

УДК 621.311

КОРРОЗИЯ В ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВКАХ

Миргород Ю. С.

Научный руководитель – старший преподаватель Пронкевич Е. В.

Надежная работа электростанции, работающей на газотурбинных установках, зависит от состава и чистоты рабочей среды. Необходимо учитывать возможные воздействия от химической среды газовой турбины, представленной воздухом, топливом (газом, мазутом) и водой. Излишняя концентрация определенных компонентов топлива или загрязнение в одной или нескольких эксплуатационных средах могут оказать отрицательные воздействия на разные части газовой турбины, такие как компрессор, клапаны, горелки, аэродинамические поверхности турбины, каналы охлаждения и т. д.

Зная свойства топлива, можно применить соответствующие меры, чтобы гарантировать бесперебойную работу газовой турбины. Путем контроля уровня примесей во всех рабочих средах можно значительно снизить риск коррозии, загрязнения и повреждения.

Далее будет дан обзор химического и коррозионного аспектов газотурбинных электростанций.

Топливо, процесс сжигания, выбросы

Современные высокоэффективные газовые турбины с кольцевыми или трубчатыми камерами сгорания обычно разрабатываются для использования газообразного или жидкого дистиллятного топлива, в то время как сжигание зольных топлив ограничивается турбинами с силовыми камерами сгорания. Чтобы оценить пригодность топлива для применения в газовой турбине, необходимо проверить следующие ключевые параметры в отношении спецификации соответствующего типа турбины:

Жидкое топливо	Газообразное топливо
	Свойства и состав
Кинематическая вязкость	Диапазон нижнего значения температуры нагрева (LHV)
Плотность при 15 ° С макс	Диапазон числа Воббе (WI)
Температура топлива, макс.	Колебания LHV и WI
Точка застывания	Давление газа
Точка возгорания	Колебания давления газа
Восстановление дистилляцией	Температура газа
Углеродный остаток	Сероводород (H ₂ S)
Теплотворная способность	Водород
Колебания значений температуры	Высшие углеводороды (C ₂ +)
Элементарный состав (C, H, N, S)	
Содержание ароматических углеводородов	
Зольность	
	Примеси
Вода и осадки	Содержание пыли
Микроэлементы (Na, K, Ca, V, Pb, Ni, Zn)	Микроэлементы (Na, K, Ca, V, Pb, Ni, Zn)
	Содержание смазочного масла
	Относительная влажность
	Размер частиц пыли

- *Жидкое топливо.* Кинематическая вязкость жидкого топлива должна быть в определенном диапазоне для оптимального распыления в сопле. Если вязкость слишком высокая, топливо необходимо нагреть для её снижения. Однако максимальная температура предварительного нагрева должна оставаться ниже предельного значения, при котором происходит образование кокса. Повышенный риск образования кокса также обусловлен повышенным содержанием углеродных остатков и ароматических углеводородов, а также высокими температурами регенерации дистиллята. Ароматические соединения дополнительно увеличивают радиационное воздействие на компоненты в камере сгорания; высокое содержание ароматических соединений может потребовать снижения температуры на входе в турбину. Отложения кокса в топливных системах крайне нежелательны, так как они не могут быть смыты любым растворителем. Это приводит к тому, что компоненты с отложениями (например, лопасти турбины) должны быть удалены из турбины для механической очистки. Образование кокса в системе распределения топлива сопровождается образованием дыма в выхлопных газах, что приводит к чрезмерным выбросам СО и твердых частиц. Большие выбросы SO₂ вызваны соответствующим высоким содержанием серы в топливе, тогда как связанный с топливом азот будет способствовать выбросам NO_x.

Загрязнение воды и наличие осадков может привести к засорению фильтров и вызвать коррозию и износ в системе хранения и транспортировки топлива. Примеси золы и микроэлементов приводят к коррозии и загрязнению компонентов турбины ниже по пути следования горячего газа в турбине.

Газообразное топливо. По сравнению с жидким топливом, контроль газообразного топлива менее требователен. Одной из основных проблем газообразного топлива является содержание конденсируемых молекул. Расширение углеводородных конденсатов может вызвать перегрев горелки. Конденсированная вода может вызвать коррозию в системе распределения топлива. Если продукты коррозии попадут в камеру сгорания, на турбине будут осаждаться твердые отложения расплавленных оксидов. Если в топливном газе содержится повышенное количество соединений серы, твердые отложения будут образовываться при взаимодействии с влагой и конденсированными углеводородами. Чтобы избежать конденсации, топливный газ должен быть предварительно нагрет, по крайней мере, на 20 К выше точки конденсации.

Выбросы. Для газообразного топлива выбросы NO_x контролируются сжиганием сухой заранее приготовленной смеси. Для жидких топлив необходима подача воды для снижения температуры пламени и, следовательно, выбросов NO_x. Обычно применяется соотношение вода к топливу $\omega = 1.2$.

Турбина и путь движения горячего газа

В камере сгорания примеси щелочных металлов в топливе реагируют с серой с образованием сульфатов натрия и калия, которые конденсируются на поверхностях турбины и пути движения горячего газа. При температурах в диапазоне от 700 до 900 °С сульфаты щелочных металлов на турбине расплавляются и вступают в реакцию с металлом, что вызывает известную коррозию (сульфидирование). Чтобы контролировать горячую коррозию, содержание щелочных металлов в воздухе, подаваемом в камеру сгорания, должно быть сведено к минимуму. Дизельное топливо действительно может содержать некоторое количество натрия, в то время как натрий в дистиллятном мазуте обычно вызывается загрязнением последнего соленой водой во время транспортировки. Водорастворимые ионы натрия и калия могут быть удалены из топлива промывкой и обезвоживанием на установке по очистке мазута. Также предпринимаются способы снизить коррозионную активность расплавов сульфатов щелочных металлов за счет добавления добавок на основе Cr, Mo и W. При добавлении данных металлов, расплавы трансформируются в сухие отложения, которые можно смыть. Однако накопление осадка между циклами удаления сухих отложений снижает эффективность турбины. Наличие щелочных металлов в камере сгорания обусловлено не только их наличием в топливе, они также могут попадать из воздуха и воды, поступающих из окружающей среды для

уменьшения выбросов NO_x и увеличения мощности. Поэтому необходимо учитывать все концентрации загрязнителей в отдельных потоках, а их общая концентрация в горячем газе не должна достигать уровней, которые пагубны для компонентов газовой турбины.

Для газовых турбин Alstom предел щелочных металлов в горячем газе соответствует 0.2×10^{-6} и 0.5 эквивалентной концентрации топлива, соответственно, в зависимости от материала турбины.

Следующая формула показывает, как складывается концентрация любого отдельного загрязняющего вещества в горячем газе (связанная с массовым расходом топлива):

$$f_{\text{экс}} \geq f + a \times \frac{m_a}{m_f} + w \times \frac{m_w}{m_f} + i \times \frac{m_i}{m_f}, \quad (1)$$

где

$f_{\text{экс}}$ – макс. указанная суммарная концентрация загрязняющих веществ во всех потоках как эквивалент загрязнённости топлива [долей];

f – концентрация примесей в топливе [долей];

a – концентрация примесей в воздухе [долей];

w – концентрация загрязняющих веществ в воде/паре, впрыскиваемом в камеру сгорания, и воздушном потоке [мг/кг];

i – концентрация примесей в любых других средах (добавки и т.д.) [мг/кг];

m_a – массовый расход воздуха [кг/с];

m_f – массовый расход топлива [кг/с];

m_w – сумма массовых расходов воды/пара (вода для уменьшения концентрации NO_x , испарительного охлаждения, охлаждения запотеванием, др.) [кг/с];

m_i – массовый расход любого дополнительного потока среды в газовую турбину [кг/с].

В зольных нефтяных топливах также можно обнаружить тяжелые металлы. Эти металлы, главным образом ванадий и никель, химически связаны в маслорастворимых металлоорганических комплексах и поэтому не могут быть удалены на установке по очистке топлива. При сгорании они образуют коррозионные расплавы оксидов металлов, которые вызывают коррозию при высоких температурах. При добавлении магниевой добавки расплавы преобразуются в не коррозионные отложения, которые можно смыть. Однако если температура газа слишком высока или содержание серы в топливе слишком низкое, осадки необратимо теряют свою растворимость, вызывая загрязнение турбины. Засорение турбины также вызвано примесями кальция и кремнезема в топливе, воде и воздухе.

Компрессор газовой турбины

Пыль и соли окружающего воздуха обычно удерживаются на 80% - 90% за счет воздушного фильтра. Но если фильтр перегружен или влажный из-за конденсации окружающей влаги, производительность процесса очистки снижается. Летучие примеси воздуха, такие как SO_2 , NO_x и органические вещества, беспрепятственно проходят через фильтр, небольшие частицы сажи едва удерживаются. Соли, пыль, а также органические примеси воздуха осаждаются на компрессоре и в путях движения воздуха в соответствии с местными условиями потока. Во входных ступенях отложения составляют около 70% органического вещества и 30% пыли и растворимых солей. Липкие органические молекулы действуют как связующее вещество для пыли и солей. Загрязнение компрессора не только вызывает значительные потери мощности, но также создает серьезную коррозионную опасность из-за высокого содержания коррозионных солей. Во время эксплуатации коррозия ограничивается первыми входными ступенями, так как последние ступени работают в сухом состоянии. Но во время простоя гигроскопические соли в отложениях также гидратируются,

образуя концентраты рассолов. Если соли содержат хлориды, будет иметь место коррозия, вызванная влажными отложениями. Чтобы избежать коррозии следует в остановленном состоянии турбины промыть компрессор и высушить. Регулярная мойка компрессора также необходима для восстановления производительности турбины. Для удаления адгезивных органических примесей необходима промывка водой / моющим средством под высоким давлением. Коррозионные свойства и наличие примесей в очистителе должны быть учтены перед началом очистки, чтобы избежать дополнительной коррозии и загрязнения, вызванного чистящим средством. Компрессоры могут быть очищены как в рабочем, так и в автономном режиме. Очистка в режиме «офлайн» более тщательна, но требует остановки двигателя. Очистка в режиме работающей турбины используется для перехода между циклами очистки в автономном режиме. Однако следует заметить, что после длительных периодов без очистки компрессора, он должен быть очищен сначала в автономном режиме, иначе накопленные соли будут смыты внутрь турбины.

Для увеличения массового расхода потока компрессора газовой турбины и, таким образом, выходной мощности турбины, впускной воздух может быть охлажден. Существуют две системы охлаждения, основанные на испарении воды: система испарительного охлаждения и система затуманивания (запотевания) воздуха.

В системе испарительного охлаждения воздух проходит через ячейки с большой площадью поверхности, в которых циркулирует вода. Воздух охлаждается путем испарения воды на поверхностях ячеек. Попадание водяных капель в охлажденный воздух увеличивает поток примесей в компрессор. Для контроля переноса солей, дрейфующие отделители устанавливаются ниже по потоку от испарительного охладителя, а коэффициент концентрации циркулирующей воды регулируется потоком непрерывной продувки.

В системе затуманивания (запотевания) вода распыляется через мелкие сопла во впускную воздушную камеру перед компрессором, чтобы создать туман, состоящий из мелких капелек. При испарении воды воздух охлаждается. В нормальных условиях запотевания, положение сопел и количество впрыскиваемой воды регулируются, чтобы капельки тумана испарились до достижения компрессора. В агрегатах с высоким запотеванием туман входит в компрессор и испаряется в теплых секциях компрессора. Все примеси в воде, используемой для формирования тумана попадают в воздух компрессора. Поэтому для воды данной системы охлаждения применяются те же требования к чистоте, что и для воды для восстановления NOx (то есть деминерализованная вода).

Загрязнение каналов охлаждения

Горячие части газовых турбин охлаждаются, чтобы обеспечить их рабочие характеристики и срок службы. Для охлаждения воздух отбирается из компрессора газовой турбины. Узкий канал и тонкое сопло системы охлаждения очень чувствительны к загрязнению. Соли и минералы, содержащиеся в воздухе компрессора, а также продукты коррозии и окисления компонентов на входе могут привести к блокировке каналов охлаждения.

Для более эффективного охлаждения в высокопроизводительных турбинах горячий компрессорный воздух охлаждается перед использованием для охлаждения горячей детали. Большая поверхность воздухоохладителей увеличивает риск выброса окислов в охлаждающий воздух.

Охлаждение паром несет дополнительные риски, связанные с охлаждением каналов. В паре ускоряется окисление материалов, увеличивается риск попадания оксидных частиц в хладагент. В паре высокого давления повышается растворимость диоксида кремния и солей. Чтобы ограничить риск коррозии и загрязнения в охлаждаемых деталях, необходим мониторинг и контроль чистоты пара.

Заключение

Производительность и ресурс газотурбинных электростанций сильно зависят от химических свойств рабочей среды. Контролируя уровни примесей в воздухе среды, топливах и воде, риск коррозии может быть сильно уменьшен.

Литература

1. Турбины тепловых и атомных электрических станций: Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. / А.Г. Костюк, В.В. Фролов, А.Е. Булкин, А.Д. Трухний; Под ред. А.Г. Костюка, В.В. Фролова. –М.: Издательство МЭИ, 2001. – 488 с. ил.
2. Неверов А. С. Коррозия и защита материалов: учеб. пособие / А.С. Неверов, Д.А. Родченко, М.И. Цырлин. – Минск: Выш. шк., 2007. – 222 с.: ил.