

**В.М. Тренин, Пар Кросслинг –
компания «Газ Турбин Эффишененси Раша», С.-Петербург**

Эффективная работа турбины невозможна без очистки лопаток компрессора. Существующие системы промывки низкого давления не могут обеспечить очистку в режиме «на ходу». Компанией Gas Turbine Efficiency разработана система высокого давления, обеспечивающая очистку лопаток компрессора как в режиме «на ходу», так и «на холодной прокрутке». Система применяется на газовых турбинах различной мощности и разных производителей.

Система промывки высокого давления для компрессора ГТУ

Газовые турбины работают в условиях загрязненной атмосферы, содержащей частицы аэрозолей, солей, органических и неорганических веществ, масел и т.д. Налипая на лопатки компрессора, они снижают производительность двигателя. Налипание часто сопровождается образованием трудноочищаемых химических соединений – загрязнение лопаток компрессора становится критическим и приводит к значительному увеличению потерь мощности.

Существующие системы низкого давления способны обеспечить промывку турбины в режиме «холодная прокрутка» большим количеством моющего раствора, но не могут выполнить ее эффективную очистку в режиме «на ходу».

Компанией Gas Turbine Efficiency (GTE) разработаны системы очистки высокого давления, которые успешно справляются с задачей восстановления потерь КПД компрессора на обоих режимах очистки.

Особенности конструкции системы промывки высокого давления

В результате исследований, проведенных компанией GTE, были определены условия, при которых достигается максимально эффективная промывка компрессора газовой турбины. Прежде всего, это высокое давление моющего раствора – в диапазоне от 4 до 8 МПа (в зависимости от применения системы). Необходимо, чтобы вода направлялась на вход компрессора таким образом, чтобы лопатки компрессора смачивались по всей высоте. Кроме того, капли воды должны иметь адекватный механический импульс для эффективного контакта с загрязнением на лопатке. При неправильном направлении водного потока капли будут ударяться о стенки входной части и не попадут в компрессор. Капли с низким механическим импульсом будут проходить через компрессор без контакта с лопатками.

Проведенные полевые и лабораторные испытания показали, что для большинства газовых турбин размер капель воды должен быть не менее 60 мкм, чтобы обеспечить эффективный контакт с лопатками компрессора. Капли меньшего размера будут преимущественно проходить через компрессор без эффекта промывки. С другой стороны, нужно учитывать, что капли размером 500 мкм будут промывать эффективнее, однако при этом повышается риск возникновения эрозии лопаток компрессора.

Основываясь на этих двух положениях, компания разработала комплекты специфических

Фото 1.
Категоризация
размеров капель
форсунки
лазерным
анемометром



газотурбинных форсунок, которые формируют капли воды размером 120...200 мкм. Для оценки распыления капель форсунками используется ряд измерений.

Данные собираются с помощью лазерного анемометра, определяющего размеры распыляемых капель (*фото 1*). Дисперсность распыла является основополагающей характеристикой форсунки. На основе полученных данных моделируется положение форсунки для впрыскивания моющей воды в компрессор. Она должна быть расположена так, чтобы смачивать лопатки по всей длине без потери воды на смачивание входных стенок. С этой целью используется вычислительная гидродинамическая модель и методы имитационного моделирования. Применяется стационарная модель Рейнольдса-Навье-Стокса (RANS) для несжимаемой жидкости и k-ε (ke-epsilon) модель из двух уравнений для создания условий турбулентности. Моделируется профиль скорости воздушного потока, оценивается характер турбулентности и ее влияние на дисперсию моющего раствора.

Такой подход позволяет моделировать впрыск на входе в компрессор при использовании характеристик воздушного потока в режимах «на ходу» и «на холодной прокрутке». При моделировании учитывается конструкция всасывающей камеры, с тем чтобы выбрать такое положение форсунок, которое будет эффективным для процессов промывки и на ходу, и на холодной прокрутке. Выбранные критерии проектирования позволяют использовать один комплект форсунок для обоих режимов очистки, уменьшить количество форсунок и, соответственно, стоимость их монтажа.

На *рис. 1* показан результат анализа гидродинамической модели и полученная характеристика форсунки. Изменение распыления водного раствора обусловлено различием воздушных потоков между двумя изображениями. Практические результаты подтвердили правильность выбранного варианта размещения форсунки, обеспечивающего восстановление утраченных (вследствие загрязнения) характеристик. Разработанная конструкция может быть реализована при использовании только 5 форсунок. В системах промывки, где используется до 35 форсунок, результат восстановления характеристик более низкий по сравнению с экспериментальной системой GTE.

Другой аспект проблемы — обеспечение периферического покрытия форсунками входной части компрессора. Обычно они размещаются в центре между опорными обтекателями входного корпуса. Диапазон распыла форсунки должен быть спроектирован так, чтобы обеспечивать достаточное покрытие входной части компрессора

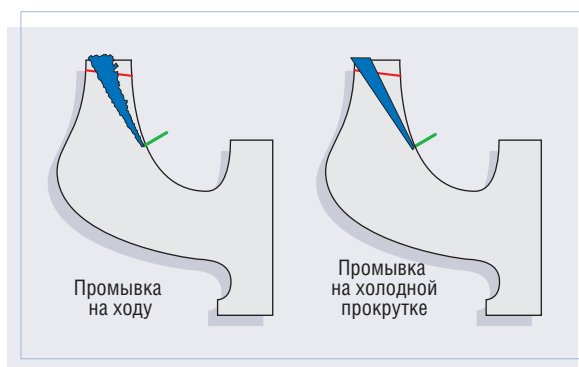


Рис. 1.
Гидродинамическое моделирование промывки на двух режимах при неизменном положении форсунки

в окружном и радиальном направлениях. На *фото 2* показано размещение форсунок, обеспечивающее полное покрытие входной части компрессора. Монтаж таких форсунок несложен и занимает всего несколько часов.

Параллельно с выбором типа форсунок, их размещения, распыления капель важно определить количество воды, необходимое для эффективной промывки. Компанией GTE была проделана большая экспериментальная работа на различных газотурбинных установках и выведена зависимость, определяющая скорость воздушного потока компрессора ГТУ и необходимый объем воды для эффективной промывки.

Исследования с целью увеличения скорости промывки при использовании минимального количества воды сначала проводились на авиационных двигателях. Был определен оптимальный расход воды для промывки всех газовых турбин в режимах «на ходу» и «на холодной прокрутке». Результатом этих работ стало создание системы промывки высокого давления, которая обычно использует всего 25 % воды от рекомендованного для традиционных систем объема.

Фото 2.
Периферическое размещение форсунок



Технология очистки компрессоров, разработанная GTE, применялась на нескольких типах газовых турбин. Обычно процедура очистки представляет собой промывку только водой в режиме «на ходу» с контролируемым направлением, дискретностью и кинетической энергией раствора при его поступлении во входную часть компрессора. Контроль данных параметров является ключевым фактором, необходимым для достижения эффективной очистки. Дискретность достигается с помощью специально спроектированных и соответственным образом расположенных форсунок.

Процесс распыления контролируется с целью получения такой дисперсности капель, которые имеют средний размер от 80 до 250 мкм. Это выполняется с помощью форсунок специальной конструкции и подачи рабочего давления — от 4 до 8 МПа в зависимости от конкретного применения. Кроме того, оптимальное расположение форсунок позволяет значительно уменьшить их количество (иногда в несколько раз) по сравнению с системами промывки низкого давления. Один набор форсунок может использоваться для очистки в обоих режимах, а эффективный впрыск обеспечивает покрытие лопаток компрессора по всей длине.

При промывке используется вода, нагретая до температуры 50...90 °С. Промывка в режиме «на ходу» выполняется исключительно водой, но она эффективна только на первых ступенях компрессора (первой-пятой), в связи с высокой рабочей температурой воздуха на последующих ступенях. Поскольку первые ступени компрессора загрязняются сильнее, их промывка на ходу дает существенный эффект. При сильных загрязнениях промывка на холодной прокрутке может выполняться с использованием химических реагентов.

Процесс очистки компрессора

Как было отмечено выше, для подачи направленной водной струи в компрессор, обеспечивающей полное покрытие лопаток и удаление загрязнений, используются форсунки специальной конструкции, а также высокое давление. Специалисты компании рассчитывают геометрию всасывающей камеры для каждой модели газовой турбины с целью минимизации количества форсунок и требуемых деталей, а также оптимизации зоны покрытия. Это позволяет использовать минимальный объем воды для промывки.

Были определены конкретные параметры процесса очистки компрессора, и компания Gas Turbine Efficiency получила патенты на показатели высокого давления для получения дискретного и направленного водного раствора.

При очистке компрессора в режиме «на ходу» для эффективной промывки первых ступеней и предотвращения осаждения частиц моющих средств на последних ступенях используется только вода. При очистке на холодной прокрутке применяется комбинация воды и моющего средства, однако обычно количество моющего средства составляет менее 1/3 от объема, рекомендованного для традиционных (или альтернативных) систем изготовителями газотурбинного оборудования.

Специалисты компании считают, что системы низкого давления не обеспечивают эффективной очистки компрессора в связи с неполным покрытием поверхности лопаток и неполным проникновением раствора через ступени компрессора. Во многих случаях очистка ограничивается только направляющим аппаратом и первой-второй ступенями компрессора.

Система очистки, разработанная GTE, применена на тысяче компрессоров газовых турбин, имеющих наработку более 8 млн часов. Опыт эксплуатации показал, что данная технология позволяет провести очистку загрязненного компрессора до 6-й ступени в режиме «на ходу» и полную промывку остальных ступеней компрессора — «на холодной прокрутке». В ходе недавних приемочных испытаний представители компании-производителя газотурбинного оборудования отметили, что ранее им не приходилось наблюдать полного проникновения моющего раствора в проточную часть компрессора во время очистки на холодной прокрутке.

На рис. 2 показаны результаты промывки компрессора с применением традиционной системы очистки (низкого давления) и системы GTE. На графике представлены два цикла промывки. Первый — на холодной прокрутке — обеспечивает восстановление мощности примерно до 35,5 МВт, после чего продолжается деградация выходной мощности. Вторая промывка на холодной прокрутке выполняется системой GTE — восстановление мощности достигает 36,25 МВт.

Рис. 2. Сравнение эксплуатационных характеристик при промывке традиционной системой и системой GTE



Затем система промывки используется в режиме «на ходу». Это обеспечивает более медленную деградацию выходной мощности и увеличивает временной интервал между промывками на холодной прокрутке. Такой результат очень важен для заказчика, оборудование которого работает в базовом режиме, — система промывки окупается менее чем за два месяца.

Высокая эффективность очистки позволяет заказчику увеличить интервалы промывки в случае применения системы высокого давления. Кроме того, для получения таких улучшенных характеристик требуется меньше воды и моющих средств. Важным преимуществом является меньшее количество деталей и компонентов, входящих в состав системы GTE, в результате чего повышается надежность такой системы.

Эффективность системы промывки высокого давления разработки GTE оценивается следующими показателями:

- коэффициент готовности — около 2 %;
- КПД/выходная мощность — около 3 %;
- тепловая мощность — 1 %;
- окупаемость — менее 6 месяцев.

Компания работала с целым рядом заказчиков, что позволило прийти к пониманию процесса восстановления КПД в результате промывки компрессора и выбрать правильный цикл для проведения очистки.

Результаты эксплуатации обычно показывают, что восстановленная выходная мощность двигателя после промывки на ходу составляет около 0,5 %, в то время как после очистки на холодной прокрутке она может достигать 2 %, а в некоторых случаях — до 5%. Такое восстановление выходной мощности, КПД и коэффициента готовности способствует тому, что окупаемость оборудования, необходимого для электростанции мощностью 100 МВт, может составлять всего 3 месяца, или более \$1,5 млн в год дополнительной экономии.

Образцы систем очистки компании GTE были установлены и опробованы на оборудовании всех основных крупных операторов — Statoil, Fortum, Norsk Hydro, Dresser-Rand, Maersk Oil&Gas, Phillips Petroleum, Volvo Aero Turbines, Turbomeca, Turbomach, Saab/BAE.

Системы очистки GTE успешно применяются на газотурбинных установках SGT100/200/300/400/500/600/700/800, SGT6-5000F, Frame 5, 6B, 6FA, 9E, LM2500, Avon, RB211, Centaur, Taurus (которые работают также и на территории России). В настоящее время ведутся работы по внедрению системы GTE для очистки турбин российского производства.

Один из образцов системы промывки GTE приведен на *фото 3*.



С Фото 3.
Система
GTE 80i-11/160i-21
применяется для
промышленных
турбин мощностью
от 2 до 25 МВт

Заключение

Компанией GTE разработана эффективная система промывки компрессора, которая может применяться для турбин широкого диапазона мощности — от нескольких мегаватт до 200 МВт. Эксплуатация системы GTE показала высокую эффективность восстановления газодинамики компрессора до состояния нового двигателя. Это дает возможность существенно повысить восстановление мощности турбины по сравнению с традиционными системами низкого давления.

Система очистки высокого давления достаточно компактна — она требует немного места для размещения внутри электростанции или на морской платформе. Компонировка соответствует требованиям стандартов CE, UL, а также российских стандартов. Управление осуществляется оператором или с помощью стандартного блока PLC, который совмещается через интерфейс с системой управления станцией.

Экономия, получаемая от использования системы GTE, обеспечивает короткий период окупаемости. Более подробную информацию по системам промывки компании Gas Turbine Efficiency можно получить в офисе компании в Санкт-Петербурге. ■

ООО «Газ Турбин Эффишененси Раша»

Тел. (812) 325 65 89

Факс (812) 325 97 73

valery.trenin@gtefficiency.com