

Влияние КВОУ на эксплуатационные характеристики ГТУ

Детлеф Маркс – EMW filtertechnik GmbH (Германия)

В статье показано, как влияют различные системы фильтрации всасываемого воздуха на рабочие параметры компрессора газовой турбины и компонентов горячей части. Кроме того, описаны негативные последствия, которые возможны в процессе длительной эксплуатации ГТУ с использованием фильтров класса F.

In brief

Impact of air intake systems on operational parameters of gas turbines power plants.

Gas turbine and Combined Cycle performance is degrading all the time. Beginning from first start, during commissioning and fine tuning – all operating time and also during standstill and planned or unplanned outages. This degradation behavior is well known and accepted by all OEMs, owners and operators around the world. To evaluate the degradation progress and behavior of the complete Combined Cycle Power Plant the degradation of the Gas Turbines, HRSG and Steam Turbine has to be taken into account. Gas turbines consume large quantities of air. The combustion air contains variable atmospheric contaminants, industrial exhaust gases, petrochemical pollutants, urban liquid and solid particles, sea salt aerosols, dust and sand of different size.

Рабочие характеристики газотурбинных и парогазовых установок с течением времени имеют тенденцию к снижению – начиная с первого пуска и в течение всего срока эксплуатации, а также во время простоев и плановых или внеплановых отключений. Такое снижение характеристик специалистам хорошо известно и принимается в расчет всеми производителями оборудования, а также владельцами установок по всему миру.

Общие потери электростанций в связи с этим подразделяются на следующие категории:

- механический износ, или невозможные потери;
- потери, восстанавливаемые при отключении или проведении инспекций;
- потери, восстанавливаемые при промывке оборудования.

Различные условия окружающей среды на месте эксплуатации оказывают огромное влияние на снижение эффективности различных компонентов оборудования.

Для оценки процесса снижения характеристик всей парогазовой установки необходимо отдельно учитывать снижение параметров газовых турбин, котла-утилизатора (HRSG) и паровой турбины.

Как известно, газовые турбины потребляют при работе большое количество воздуха. Для эксплуатации газовой турбины при базовой

нагрузке требуется только около 2 % топлива, оставшиеся 98 % приходятся на поступающий для горения воздух.

Сжигаемый воздух содержит различные загрязняющие вещества во взвешенном состоянии: отработанные газы промышленных производств, примеси продуктов нефтехимии, жидкие и твердые частицы бытовых отходов, частицы морской соли в воздухе, пыль и песчинки различного размера. Воздух является основной составляющей рабочего газа для любой газовой турбины, и от 80 до 95 % возможных потерь при эксплуатации ГТУ обусловлены его качеством.

За последние 20–25 лет с развитием технологий рабочие параметры газовых турбин повысились (температура горения, степень сжатия и т.д.), но они стали более чувствительны к загрязнениям компрессора, качеству воздуха и изменениям в элементах систем охлаждения.

При снижении расхода воздуха на 1 % выработка электрической энергии сокращается на 1,8 %, а тепловой – увеличивается на 0,8 %. Компании GE и AAF International провели исследование, как влияет загрязнение компрессора на выработку электрической и тепловой энергии газовых турбин различной мощности. На рис. 1 показана зависимость между снижением выходной электрической мощности, снижением расхода воздуха и повышением тепловой мощности.

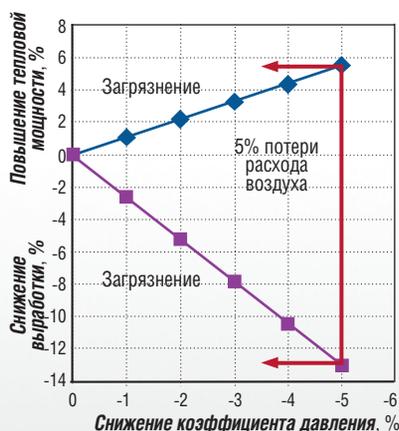
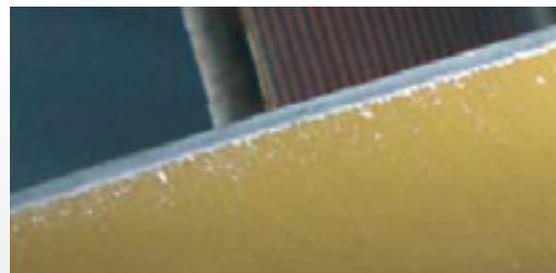
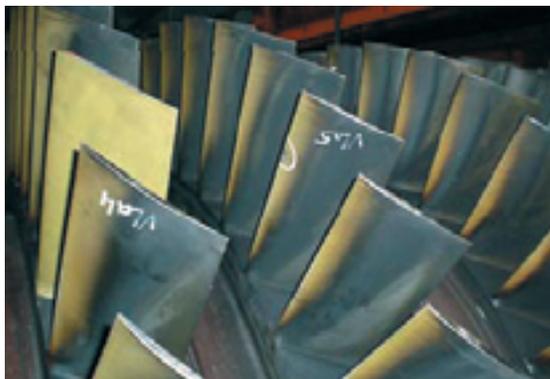


Рис. 1. Зависимость значений тепловой мощности и выходной электрической мощности

Фото 1. Эрозия покрытия передней кромки лопатки компрессора





Причины снижения характеристик ГТУ

Эрозия

Обычно эрозия лопаток компрессора связана с воздействием частиц диаметром более 5 мкм, поступающих с всасываемым воздухом. Такие частицы оказывают абразивное воздействие на покрытие и основу лопаток, ухудшают их аэродинамику и снижают эффективность работы компрессора.

В результате воздействия частиц изменяется форма лопаток и направляющего аппарата с последующим увеличением шероховатости их поверхностей и изменением профиля потока воздуха (фото 1).

Загрязнение

Частицы диаметром менее 5 мкм, поступающие с всасываемым воздухом, вызывают загрязнение компрессора. Эти мелкие и очень мелкие частицы различного происхождения (несгоревшие углеводороды, частицы соли в воздухе, отработанные газы, иногда поступающие из выхлопного тракта самой газовой турбины, песок и т.д.) вместе с частицами воды являются источниками загрязнения. Они могут вызывать изменение формы передней кромки лопаток, шероховатости поверхностей лопаток и направляющего аппарата, в результате чего поток воздуха приобретает турбулентные характеристики.

Кроме того, налет постепенно наслаивается на лопатках и направляющем аппарате, в результате чего уменьшается объем проходящего воздуха. Водяной туман, влага и пары нефтепродуктов воздействуют как клеящее вещество, и налет «прилипает» к поверхности лопаток компрессора (фото 2). При повышении темпе-

ратуры на последних ступенях компрессора отложения образуют довольно толстый слой. В зависимости от количества соли и других агрессивных загрязняющих веществ во всасываемом воздухе, происходит взаимодействие с влагой в атмосфере и усиливаются процессы коррозии.

Отложения черного цвета на первых ступенях компрессора являются основным признаком загрязнения. Для удаления налета и уменьшения потерь мощности установки оператор использует процедуру промывки (с отключением или без отключения оборудования).

Обычно отложения на лопатках первых ступеней компрессора удаляются вручную, чтобы избежать попадания загрязнений на последующие ступени. Но даже если лопатки начальных ступеней были очищены вручную, грязь с других ступеней может оседать на лопатках и направляющем аппарате следующих ступеней с образованием толстого слоя налета (фото 3, 4). Налет включает в себя частицы всех загрязняющих веществ, которые могут проникнуть через систему фильтрации воздуха.

Кроме того, под воздействием частиц соли, поступающих из фильтров и высвобождающихся при высокой влажности воздуха или от влаги испарительных охладителей, происходят коррозионные процессы в горячем тракте (последние ступени компрессора, камера сгорания, турбина).

Снижение характеристик ГТУ

Снижение характеристик турбины вызвано повышенными потерями выходного потока воздуха в связи с увеличением зазора между лопатками и корпусом, изменением шерохова-

Фото 2. Лопатки компрессора с различным налетом

Фото 3. Первый ряд лопаток компрессора

Фото 4. Последний ряд лопаток компрессора

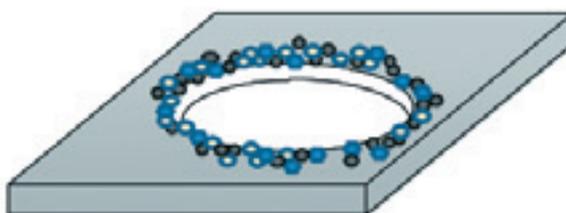
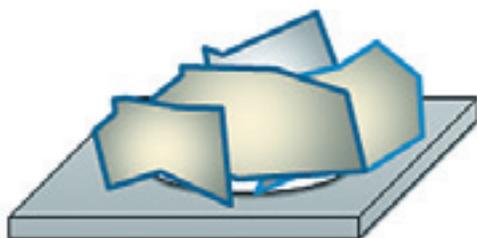


Рис. 2. Загрязнение каналов системы охлаждения

Рис. 3. Нарушение потока охлаждающего воздуха

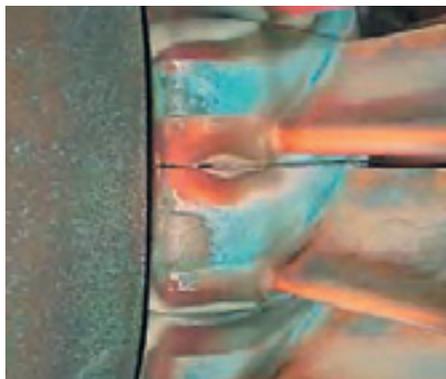


Фото 5. Прижоги на лопатках компрессора в результате перегрева металла

тости поверхностей и нарушении равномерности потока охлаждающего воздуха, а также сходным образованием налета в холодном тракте камеры сгорания и на компонентах турбины. При неравномерном распределении охлаждающего воздуха лопатки или направляющий аппарат могут частично перегреваться, что впоследствии вызовет поломку.

Остатки металлических частиц в процессе окисления и загрязняющие частицы из компрессора «запекаются», что обусловлено различными коэффициентами теплового расширения (особенно при пусках и остановах), и направляются с потоком охлаждающего воздуха на компоненты турбины через отверстия системы охлаждения. Они могут заблокировать эти отверстия и нарушить равномерную подачу охлаждающего воздуха к элементам горячего тракта (рис. 2, 3). Кроме того, в результате недостаточного охлаждения на лопатках могут появиться прижоги (фото 5).

Ухудшение характеристик пароводяной системы

На ухудшение характеристик пароводяной системы влияет продолжительность эксплуатации, а также соответствие чистоты воды установленным нормам с целью защиты материала труб от эрозии и коррозии. Газовый тракт паровой турбины подвергается воздействию отложений и коррозии, как и в ГТУ.

Все отложения и загрязняющие вещества, проходящие через турбину, контактируют с трубами котла-утилизатора. Коррозия ребер труб и самих трубопроводов начинается с момента, когда точка росы достигает значения ниже температуры поверхности труб. Кроме того, для прогнозирования общих потерь необходимо принять во внимание потери тепла через корпус котла-утилизатора.

Изменение температуры исходящего газа и снижение массового расхода воздуха в газовой турбине в совокупности с ухудшенными харак-

теристиками незначительно влияют на общее снижение характеристик всей установки комбинированного цикла. Снижение расхода воздуха можно частично компенсировать повышением температуры выходящего газа. Отложения на трубах котла-утилизатора образуются при использовании топливного газа ненадлежащего качества в процессе эксплуатации турбины; при этом необходимо применять тяжелое углеводородное топливо с присадками для защиты всей системы от коррозии.

Потеря давления в системе воздухозабора

Эксплуатационные характеристики газовой турбины напрямую зависят от уровня потери давления в системе воздухозабора, что отрицательно воздействует на общее функционирование ГТУ. Согласно международным источникам и данным экспертов, повышение перепада давления в системе воздухозабора на 1000 Па снижает производительность ГТУ на 1,5 % и КПД на 0,45 %. Это общие расчеты, которые могут варьироваться в зависимости от типа установленной ГТУ / компрессора.

Газовые турбины ранних модификаций были менее чувствительны к наличию загрязняющих частиц в воздухе и снижению характеристик. Системы фильтрации воздуха оснащались фильтрами классов G4 и F8 для соответствия всем спецификациям и требованиям производителей оборудования в отношении загрязняющих веществ, поступающих с воздухом в ГТУ. Изменения перепада давления связаны непосредственно с аккумулярованием пыли в воздушных фильтрах (рис. 4).

Важным фактором для оценки перепада давления в воздушных фильтрах является удельный объем воздуха, проходящего через них. Согласно существующим стандартам тестирования фильтров, номинальный объем потока составляет 3400 м³/ч. Размеры комплексного воздухоочистительного устройства разрабатываются под указанный стандарт. При более высоком объеме потока снизится эффективность фильтрации, увеличится перепад

Рис. 4. Графики изменения перепада давления на предварительном фильтре класса G4 / фильтре тонкой очистки класса F8

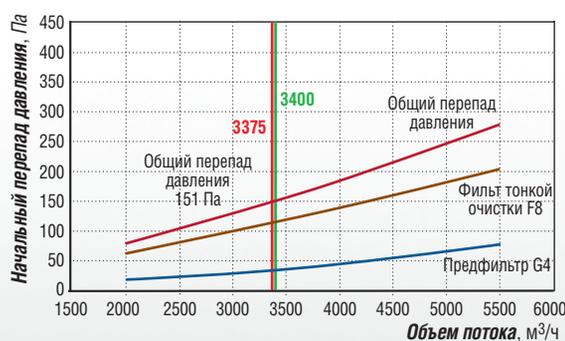
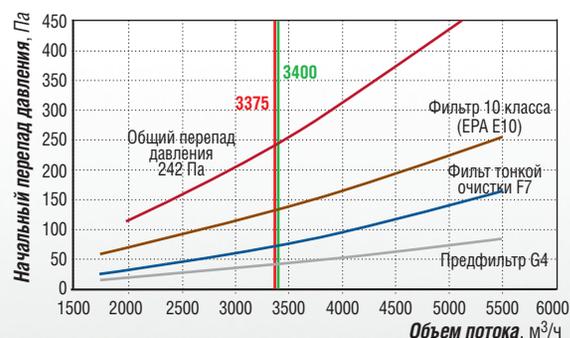


Рис. 5. Графики изменения перепада давления на предварительном фильтре класса G4 / фильтре грубой очистки класса F7 и фильтре тонкой очистки класса E10



давления – в результате снизятся эксплуатационные характеристики турбины.

При номинальном объеме потока на каждой опции КВОУ общий перепад давления составляет только 100 Па, что вызывает снижение мощности ГТУ на 0,15 %. Начальная эффективность воздухоочистительного устройства, состоящего из фильтров класса G4/F8, составляет 59,5 %. Усовершенствованное КВОУ, включающее три ступени (фильтры класса G4/F7/E10), обеспечивает эффективность до 96,94 % (рис. 5).

Примеры расчета эффективности систем фильтрации даны на рис. 6, 7. При этом для расчетов принимались следующие условия:

- поток в ГТУ – 450 м³/с;
- наработка/год – 8200 ч;
- установленные воздушные фильтры – 480 FE;
- ожидаемая степень загрязнения для частиц размером менее 10 мкм (PM10) – 85 мкг/м³.

Приведенные расчеты основаны на минимальных значениях эффективности (EN779:2012) и начальной эффективности фильтров (EN1822:2011, части 1-5) согласно фактическим стандартам испытаний. Данные в отношении охлаждающего воздуха и камеры сгорания являются предположительными и зависят от конкретной конструкции газовой турбины.

Кроме того, значения ожидаемой степени загрязнения для PM10 необходимо проверить, а предполагаемое количество проникающей пыли можно рассчитать заново в соответствии с измеренными или расчетными местными условиями загрязнения воздуха. В таблице представлена эффективность КВОУ с различными классами фильтров в течение 8200 рабочих часов.

Выводы

Таким образом система фильтрации КВОУ ГТУ значительно влияет на изменение технических характеристик в процессе эксплуатации газотурбинного двигателя. Современные тенденции в применении технологии высокоэффективных систем фильтрации КВОУ ГТУ получают все большее распространение.

Стандартные решения фильтрации, не учитывающие особенности уровня запыленности и места расположения станции, могут привести не только к снижению эксплуатационных характеристик и срока службы дорогостоящей ГТУ, но и к разрушению горячей части двигателя. Также может произойти ее преждевременный износ в результате коксования каналов системы охлаждения турбинных лопаток.

Окончание статьи в следующем номере.

Об авторе статьи

Детлеф Маркс более 40 лет работает в качестве эксперта в области эксплуатации и технического обслуживания атомных, тепловых и газотурбинных электростанций. Более 20 лет он занимается управлением проектов по строительству ГТЭС различных циклов, мониторингу эксплуатационных параметров, а также изучению факторов, влияющих на снижение характеристик ГТУ в процессе эксплуатации. Основные усилия автора направлены на разработку технологий по повышению КПД турбин. Детлеф Маркс активно поддерживает инициативы заказчиков по оптимизации систем КВОУ газовых турбин.

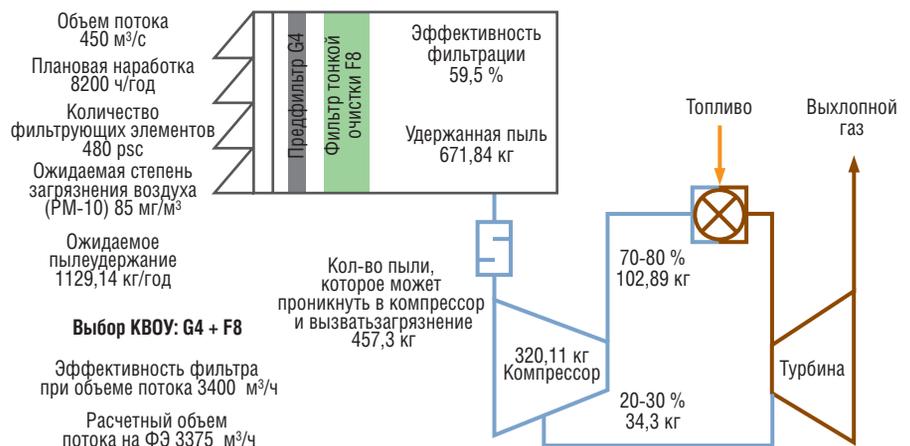


Рис. 6. Расчет эффективности системы фильтров класса G4/F8

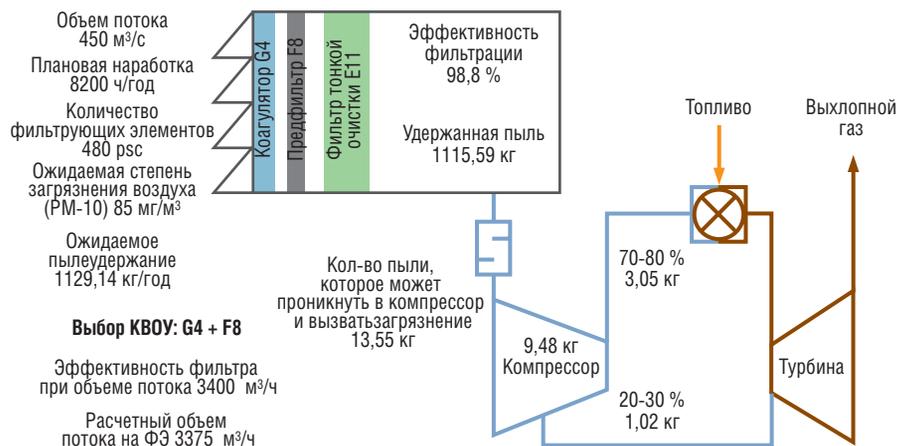


Рис. 7. Расчет эффективности системы фильтров класса M5/F9/E1

Табл. Эффективность различных систем фильтрации

	G4/F8	M6/F9	G4/F7/E10	M5/F9/E11
Эффективность системы фильтрации, %	59,50	79,00	96,84	98,80
Ожидаемое количество пыли /год, кг	1129,14	1129,14	1129,14	1129,14
Пыль, удержанная системой, кг	671,84	892,02	1091,16	1115,59
Предполагаемое количество пыли, проникающей в компрессор, кг	457,30	237,12	37,98	13,55