку составляет

0,027 МПа; средняя скорость набора давления через очищенную горелку составляет 0,034 МПа; после ультразвуковой очистки скорость набора давления по сравнению с эталонной восстановлена на 97 %.

В среднем скорость накачки через очищенные горелки всего на 3 % меньше, чем через эталонную. Горелки после эксплуатации обеспечивают существенно меньшую скорость накачки – на 23 %. Таким образом, по критерию расхода прокачиваемого газа (воздуха) ультразвуковая очистка по предложенной схеме может обеспечить практически полное восстановление пропускной способности горелочных устройств.

Экспериментальные исследования показали принципиальную возможность восстановления первичных параметров горелочного устройства после ультразвуковой очистки по специальной схеме. При этом, как показывают эксперименты, эффективно отделяемые от стенок каналов ультразвуковым воздействием, загрязнения остаются внутри каналов горелочного устройства и удаляются только при дополнительном механическом воздействии на нее (встряхивание после переворачивания). Поэтому очистка должна происходить с циркуляцией моющей среды для непрерывного удаления отделяющихся под ультразвуковым воздействием загрязнений.

На основе результатов проведенных экспериментальных исследований и производственных испытаний разработан и изготовлен в ООО «Ультразвук-ТЕО» опытный образец специальной ультразвуковой установки, обеспечивающей комбинированное общее и контактное (местное) ультразвуковое воздействие на очищаемый объект.

Специальная конструкция излучателя обеспечивала интенсивность ультразвука в пределах 0,8..2,0 Вт/см². При этом на поверхности моющей жидкости возникают мощные акустические волны (рис. 8), обеспечивающие эффективное удаление и вынос загрязнений из зоны обработки.



Рис. 8. Ультразвуковые волны на поверхности моющей жидкости при работающем излучателе

Проведены пробные испытания очищенных горелочных устройств в составе ГПА. Уста-

новлено, что частота вращения турбины до демонтажа после 3731 ч эксплуатации составила (до очистки) 4180 об/мин. Частота вращения турбины после трех циклов общей ультразвуковой очистки – 4900 об/мин. После очистки по специальной схеме – 5050 об/мин. Номинальная частота вращения ротора турбины составляет 5000...5200 об/мин. Таким образом, использование разработанной технологии очистки каналов горелочных устройств позволяет полностью восстановить исходные механические характеристики газоперекачивающего агрегата.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Варламов Г.Б. Улучшение характеристик камеры сгорания ГТД за счет использования трубчатой технологии сжигания газа // НТУ Украины «Киевский политехнический институт»: Газотурбинные технологии. 2012. №3. 48с.
2. Илюшин А.Ф. О необходимости подготовки попутного нефтяного газа для конверсионных авиационных двигателей // ОАО «Томскнефть»: газотурбинные технологии. 2012. № 3. 48 с.
3. Очистка поверхности изделий перед напылением газовыми разрядами / В.М. Таран, Б.С. Митин, Г.В. Бобров и др. // Теория и практика газотермического нанесения покрытий: тез докл. Димитров, 1983. С. 52–56.
4. Приходько В.М., Нигметзянов Р.И., Фатюхин Д.С. Ультразвуковые технологии обеспечения и повышения качества и конкурентоспособности изделий машиностроения // Научные технологии в машиностроении. 2015. № 7(49). С. 39–44.
5. Бржозовский Б.М., Бекренев Н.В. Ультразвуковые технологические процессы и оборудование в машино- и приборостроении: учеб. пособие. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2009. 348 с.

REFERENCES

1. Varlamov G.B. Improving of performance of the GTE combustion chamber by the use of tubular gas combustion technology. *NTU of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute": Gas turbine technologies*. 2012. No 3. 48 p.
2. Ilyushin A.F. On the need of preparation of associated gas for conversion aircraft engines. *OJSC "Tomskneft": gas turbine technologies*. 2012. № 3. 48 p.
3. Taran V.M., Mitin B.S., Bobrov G.V. et al. Surface cleaning of products before spraying by gas discharges. Theory and practice of gas-thermal coating: abstracts of the proceedings. Dimitrov, 1983. Pp. 52–56.
4. Prikhod'ko V.M., Nigmatzyanov R.I., Fatyukhin D.S. Ultrasonic technologies in assurance and increase of quality and competitiveness of engineering products. *Science intensive technologies in mechanical engineering*. 2015. № 7(49). Pp. 39–44.
5. Brzhozovskiy B.M., Bekrenov N.V. Ultrasonic technological processes and equipment in machine and instrument engineering. Saratov: Saratov State Technical University, 2009. 348 p.

Рецензент д.т.н. Д.С. Фатюхин