

УДК 656.7

Н.А. Ночовная¹, Я.Ю. Никитин¹**СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА
В ОБЛАСТИ ОЧИСТКИ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ КОМПРЕССОРА ГТД
ОТ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ (обзор)**

DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-3-5-5

Рассмотрены зарубежные и отечественные технологии очистки проточной части компрессора газотурбинного двигателя от загрязнений (нагаров) в процессе эксплуатации и при заводском ремонте. Приведены преимущества и недостатки существующих технологий очистки. Установлено, что большинство имеющихся публикаций практически не содержат экспериментальных данных по влиянию технологий очистки на физико-химические и механические свойства очищаемых деталей. Показано, что дальнейшие работы должны быть направлены на проведение прикладных исследований в области технологий удаления нагара с деталей из титановых сплавов в заводских условиях. Особое внимание должно быть уделено изысканию ресурсосберегающего способа очистки деталей из титановых сплавов, обеспечивающего быстрое и безопасное удаление нагара без влияния на работоспособность очищаемой детали.

Ключевые слова: очистка, удаление, нагар, эксплуатационные загрязнения, титановые сплавы, ГТД, ГТУ.

Are considered foreign and domestic cleaning technology flow of the gas turbine compressor from pollution (carbon deposits) in the operation and repair of the factory. The advantages and disadvantages of existing clean technologies. It was found that most of the available publications hardly carry experimental data on effect of treatment technologies on the physico-chemical and mechanical properties of the parts to be cleaned. It is shown that further work should focus on applied research in technology to remove carbon deposits from a titanium alloy parts in the factory. Particular attention should be given to finding a resource-saving way to clean parts made of titanium alloys, providing fast and safe removal of carbon deposits without affecting the performance of the cleaned parts.

Keywords: cleaning, removing, carbon deposits, operational pollution, titanium alloys, GTE, GTU.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Современные газотурбинные двигатели (ГТД) и газотурбинные установки (ГТУ) используются в самых разных областях промышленности и народного хозяйства, при этом условия эксплуатации для каждого изделия могут значительно отличаться – будь то эксплуатация в условиях крайнего Севера или в условиях тропического и субтропического климата. Все эти условия могут существенно влиять на рабочие характеристики ГТД и его стойкость к поломкам. Достаточно очевиден тот факт, что при эксплуатации происходит необратимая потеря мощности и коэффициента полезного действия (КПД) ГТД по различным причинам. Одной из таких причин может служить засорение или образование загрязнений на деталях проточной части компрессора ГТД или ГТУ. Несмотря на самые благоприятные условия эксплуатации, воздух, забираемый двигате-

лем, содержит пыль, соли, органические примеси и т. п. В результате неудовлетворительной работы уплотнительных элементов может происходить заброс масла из подшипников. Попадая в проточную часть с одновременным воздействием высоких температур (до 650°C), частички загрязняющих примесей начинают налипать на поверхность лопаток компрессора, со временем образуя слой органических отложений – нагар.

Для восстановления характеристик ГТД необходимо проводить мероприятия по очистке проточной части компрессора, в том числе удалять нагар с поверхности лопаток.

Цель данной работы – обзор существующих технологий очистки проточной части компрессоров ГТД и ГТУ от эксплуатационных загрязнений (нагаров).

Технологии очистки ГТД в процессе эксплуатации

Для восстановления характеристик компрессора и ГТД в целом в процессе эксплуатации рекомендуется проводить периодические очистки проточной части компрессора в режиме «холодная прокрутка» (off-line) и/или в режиме «на ходу» (on-line). В качестве очищающего агента в основном применяются твердотельные очистители, жидкие моющие средства и вода. Режимы и условия очистки могут комбинироваться с целью получения желаемого результата и минимизации издержек [1–9].

Очистку твердотельными очистителями проводят на работающем агрегате («на ходу»). Применяемые очистители должны обладать хорошим очищающим свойством и не вызывать эрозии лопаток. Этим требованиям в наибольшей степени удовлетворяют твердые растительные вещества, например скорлупа орехов, косточки абрикосов, алычи и др. Наибольшее распространение получил твердый органический очиститель (ТООЧ) или карбопласт, представляющий собой тонко размолотую смесь скорлупы грецкого ореха и абрикосовых косточек, размер частиц которой лежит в пределах 1,0–1,5 мм. Могут применяться также шелуха пшеницы, риса или сами зерна в дробленном виде [10–17].

Крошка подается специальной пневматической системой, режим подачи выбирается экспериментально. Например, для ГТД рекомендуются следующие параметры: скорость подачи крошки 0,15 кг/с; относительный расход по отношению к расходу воздуха 0,005–0,006; окружная скорость лопаток компрессора в момент подачи крошки ~200 м/с. Крошка, попавшая на горячие части газового тракта, на них не откладывается, так как при температуре 550–700°C полностью выгорает и выдувается. В свою очередь частицы, находящиеся в потоке, могут не успеть выгореть и будут выноситься слегка обуглившись. Вся операция очистки выполняется за 6–10 мин. При этом отпадает необходимость останова двигателя и его просушки [18].

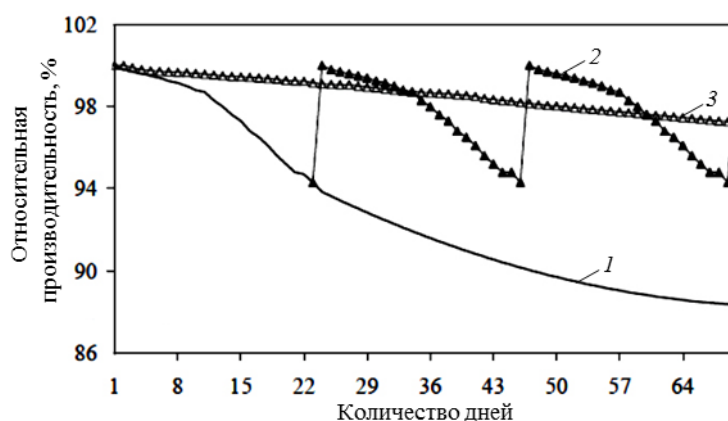
Очистка проточной части компрессора твердыми очистителями может носить двоякий характер. С одной стороны, такая очистка позволяет повысить КПД двигателя, а с другой – повышает вероятность возникновения отказов оборудования, так как может происходить закупоривание уплотнений, каналов смазки, а также может возникнуть повреждение защитных покрытий и поверхностей деталей компрессора [12, 14, 15, 19, 20]. В связи с этим очистка с использованием твердых очистителей должна проводиться только при наличии сильных загрязнений и носить несистематический характер [20].

Следует отметить патент [21] на способ сухой очистки поверхностей лопаток компрессора абразивными компонентами. Согласно формуле изобретения, воздушный поток предварительно подвергают турбулизации и обработке ультрафиолетовым излучением с длиной волны 126–189 нм и образующимся озоном, которые испаряют аэрозоли и осушают молекулярную пленку присутствующих в воздушном потоке загрязняющих частиц. Поскольку капли аэрозоля и твердые частицы имеют различные размеры и массу, то в первую очередь сгорают и осушаются капли аэрозоля и твердые частицы минимальных размеров (0,1–2 мкм) и массы, на которые слабо воздействует

центробежная сила при вращении ротора компрессора. В исходном состоянии, при отсутствии влияния на эти частицы и аэрозоли, они являются источниками начала загрязнения лопаток компрессора. Осушенные частицы больших размеров (2–100 мкм) обеспечивают «мягкое» абразивное очищение поверхности лопаток компрессора, причем такое очищение происходит постоянно, а не циклически, как при вводе различных очистителей.

В настоящее время достаточно много работ посвящено разработкам систем очистки [22–27], моделированию процессов очистки и исследованию влияния очистки проточной части компрессора на характеристики ГТД [17, 28–35].

Off-line промывку почти всегда проводят с использованием моющего средства. Обычно такие промывки чрезвычайно эффективны для повышения мощности ГТУ (см. рисунок). Очень важно использование качественной воды и соблюдение соотношения моющего средства и воды. Время простоя при такой промывке в основном определяется временем охлаждения двигателя. Для сверхмощных двигателей это может занимать 8–10 ч, для малых ГТУ – от 1,5 до 3 ч.



Относительная производительность ГТУ:

1 – без очистки; 2 – при off-line промывке водой; 3 – при on-line промывке водой [29]

Главная цель on-line промывок – увеличить продолжительность работы ГТУ между off-line промывками путем уменьшения наращивания отложений на лопатках и таким образом сократить потери мощности. Как и при off-line промывке, обязательно применение деминерализованной воды. Не рекомендуется выполнять on-line промывку на загрязненном двигателе, потому что большое количество загрязнений, удаленных с первых ступеней компрессора, мгновенно оседает на последующих ступенях. В связи с этим должны выдерживаться короткие временные промежутки между on-line промывками (приблизительно каждые 3 дня). Продолжительность on-line промывки может варьироваться согласно степени загрязнения двигателя и опыта его эксплуатации обслуживающей организацией. Типичный цикл on-line промывки занимает 10–20 мин моющим средством и такой же цикл с использованием деминерализованной воды.

Наиболее эффективным и экономически выгодным является применение off-line промывки во время запланированного отключения ГТУ с последующим применением on-line промывки. Правильное сочетание таких промывок позволит избежать потерь производительности и замедлить естественное ухудшение характеристик двигателя.

Как правило, при on/off-line промывках инжекцию воды или моющего раствора проводят под давлением с помощью специальных сопел, которые располагают у воздухозаборника. Конструкция сопла должна обеспечивать полное смачивание поверхности лопаток компрессора, оптимальный размер капель и эффективную очистку всех

ступеней компрессора. Оптимальным считается размер капель не более 75 мкм, так как капли большего размера могут вызывать эрозию.

Применяемый моющий раствор должен проникать, растворять и удерживать загрязнения для исключения их оседания на последующих ступенях компрессора.

Вопрос применения определенного вида моющего раствора или только воды должен решаться, исходя из анализа состава отложений на лопатках компрессора. В случае применения в качестве промывающей жидкости только воды может происходить вымывание водорастворимых загрязнений, что в дальнейшем будет способствовать наращиванию слоя загрязнений. Поэтому для очистки рекомендуется использовать как воду, так и моющие растворы.

Горячая промывочная вода лучше размягчает загрязнения и предотвращает термический удар, таким образом уменьшая продолжительность простоя двигателя. Однако для подогрева воды до 60–80°C требуются системы нагрева, дополнительный резервуар и трубопровод [1, 13, 29, 30].

Использование керосина или дизельного топлива в качестве промывочных или очищающих жидкостей является небезопасным в виду их легкой воспламеняемости.

Спектр предлагаемых к использованию очищающих жидкостей очень широк. Среди дилеров – в основном зарубежных производителей – ведется жесткая конкуренция за рынки сбыта. Однако не все жидкости можно использовать без предварительных испытаний на коррозионную стойкость деталей промываемых изделий [15].

В настоящее время нет единого подхода к применению on/off-line промывок. Такие свойства, как размер капель, скорость движения капель, давление жидкости варьируются в зависимости от производителя. Это мешает операторам (пользователям) выбрать лучшую систему для промывки.

Введение промежуточных очисток в процессе эксплуатации положительно влияет на характеристики работы ГТД и ГТУ, однако в настоящее время не существует однозначных данных по периодичности проведения промывок и очисток, что, вероятно, связано с конструктивными особенностями компрессоров, различными условиями и режимами эксплуатации, а также технической исправностью разных узлов ГТД.

Если многократные очистки в процессе эксплуатации не дают желаемого эффекта (повышение мощности, снижение расхода топлива, уменьшение вибраций и т. п.) и при визуальном осмотре обнаруживаются участки с остатками загрязнений, отложений и нагаров, то необходимо осуществлять разборку ГТД (ГТУ) и производить очистку деталей проточной части компрессора в заводских условиях.

Технологии очистки ГТД при проведении заводского ремонта

На авиаремонтных предприятиях широко применяются следующие методы очистки от нагара [36]:

- механический;
- физико-химический;
- смешанный.

Так, при выполнении технологического процесса восстановления компрессорных лопаток из титановых сплавов для ГТД ТВ3-117 с нанесением ионно-плазменных покрытий предварительная очистка от нагара выполняется:

– посредством легкой обдувки мелким электрокорундом или карбидом кремния черным или зеленым на основе пневмоабразивно-струйной обработки;

– путем очистки в ультразвуковой ванне, в которой в качестве обрабатываемой жидкости используется раствор следующего состава: тринатрийфосфат технический 30–40 г/л; сода кальцинированная техническая 20–30 г/л; поверхностно-активное вещество (ОП-7 или ОП-10) 3,5 г/л. Температура раствора составляет 50–60°C. Далее лопатки промывают под проточной водой [37].

В работе [20] предложена химическая технология очистки лопаток компрессора с плотными отложениями (загрязнениями), которая заключается в выдержке лопаток в водном растворе следующего состава: 1% жидкого стекла; 1% кальцинированной соды; 0,1% хромпика; 1% мыла. Лопатки выдерживают в ванне 60–90 мин при температуре 90–100°C, а затем такое же время в холодном растворе; нагар удаляют жесткими волосяными щетками, деревянными палочками или содой. После промывки детали обдувают сжатым воздухом.

Виброабразивный метод очистки является высокоэффективным и представляет собой обработку абразивными гранулами в специальных вибрационных установках. К его достоинствам относятся высокая производительность, отсутствие риска образования прижогов и исключение влияния ручного труда на результат обработки. Однако существующие методы оценки условий виброабразивной обработки не позволяют выбирать наиболее производительные условия обработки (зернистость абразивных гранул, продолжительность обработки), так как не учитывают особенностей геометрической формы таких специфических деталей, как лопатки компрессора ГТД. Иными словами, при обработке деталей и узлов различной геометрической формы необходимо производить обработку опытной партии для подбора условий обработки [38, 39].

В ГП «Ивченко-Прогресс» совместно с Киевским международным университетом гражданской авиации (КМУ-ГА) разработан эффективный метод очистки поверхности деталей авиационной техники – аэрозольно-гидродинамическая очистка или аэрогидродинамическая очистка (АГД-очистка), основанная на эффекте Ребиндера. Данный вид бластинговой или струйной очистки не изнашивает металл, не перегревает и не деформирует поверхностные слои, не меняет шероховатость поверхности, хорошо очищает кратеры и микротрещины и имеет низкое пылеобразование. Использование суспензий на основе природных материалов (глина, мел, кальцит) делает этот способ экологически чистым и в большинстве случаев исключает обдувку электрокорундом. Следует также отметить малый расход воды и реагента.

Аэрогидродинамическая очистка является альтернативой существующим способам очистки и отличается высокой степенью универсальности, простотой применяемого оборудования, точностью регулирования и поддержания процесса. Таким способом можно очищать детали авиадвигателей от высокотемпературного нагара, коррозии, оксидных пленок, различных загрязнений, а также подготавливать поверхности деталей для контроля методом цветной дефектоскопии и нанесения защитных покрытий. Скорость очистки – от 6 до 32 м²/мин [40, 41].

Одним из видов современной струйной очистки является «ice» или криогенный бластинг. В качестве очищающего агента используется сухой лед – твердая фаза диоксида углерода. В специальном аппарате для струйной очистки при помощи сжатого воздуха гранулы размером до 3 мм разгоняются до скорости, близкой к скорости звука, и при помощи специального пистолета подаются на загрязненную поверхность. Очистка поверхности достигается за счет реализации нескольких эффектов. Во-первых, гранулы сухого льда имеют значительно более низкую температуру, чем очищаемая поверхность (температура сублимации сухого льда при нормальном давлении составляет -78,5°C). Резкое снижение температуры поверхностного слоя вызывает эффект «термического шока», при котором охлажденные до хрупкого состояния загрязнения легко отслаиваются от поверхности. Во-вторых, при соударении с поверхностью объекта к гранулам сухого льда подводится огромное количество тепла. В результате теплообмена твердые частицы диоксида углерода мгновенно нагреваются и переходят в газообразное состояние, стремясь расшириться в объеме в сотни раз. Образовавшийся газ, частично проникая в пространство между загрязнениями и очищаемой поверхностью, образует так называемый «газовый клин», отламывающий под давлением частицы

загрязнений от поверхности. В-третьих, за счет кинетической энергии гранул сухого льда происходит перманентное механическое воздействие на очищаемую поверхность.

К преимуществам струйной очистки сухим льдом следует отнести возможность проведения очистки деталей без демонтажа, экологичность (очистка производится без применения химикатов), отсутствие вторичных отходов (не требуется удалять загрязненную воду или абразивный материал), к недостаткам – высокий уровень шума (до 125 дБ), возникновение пылеобразования, а также возможность превышения предельной допустимой концентрации углекислого газа [42–44].

Еще одним видом очистки является технология лазерной очистки металлических поверхностей от органических и неорганических загрязнений. В основе механизмов лазерной очистки лежат процессы лазерного нагревания, испарения и абляции материала с образованием плазмы, а также быстрое тепловое расширение и возникновение ударных волн.

Данная технология является бесконтактным, безабразивным, высокопроизводительным и экологически чистым способом очистки поверхностей перед проведением различных технологических операций, в том числе покраски, нанесения защитных покрытий, сварки и т. д. Однако до недавнего времени применение лазерной очистки ограничивалось высокой стоимостью лазеров, недостаточной надежностью и низким значением КПД (2–2,5% – для твердотельных лазеров с ламповой накачкой и 8–12% – для газовых CO₂-лазеров). Ситуация коренным образом изменилась с появлением волоконных лазеров, чей срок службы и надежность, высокий КПД, стабильность параметров и удобство использования обеспечивают их высокую окупаемость, включая издержки на приобретение и эксплуатацию.

Применение мобильных лазерных установок делает возможной очистку лопаток без их демонтажа. Это существенно сокращает время выполнения регламентных работ и, соответственно, позволяет экономить средства за счет уменьшения времени простоя дорогостоящего оборудования [40, 42, 45].

Специалистами АО «ММП им. В.В. Чернышева» предложена и опробована технология очистки компрессорных лопаток с применением сильноточных импульсных электронных пучков (СИЭП). Обработка СИЭП с последующим отжигом обеспечивает увеличение предела выносливости лопаток на ~45% (в сравнении с состоянием после эксплуатации), уменьшение шероховатости и микротвердости, повышает стойкость к окислению [46].

Необходимо отметить, что поскольку двигатели различных конструкций отличаются условиями и продолжительностью наработки, то будет отличаться и толщина слоя нагара (загрязнений) на поверхности компрессорных лопаток. В таком случае может потребоваться индивидуальный подбор параметров лазерной очистки и очистки с применением СИЭП. В случае неправильного подбора параметров очистки может наблюдаться либо неполное удаление загрязнений, либо глубокое модифицирование поверхности лопаток, что может отрицательно сказаться на их эксплуатационных характеристиках. Данное обстоятельство затрудняет унификацию технологии очистки с применением СИЭП и технологии лазерной очистки и требует проведения большой экспериментальной работы для каждого случая ремонта.

Весьма оригинальный способ очистки деталей от нагара предложен автором работы [36], который заключается в использовании способности микроорганизмов, в частности грибов, деградировать загрязнения (нагары). Загрязнения могут быть субстратами для высших грибов, обладающих высокой деградирующей активностью по отношению к этим соединениям, что дает возможность очищать детали от загрязнений. Продолжительность очистки может составлять от 5 до 12 сут.

Указанный метод очистки обладает определенным рядом преимуществ по сравнению с традиционным методом химической очистки: не требуется нагрев ванн, организация очистных сооружений, значительно снижается расход воды. Однако данный метод нуждается в специальной квалификации персонала, а также в проведении стерилизации деталей при температуре 100–130°C после очистки.

Заключения

В настоящее время в зарубежной и отечественной литературе достаточно хорошо освещены используемые и перспективные способы очистки деталей проточной части компрессора от эксплуатационных загрязнений (нагаров) как в условиях эксплуатации, так и при заводском ремонте ГТД (ГТУ), однако в большинстве представленных публикаций отсутствуют экспериментальные данные по влиянию того или иного способа очистки на механические свойства очищаемых материалов, структурно-фазовый состав, физико-химические свойства поверхности и др.

Такие данные отсутствуют и для титановых сплавов, которые все более широко применяются для изготовления дисков, лопаток ротора и статора компрессора низкого давления, компрессора высокого давления, а также лопаток турбины низкого давления ГТД. В современном авиационном двигателе доля титановых сплавов составляет >30% [47–51].

Следует отметить, что основными направлениями развития ремонтно-восстановительных технологий различных деталей и узлов является разработка «зеленых» и ресурсосберегающих технологий. Прежде всего, такие технологии должны уменьшить трудоемкость ремонтных операций и минимизировать отрицательное воздействие на окружающую среду и обслуживающий персонал [52, 53].

Таким образом, актуальной задачей является проведение комплексных прикладных работ в области исследования влияния технологий очистки от эксплуатационных загрязнений (нагара) на свойства титановых сплавов применительно к деталям компрессора ГТД. Рациональным является также изыскание ресурсосберегающих технологий удаления нагара с поверхности деталей из титановых сплавов, которые могли бы обеспечить 100%-ную высокоэффективную очистку с минимальными трудозатратами и без повреждения очищаемых деталей.

Разработанные по результатам таких работ технологические рекомендации могли бы позволить специалистам на авиаремонтных заводах назначать максимально эффективные условия очистки деталей из титановых сплавов от нагаров без опасения снижения их работоспособности.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 7.1. «Интерметаллидные сплавы на основе титана» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [54].

ЛИТЕРАТУРА

1. Ujam A.J., Ekere P.O., Chime T.O. Performance Evaluation of a Gas Turbine Power Plant by the application of Compressor Off-Line and On-Line Water Washing Techniques (A Case Study of 450MW Sapele Power Station in Delta State, Nigeria) // IOSR Journal of Engineering. 2013. Vol. 3. Issue 11. P. 29–41.
2. Hovland G.E., M. Antoine M. Scheduling of Gas Turbine Compressor Washing // Intelligent Automation & Soft Computing. 2006. Vol. 12. Issue 1. P. 63–73.
3. Maiwada B., Muaz N.I., Ibrahim S., Musa S.M. Impacts of Compressor Fouling On the Performance of Gas Turbine // International Journal of Engineering Science and Computing. 2016. Vol. 6. Issue 3. P. 2118–2125.
4. Meher-Homji C.B., Bromley A.F. Gas Turbine Axial Compressor Fouling and Washing // Proceedings of the thirty-third turbomachinery symposium. USA, Texas, A&M University, 2004. P. 163–191.

5. Modern Gas Turbine Systems: High Efficiency, Low Emission, Fuel Flexible Power Generation / ed. by P. Jansohn. Woodhead Publishing, 2013. 838 p.
6. Razak A.M.Y. Industrial Gas Turbines: Performance and Operability. CRC Press, 2007. 624 p.
7. Hovland G.E., M. Antoine M. Economic optimization of gas turbine compressor washing // Proceedings of the Australasian Universities Power Engineering Conference. Brisbane, 2004. P. 78–83.
8. Boyce M.P., Gonzalez F. A study of on-line and off-line turbine washing to optimize the study of a gas turbine // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 2007. Vol. 129. No. 1. P. 114–122.
9. Enyia J.D., Li J., Thank-God I., Igbong D.I. Industrial Gas Turbine On-line Compressor Washing for Power Generation // Isaiah International Journal of Engineering Research and Technology. 2015. Vol. 4. Issue 08. P. 500–506.
10. Семенюк А.В., Андреев А.К., Семенюк Л.А. Эксплуатационные загрязнения газотурбонагнетателей ДВС и способы их очистки: метод. указ. Владивосток: МГУ им. адм. Г.И. Невельского, 2008. 30 с.
11. Зысин Л.В. Парогазовые и газотурбинные тепловые электростанции: учеб. пособие. СПб.: Санкт-Петербургский гос. политех. ун-т, 2010. 368 с.
12. Сулейманов А.М. Энергосбережение в технологических процессах трубопроводного транспорта газа: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2005. 22 с.
13. Stalder J.P. Gas Turbine Compressor Washing State of the Art: Field Experiences // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 2001. Vol. 123. P. 363–370.
14. Китаев С.В. Повышение энергетической эффективности работы газоперекачивающих агрегатов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2003. 22 с.
15. Вахрушев Е.С. Промывка ГВТ двигателя – одно из важнейших условий сохранения его эффективности [Электронный ресурс]. URL: http://www.pmz.ru/pr/other/ntex/ib15_3/ib15_20-21/ (дата обращения: 11.04.2016).
16. Рудаченко А.В., Чухарева Н.В. Газотурбинные установки для транспорта природного газа: учеб. пособие. Томск: Томский политех. ун-т, 2012. 213 с.
17. Aiad G. Cascade Testing and CFD Applied to Gas Turbine Performance Improvement with Compressor Cleaning: PhD Thesis. Great Britain, Cranfield University, 2010. 275 p.
18. Техническая эксплуатация судовых газотурбинных установок / под ред. Г.Ш. Розенберга. М.: Транспорт, 1986. 222 с.
19. Ogbonnaуа Е.А. Gas Turbine Performance Optimization Using Compressor Online Water Washing Technique // Engineering. 2011. No. 3. P. 500–507.
20. Слободянюк Л.И., Поляков В.И. Судовые паровые и газовые турбины и их эксплуатация: учебник. Л.: Судостроение, 1983. 360 с.
21. Способ сухой очистки поверхностей лопаток компрессора: пат. 2513525 Рос. Федерация; заявл. 24.08.12; опубл. 20.04.14. Бюл. №11. 9 с.
22. Gas Turbine Compressor Cleaning Systems and Chemicals for all types of gas turbines // Rochem technical services: сайт. URL: <http://www.rochem.net/pdfs/Fyrewash/Rochem%20Fyrewash.pdf> (дата обращения: 02.02.2016).
23. Тренин В.М. Система промывки высокого давления для компрессора ГТУ // Турбины и дизели. 2008. №1. С. 22–25.
24. Установка для промывки и эмульсирования воздушно-газового тракта газотурбинного двигателя: пат. 2323051 Рос. Федерация; заявл. 04.08.06; опубл. 27.04.08. Бюл. №12. 20 с.
25. Системы очистки компрессоров газовых турбин // Turbotect Limited: сайт. URL: <http://turbotect.ru/systems/index.html> (дата обращения: 15.04.2016).
26. Степанков И.А. Комплексное решение для очистки компрессоров ГТУ: очиститель Turbo-K и антифриз AF10 // Турбины и дизели. 2015. №1. С. 54–55.
27. Axial Compressor On/Off-line Washing // GE Oil and Gas: сайт. URL: http://site.ge-energy.com/businesses/ge_oilandgas/en/literature/en/downloads/onoffline_washing.pdf (дата обращения: 12.04.2015).
28. Abass K.O. Techno-economic analysis of gas turbine compressor washing to combat fouling: MS. Great Britain, Cranfield University, 2015. 131 p.
29. Syverud E. Axial Compressor Performance Deterioration and Recovery through Online Washing: PhD Thesis. Norway, Norwegian University of Science and Technology, 2007. 143 p.

30. Syverud E., Brekke O., Bakken L. Axial compressor deterioration caused by saltwater ingestion // J. of Turbomachinery. 2007. Vol. 129. No. 1. P. 119–126.
31. Syverud E., Bakken L.E. Online water wash test of GE J85-13 // J. of Turbomachinery. 2007. Vol. 129. No. 1. P. 136–142.
32. Kurz R., Brun K., Mokhatab S. Gas turbine compressor blade fouling mechanisms // Pipeline & Gas Journal. 2011. Vol. 238. No. 9. P. 18–21.
33. Brun K., Kurz R., Folles W. Experimental evaluation of the effectiveness of online water washing in gas turbine compressors // ASME/IGTI: Proceedings of the forty-second turbomachinery symposium. USA, Houston, 2013. 18 p.
34. Igie U., Pilidis P., Foufilas D. et al. Industrial Gas Turbine Performance: Compressor Fouling and On-Line Washing // Journal of turbomachinery. 2014. Vol. 136. Issue 10. 13 p.
35. Wilkinson P., Shark L. Automatic monitoring of gas turbine air intakes using colour imaging techniques, Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring // Insight – Non-Destructive Testing and Condition Monitoring. 2004. Vol. 46. No. 2. P. 94–97.
36. Доценко Г.Н. Разработка принципов очистки деталей авиационной техники от нагароподобных загрязнений биотехнологическим методом: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2000. 37 с.
37. Михайлов Д.А., Недашковский А.П., Ивченко Т.Г. Технологические особенности восстановления лопаток компрессора ГТД с применением функционально-ориентированных покрытий // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. 2014. №1 (47). С. 213–224.
38. Волков Д.И., Толкачев А.В. Снятие нагара с направляющих аппаратов газотурбинного двигателя с использованием виброабразивной обработки // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2015. №1 (174). С. 32–35.
39. Макеев Р.И., Толкачев А.В. Виброполировальная обработка в современном технологическом процессе // Упрочняющие технологии и покрытия. 2006. №4 (16). С. 49–50.
40. Леонтьев В.А., Зимчихис С.Д., Кондратюк Э.В., Замковой В.Е. Восстановление работоспособности ГТД с применением новых технологий и материалов // Вестник двигателестроения. 2006. №4. С. 99–103.
41. Установки для струйной очистки // АО «Сервис Промышленных Энергетических и Нефтегазовых Систем» (СПЭНС): сайт. URL: <http://www.agd-russia.ru> (дата обращения: 15.04.2016).
42. Планковский С.И., Головин И.И., Сиренко Ф.Ф. Анализ существующих методов очистки поверхности лопаток турбин в газотурбинных двигателях // Авиационно-космическая техника и технология. 2013. №6 (103). С. 8–14.
43. Очистка сухим льдом // ООО «Керхер»: офиц. сайт. URL: <https://www.karcher.ru/ru/professional/ochistka-sukhim-ldom.html> (дата обращения: 17.03.2016).
44. Чистка с использованием сухого льда (бластинг) // ООО «Елме Мессер К»: офиц. сайт. URL: http://www.elmemesser.ru/ru_RU/use-cases/industry/dry-ice (дата обращения: 22.03.2016).
45. Вейко В.П., Кишалов А.А., Мутин Т.Ю. и др. Перспективы индустриальных применений лазерной очистки материалов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. №3 (79). С. 50–54.
46. Шулов В.А., Энгелько В.И., Громов А.Н. и др. Применение сильноточных импульсных электронных пучков для восстановления эксплуатационных свойств лопаток газотурбинных двигателей // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2014. №1. С. 43–49.
47. Антипов В.В. Стратегия развития титановых, магниевых, бериллиевых и алюминиевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 157–167.
48. Ночовная Н.А., Иванов В.И., Алексеев Е.Б., Кочетков А.С. Пути оптимизации эксплуатационных свойств сплавов на основе интерметаллидов титана // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 196–206.
49. Кашапов О.С., Павлова Т.В., Истракова А.Р., Калашников В.С. Повышение прочностных характеристик жаропрочных псевдо- α -титановых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2014. №S5. С. 73–80. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-S5-73-80.

-
50. Хорев А.И., Ночовная Н.А., Яковлев А.Л. Микролегирование редкоземельными металлами титановых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 206–212.
 51. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение: итоги и перспективы // Вестник Российской академии наук. 2002. Т. 72. №1. С. 3–12.
 52. Каблов Е.Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России: сб. науч.-информ. матер. 3-е изд. М.: ВИАМ, 2015. 720 с.
 53. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С. Стратегические направления развития конструкционных материалов и технологий их переработки для авиационных двигателей настоящего и будущего // Автоматическая сварка. 2013. №10. С. 23–32.
 54. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.