

УДК 621.438

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМ ПРОМЫВКИ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ КОМПРЕССОРОВ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК

Харченко К.Г., Чернышев А.А.

Научный руководитель - к.т.н., доцент Качан С.А.

Загрязнение лопаточного аппарата осевого компрессора газотурбинных энергетических и приводных установок приводит к заметному снижению их полезной мощности и КПД. Несмотря на наличие фильтрующих устройств на входе в компрессор, его проточная часть подвергается загрязнению аэрозолями, присутствующими в окружающей среде, а также различными загрязнителями (масло, сажа, капельная влага и т.п.), выделяемыми различными узлами самой газотурбинной установки (ГТУ).

По данным [1] загрязнение приводит к снижению КПД осевого компрессора на 0,5 - 3 %, полезной мощности ГТУ на 3 - 10 % и КПД ГТУ на 2 - 5 %. При этом уменьшается запас устойчивой работы компрессора, а изодромы на его характеристике сдвигаются в сторону меньших расходов.

Аналогичные данные о влиянии загрязнения опубликованы специалистами фирм Вестингауз, Дженерал Электрик и др. В материалах Дженерал Электрик [2] приводятся сведения о том, что загрязнение компрессора может приводить к снижению его производительности на 5 %, отношения давлений – на 5,5 %, полезной мощности ГТУ - на 13 %, при этом удельный расход тепла увеличивается на 6 %.

В работе [3] показано, что при загрязнении компрессора энергетической ГТУ мощностью 4 - 6,5 МВт при среднегодовом снижении полезной мощности на 3 % и КПД ГТУ на 1 % стоимость потерь из-за снижения выработки электроэнергии и перерасхода топлива составляет свыше 500 тысяч долларов в год.

Для уменьшения загрязнения и для защиты лопаточного аппарата осевого компрессора от эрозийного воздействия пыли, на входе в компрессор устанавливаются комплексные фильтрующие системы, включающие грубую и тонкую очистки воздуха, поступающего в компрессор. Остаточная запыленность после современных фильтрующих устройств находится на уровне 0,3 - 0,45 мг/м³. Для предотвращения эрозии лопаток концентрация частиц с диаметром превышающим 10 мкм не должна превышать 5 % от общей массы пыли после фильтров. Однако, даже современные высокоэффективные фильтры не обеспечивают полной очистки воздуха и устранения загрязнения компрессора. Загрязнение лопаток компрессора, как отмечается в ряде работ, например [3] и других, обуславливается в основном частицами диаметром до 2 мкм, масса которых составляет 80 - 90 % от общей массы пыли после фильтра.

Для снижения влияния загрязнения на характеристики ГТУ используются сухие очистки и промывки проточной части компрессора на рабочих режимах (на ходу) и на остановленном агрегате при прокрутке от пускового устройства (промывка на холодной прокрутке). В настоящее время применяются, в основном, промывки компрессора. Периодические промывки компрессора, с технически обоснованным чередованием двух типов промывки, позволяют поддерживать мощность и КПД ГТУ на достаточно высоком уровне.

За рубежом в последние годы передовые фирмы уделяют повышенное внимание разработке усовершенствованных систем промывки осевых компрессоров на ходу и на холодной прокрутке, а также созданию новых эффективных моющих средств с использованием поверхностно-активных веществ и эмульгаторов.

Так, компанией Gas Turbine Efficiency (GTE) разработана система высокого давления, обеспечивающая очистку лопаток компрессора как в режиме «на ходу», так и «на холодной прокрутке» [4]. Система применяется на ГТУ различной мощности и разных производителей.

Рассмотрим особенности системы промывки высокого давления GTE [4]

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).

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 газотурбинных форсунок, которые формируют капли воды размером 120...200 мкм. Размеры распыляемых капель определяются с помощью лазерного анемометра (рисунок 1).



Рисунок 1 – Категоризация размеров капель форсунки лазерным анемометром

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, результаты который показаны на рисунке 2.

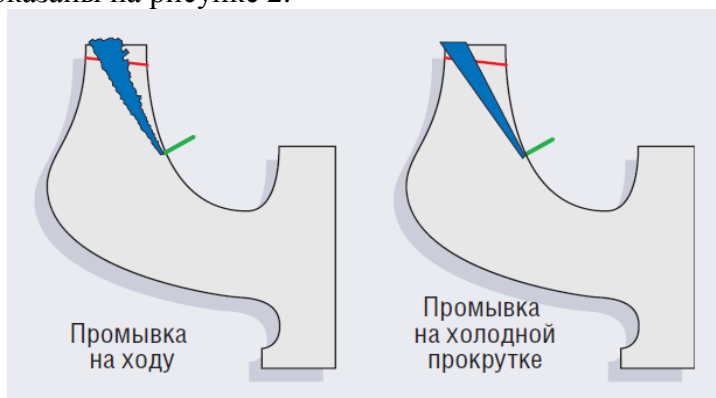


Рисунок 2 – Гидродинамическое моделирование промывки на двух режимах при неизменном положении форсунки

Важно также обеспечение периферического покрытия форсунками входной части компрессора. Обычно они размещаются в центре между опорными обтекателями входного корпуса. Диапазон распыла форсунки должен обеспечивать достаточное покрытие входной части компрессора в окружном и радиальном направлениях.

Разработанная конструкция (рисунок 3) может быть реализована при использовании только 5 форсунок, при этом в других системах промывки с использованием до 35 форсунок достигается более низкий результат.

Монтаж таких форсунок несложен и занимает всего несколько часов.



Рисунок 3 – Периферическое размещение форсунок

Компанией *GTE* была проделана большая экспериментальная работа на различных ГТУ и выведена зависимость, определяющая скорость воздушного потока компрессора и необходимый объем воды для эффективной промывки. В результате создана система промывки высокого давления, которая использует около 25% воды от рекомендованного для традиционных систем.

При промывке используется вода, нагретая до температуры 50...90°C.

Промывка в режиме «на ходу» выполняется исключительно водой. Однако 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.

Система очистки, разработанная *GTE*, применена на тысяче компрессоров ГТУ, имеющих наработку более 8 млн часов.

На рисунке 4 показаны результаты промывки компрессора с применением традиционной системы очистки (низкого давления) и системы *GTE*.

На графике представлены два цикла промывки ГТУ мощностью около 36 МВт.

Первый – на холодной прокрутке – обеспечивает восстановление мощности примерно до 35,5 МВт, после чего продолжается снижение выходной мощности вследствие загрязнения компрессора во время его эксплуатации.

Вторая промывка на холодной прокрутке выполняется системой *GTE* – восстановление мощности достигает 36,25 МВт.

Затем система промывки используется в режиме «на ходу».

Как видно, обеспечивается более медленное снижение выходной мощности, что увеличивает временной интервал между промывками на холодной прокрутке. Такой результат очень важен, если ГТУ работает в базовом режиме, – система промывки окупается менее чем за два месяца.

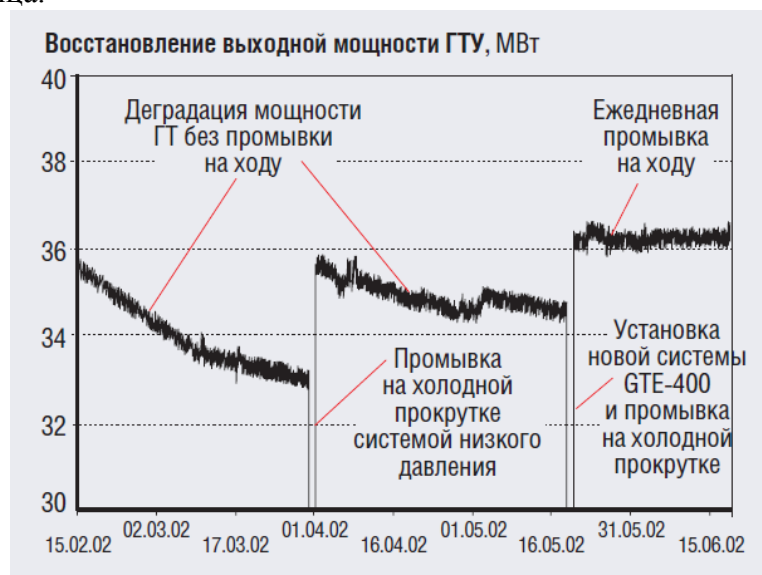


Рисунок 4 – Сравнение эксплуатационных характеристик при промывке традиционной системой и системой *GTE*

Эффективность системы промывки высокого давления *GTE* позволяет улучшить:

- коэффициент готовности – примерно на 2 %;
- КПД/выходная мощность – примерно на 3 %;
- тепловая мощность – примерно на 1 %;
- окупаемость – менее 6 месяцев.

В заключение отметим, что применение системы высокого давления *GTE* обеспечивает высокую эффективность очистки и восстановление газодинамики компрессора до состояния нового двигателя, позволяет увеличить интервалы между промывками, снизить расход воды и моющих средств и, в итоге, короткий период окупаемости. Важным также является меньшее количество деталей и компонентов системы *GTE*, в результате чего повышается ее надежность.

Литература

1. Бодров А.И. Исследование загрязнения и усовершенствование системы промывки проточной части осевых компрессоров ГТУ / автореф. дисс. канд. техн. наук по спец. 05.04.12 // Санкт-Петербург, 1999.
2. Heavy-Duty Gas Turbine Operating and Maintenance Considerations / Robert Hoefl, Jamison Janowitz, and Richard Keck // GE Energy Services Atlanta, GA, 1993.
3. Diakunchak, I.S. Performance Deterioration in Industrial Gas Turbines // ASME International Gas Turbine and Aeroengine Conference, Orlando, Florida, 1991, ASME Paper 91-GT-228.
4. Система промывки высокого давления для компрессора ГТУ / В.М. Тренин, Пар Кросслинг // Турбины и дизели / январь–февраль 2008. – С. 22 – 25.