

Двигатель АЕ64.3А компании Ansaldo Energia: модификации для российского рынка

Леонардо Торбидони, Люка Абба, Роберто Абрам, Люка Бордо – Ansaldo Energia

In brief

**Ansaldo Energia AE64.3A
gas turbine evolution
pathway.**

The article describes the latest release of the AE64.3A gas turbine which is now available on offer and addresses the ongoing development of the retrofitable upgrade solution which will be released in 2015. The technical feature details of the next engine upgrade are presented for the hot gas path components, the combustion chamber and the burners. Conclusions demonstrate the capability of Ansaldo Energia in delivering the latest-technology retrofitable improvements on the AE64.3A gas turbine. The AE64.3A is the small engine in family, with its 75 MW coupled with an F-class efficiency.

В условиях современного рынка производители газотурбинных энергоблоков должны учитывать его специфические потребности, зависящие от региональных факторов, таких как особенности климата, изменение потребностей в электроэнергии в течение суток, параметры энергосети и т.д. Для поддержания конкурентоспособности и стабильного роста рыночной доли необходимо максимальное соответствие таким требованиям. В связи с этим все более популярными становятся электростанции комбинированного цикла, работающие на природном газе. Это обусловлено следующими факторами:

- наличие новых местных источников природного газа, сланцевого и других низкокалорийных газов;
- ограничение использования угольных и атомных электростанций;
- быстрое развитие электростанций на возобновляемых источниках энергии и их применение в энергосистемах.

При этом необходимо поддерживать энергобаланс в сети путем создания горячего резерва и частотного регулирования. Наиболее эффективными для обеспечения гибкого резервирования мощности в сети являются ПГУ, работающие на газе.

Кроме того, для обеспечения надежного центрального отопления лучшим решением, с экономической и экологической точки зрения, являются также ПГУ с теплофикацией. Более 90 % оборудования для систем центрального отопления в мире – это газотурбинные электростанции когенерационного и комбинированного цикла с теплофикацией. Другими их преимуществами являются диапазон мощности ГТУ, полностью соответствующий целям теплофикации, максимальная надежность, низкие капитальные затраты и возможность оптимизации оборудования в соответствии со специфическими требованиями заказчиков.

С учетом данных факторов, компания Ansaldo Energia предлагает модельный ряд ГТУ в классах F и E: AE64.3A мощностью 75 МВт (F); AE94.2 – 170 МВт (E); AE94.3A – 294 МВт (F). Все оборудование имеет коэффициент надежности более 98 %.

ГТУ AE64.3A – самая маленькая турбина в модельном ряду компании: ее мощность составляет 75 МВт, эффективность F класса. Благодаря своей экономичности, высокому КПД, доступности и надежности, она является оптимальным решением для систем центрального отопления. Надежность оборудования подтверждается более чем 1600 тыс. эквивалентных часов эксплуатации, в том числе и в России: Тюменская ТЭЦ-1 (1 ГТУ); Первомайская ТЭЦ-14 (4 ГТУ) и Юго-Западная ТЭЦ (5 ГТУ) в С.-Петербурге; Адлерская ТЭЦ (4 ГТУ), ТЭЦ-9 в Москве (1 ГТУ).

Как видно на рис. 1, в период 1990-х гг. ГТУ AE64.3A постоянно совершенствовалась и модернизировалась с целью повышения мощности и КПД. В настоящее время на рынке предлагается последняя модификация AE64.3A Improved мощностью 75 МВт и КПД 36 %. Доступен вариант ГТУ для работы на низкокалорийном газе.

Следующий этап модернизации запланирован на 2015 год: мощность газовой турбины будет увеличена на 3 МВт, КПД – на 0,3 %.

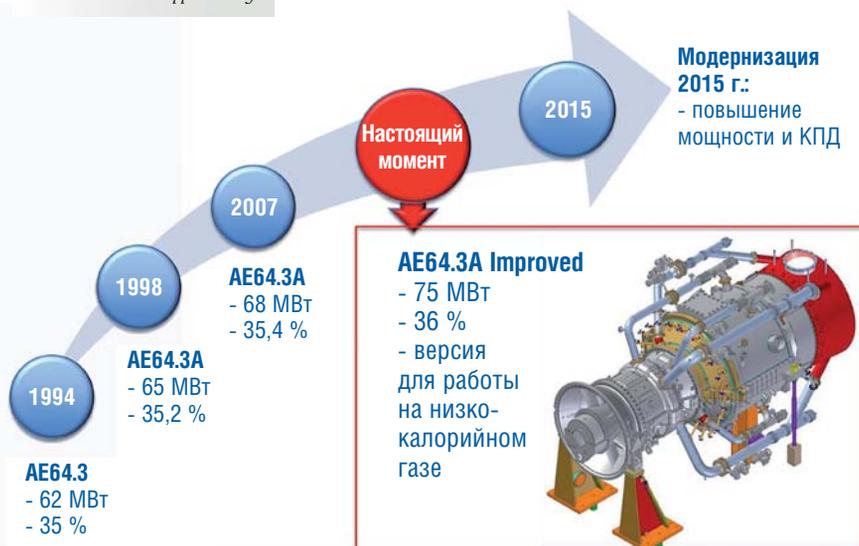


Рис. 1. Развитие двигателя AE64.3A по годам

Особенности конструкции ГТУ АЕ64.3А

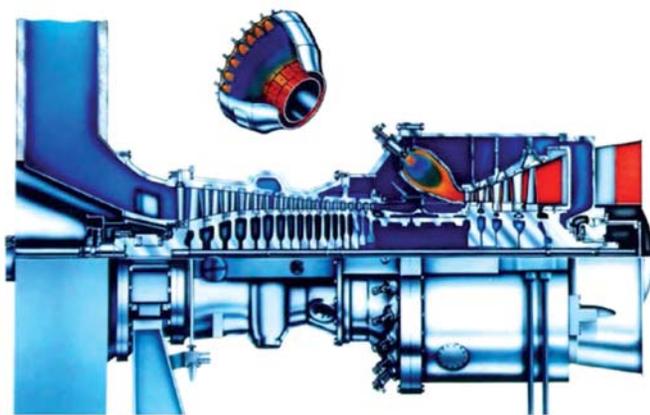
На рис. 2 представлена базовая конструкция одновального двигателя АЕ64.3А. Она включает 17-ступенчатый осевой компрессор (15 ступеней для модификации АЕ64.3А Improved) с направляющими лопатками изменяемой геометрии и 4-ступенчатую осевую турбину. Частота вращения ротора составляет 5400 об/мин. Ротор состоит из передней секции вала, рабочих колес компрессора, центральной пустотелой секции вала, рабочих колес турбины и задней секции вала. Все компоненты соединены центральным болтом с фиксирующей гайкой со стороны турбины. В результате ротор представляет собой самоподдерживающуюся конструкцию со сравнительно малым весом и высокой жесткостью.

Диски ротора имеют хиртовое (V-образное) зацепление с обеих сторон. Зубцы лопаточного хвоста обеспечивают радиальное выравнивание секций ротора, оптимальную передачу крутящего момента, возможность свободного радиального расширения и сжатия. Данная конструкция имеет большое значение для срока службы компонентов ротора в соответствии с изменениями условий эксплуатации и распределением температурных полей в роторе. Обеспечивается быстрый запуск и работа на различных режимах и в условиях стабильных и нестабильных температурных полей.

Ротор закреплен на двух подшипниках на передней и задней секциях. На стороне компрессора применен комбинированный упорный подшипник скольжения, который был разработан для балансировки осевого давления ротора. Оба подшипника установлены вне зон повышенного давления ГТУ, обеспечивая оптимальную регулировку компонентов ротора.

Все направляющие и рабочие лопатки статора имеют воздушное охлаждение, за исключением неохлаждаемой последней ступени. Охлаждающий воздух отбирается из компрессора при необходимом давлении и температуре, что обеспечивает высокую эффективность охлаждения. После прохождения лопаток воздух отводится в поток горячих газов.

Ступени компрессора 1–9 имеют одностенный корпус, остальные ступени, турбина и камера сгорания – двухстенный (внутренний и внешний). Основным преимуществом двухстенного корпуса является оптимальное распределение механических и тепловых нагрузок на внутреннем и внешнем корпусе. Механические нагрузки, обусловленные внутренним давлением, принимает на себя внешний корпус, тепловые нагрузки здесь низкие. Внутренний корпус принимает тепловые



нагрузки, а механические нагрузки на нем низкие. На внутреннем корпусе закреплены лопатки статора.

Привод генератора осуществляется с холодного конца. Газовая турбина соединяется с валом через редуктор, чтобы обеспечивать необходимую частоту вращения в зависимости от требований сети. ГТУ приводит во вращение генератор WY18Z.

Последняя модификация ГТУ АЕ64.3А оснащена кольцевой низкоэмиссионной камерой сгорания DLN с 24 горелками типа HR3. Она размещена в центральной секции двухстенного корпуса. Внутренние поверхности КС выложены металлическими термобарьерными плитками с керамическим покрытием (фото 1).

Конструкция горелки HR3 обеспечивает возможность работы на газообразном и жидком топливе с низким уровнем эмиссии NO_x и CO (рис. 3, фото 2). Аэродинамика горелки обеспечивается двумя концентрическими завихрителями (осевой и диагональный), вращающимися в одном направлении. Диффузионная горелка оснащена пилотной горелкой для работы на обедненном топливе. Работа на жидком топливе обеспечивается специальными форсунками, в которых жидкое топливо смешивается с деминерализованной водой для снижения уровней эмиссии NO_x .

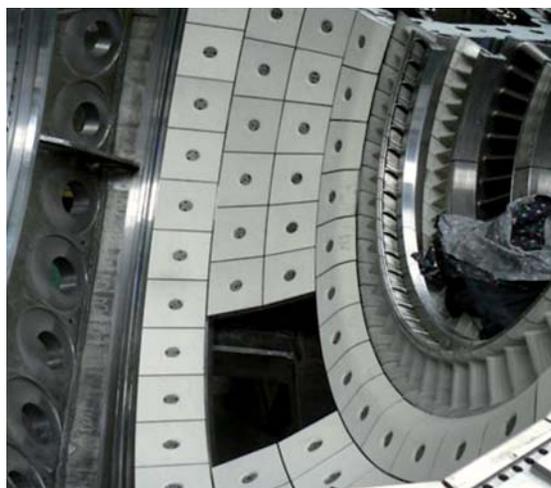


Рис. 2. Схема газовой турбины АЕ64.3А

Фото 1
Вид изнутри
низкоэмиссионной
камеры сгорания
ГТУ АЕ64.3А

Рис. 3.

Схема горелки HR3

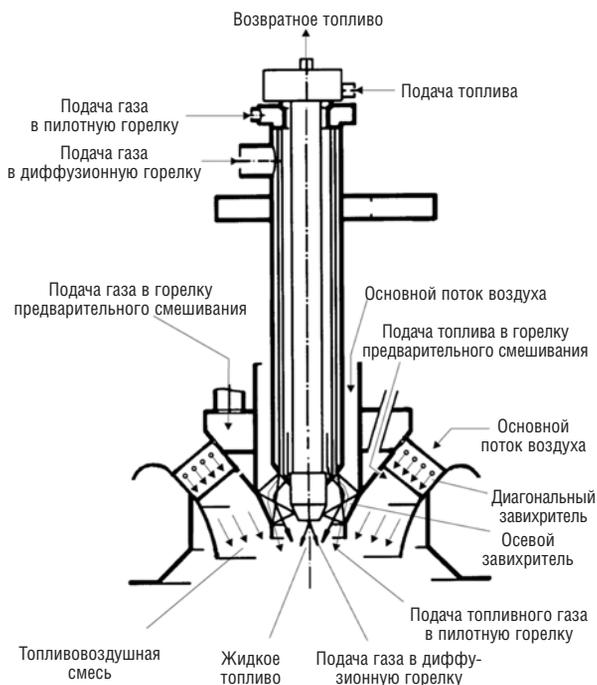


Фото 2.

Место установки горелки на кольцевой камере сгорания ГТУ АЕ64.3А



Особенности конструкции ГТУ АЕ64.3А Improved

Для создания эффективного рынка распределенного производства энергии в России необходимы надежные двигатели средней мощности с высокими эксплуатационными параметрами. При этом они должны иметь компактные размеры, а также низкие капитальные затраты при установке. Этим требованиям полностью соответствует ГТУ АЕ64.3А Improved, объединяющая в себе компактную конструкцию и передовые технологии, которые были отработаны на газовых турбинах АЕ94.3А (рис. 4, табл.).

Мощность последней модификации ГТУ, по сравнению с предыдущей версией, увеличена на 7 МВт, в комбинированном цикле – на 10 МВт, КПД в простом и комбинированном цикле повысился на 0,5 %. Возможно использование низкокалорийных газов в качестве топлива с теплотворной способностью менее 19 МДж/кг (необходима установка специальных горелок).

Газотурбинный двигатель АЕ64.3А разрабатывался в соответствии с требованиями энергосети для обеспечения горячего резерва энергосистем. В результате достигнут быстрый пуск газовой турбины: выход на полную мощность в течение 5 минут, работа в базовом режиме через 12 минут.

Возможен автоматический переход с одного вида топлива на другой. Уровень эмиссии NO_x при работе на природном газе составляет менее 50 мг/м³, на дизельном топливе – менее 120 мг/м³, уровень СО – 30 мг/м³ на обоих видах топлива. При этом используется 45 %-я эмульсия (деминерализованная вода/дизельное топливо). При работе на сухой, предварительно подготовленной топливной смеси уровень эмиссии NO_x составляет менее 250 мг/м³, деминерализованная вода при этом не используется. Для работы на низкокалорийных газах были созданы специальные горелки.

Рис. 4.

ГТУ АЕ64.3А Improved

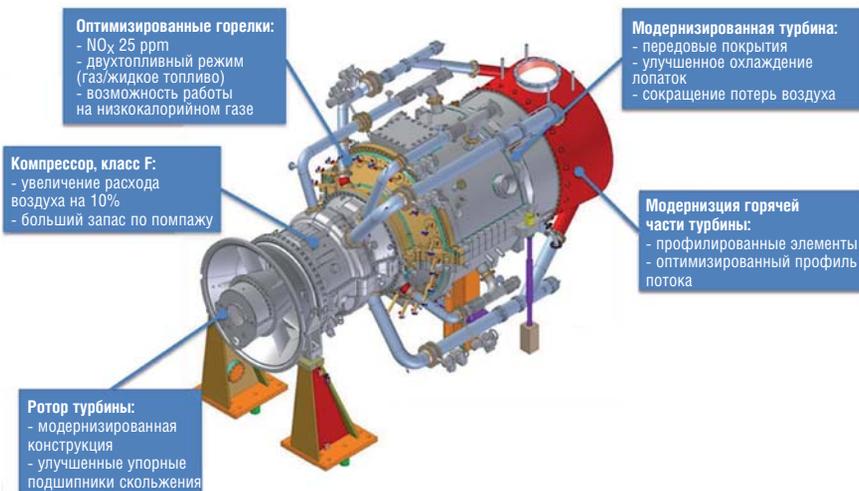


Табл. Эксплуатационные параметры ГТУ АЕ64.3А Improved в простом и комбинированном цикле (ISO, природный газ, базовый режим)

Температура газа на входе в турбину (ISO 2314), °C	1190
Степень повышения давления	18
Мощность ГТУ на клеммах генератора, МВт	75
КПД ГТУ на клеммах генератора, %	35,9
Расход выхлопных газов, кг/с	214
Температура выхлопных газов, °C	574
Мощность установки комбинированного цикла (1+1) на клеммах генератора, МВт	112
КПД установки комбинированного цикла (1+1) на клеммах генератора, %	53,8



Модификация ГТУ АЕ64.3А Improved выполнена за счет модернизации основных компонентов двигателя. Был использован высокоэффективный компрессор газовой турбины АЕ94.3А, при этом количество ступеней сокращено с 17 до 15 (фото 3, 4). Компрессор обеспечивает массовый расход воздуха на уровне 210 кг/с, степень повышения давления увеличена с 16 до 18, обеспечена более эффективная аэродинамика, на 20 % увеличен запас по помпажу.

Четырехступенчатая силовая турбина также смоделирована на основе ступеней турбины АЕ94.3А. Модификация более всего затронула первые две и последнюю ступень (рис. 5). Для рабочих и направляющих лопаток первых двух ступеней использованы передовые термобарьерные покрытия. В настоящее время возможна замена лопаток первых двух ступеней на предыдущей модели двигателя модернизированными лопатками. В последней ступени также используются лопатки ГТУ АЕ94.3А с новыми аэродинамическими профилями. В результате повысилась аэродинамическая эффективность и увеличился расход воздуха, подаваемого из компрессора.

При модификации рабочих и направляющих лопаток использованы передовые материалы, испытанные на двигателе АЕ94.3А. Применяются стержневые отливки рабочих лопаток ротора для максимального снижения тепломеханических нагрузок. Сокращено количество лопаток, применено напыление термобарьерного покрытия для снижения окисления и повышения устойчивости к высокотемпературной коррозии. Незначительной модернизации подверглись обойма и последние рабочие колеса турбины.

Профилированные элементы обеспечивают оптимальную аэродинамику потока, упорный подшипник скольжения компрессора – баланс осевых нагрузок ротора. Модифицированные горелки НРЗ имеют больший массовый расход рабочего тела.

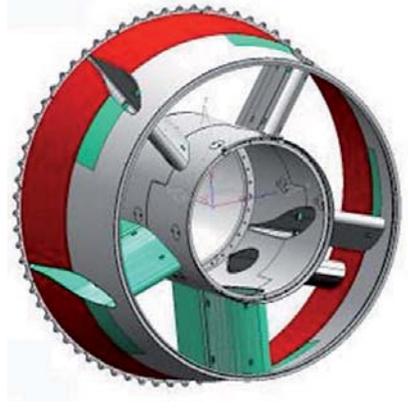


Фото 3. Ротор газовой турбины АЕ64.3А

Фото 4. Горячая проточная часть газовой турбины АЕ64.3А

Рис. 5. Канал выхлопных газов с горячей стороны турбины с профилированными элементами

В 2013 г. была реализована возможность работы двигателя на низкокалорийных газах. Для этого создана специальная горелка, позволяющая работать на газе с теплотворной способностью 19 МДж/кг. Испытания камеры сгорания проходили сначала при атмосферном давлении, а затем с требуемым давлением были проведены на испытательном стенде компании в г. Сеста, Италия (рис. 6). В результате было подтверждено, что турбина АЕ64.3А Improved может работать только на низкокалорийном газе без добавления природного газа. При этом горение было стабильным на всех режимах.

Дальнейшая модификация АЕ64.3А

Задачей следующего этапа модернизации, который запланирован на 2015 г., является улучшение эксплуатационных параметров ГТУ АЕ64.3А, с повышением температуры на входе в турбину на 25 °С (ISO 2314) – с 1190 до 1215 °С, а также сохранение существующего графика технического обслуживания. Улучшение параметров газовой турбины АЕ64.3А будет обеспечено повышением мощности на 3 МВт, КПД на 0,3 %, температуры выхлопных газов на 14 °С.

Стратегия модификации АЕ64.3А основывается на снижении требований к системам

Массовый расход рабочего тела/ массовый расход рабочего тела в режиме FSNL

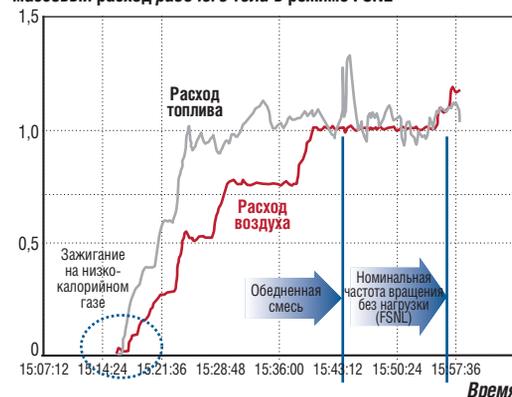
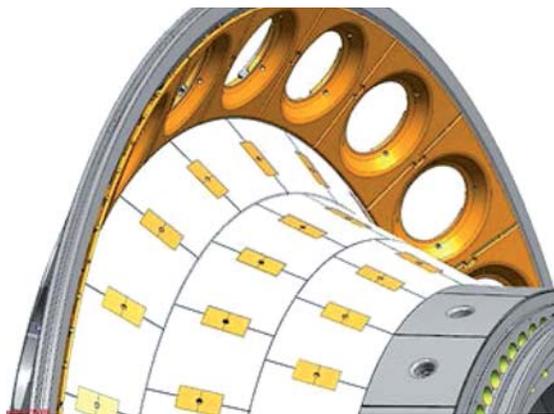


Рис. 6. Данные испытаний горелок НРЗ на низкокалорийных газах. Испытания проводились на газе с теплотворной способностью 19 МДж/кг под давлением

Рис. 7.
Вид кольцевой
камеры сгорания
с покрытием
керамическими плитками



подачи вторичного воздуха, а также на модернизации горелок. Вторичный воздух, как правило, добавляется на вход горелки для обеспечения стабильного горения и повышения температуры на входе в турбину при поддержании требуемых уровней эмиссии NO_x и CO (50 и 30 мг/м^3 соответственно).

Модификация коснется трех подсистем газовой турбины:

- проточная часть с модифицированной системой охлаждения рабочих лопаток, новые термобарьерные покрытия рабочих и направляющих лопаток, а также оптимизация системы подачи вторичного воздуха;
- камера сгорания с покрытием из керамических плиток, оптимизация компонентов и системы охлаждения камеры сгорания;
- модернизированные горелки с более высокими рабочими параметрами.

Все разработки могут быть использованы для модернизации предыдущих версий ГТУ (АЕ64.3А и АЕ64.3А Improved).

Рабочие и направляющие лопатки

Все охлаждаемые лопатки газовой турбины модернизированы с целью значительного сокращения (на 6 %) количества воздуха, необходимого для их охлаждения. Оптимизация конструкции направлена на улучшение системы внутреннего охлаждения лопаток, а также на увеличение толщины термобарьерного покрытия направляющих и рабочих лопаток первых двух ступеней и использование данной технологии для лопаток третьей ступени.

Охлаждение лопаток турбины, за исключением последней ступени, – внутреннее, конвективное, а также за счет внешних термобарьерных покрытий. Использование передовых термобарьерных покрытий повышает эффективность охлаждения и позволит снизить необходимый расход охлаждающего воздуха без сокращения срока службы лопаток.

На первых двух ступенях толщина существующих термобарьерных покрытий увеличена до максимальных размеров. На третьей ступени термобарьерные покрытия ранее не применялись.

Система внутреннего охлаждения лопаток доработана с учетом того, что объем расхода охлаждающего воздуха был сокращен за счет использования передовых термобарьерных покрытий. В результате средняя температура компонентов горячей части сохранена (или даже снижена) по сравнению с предыдущими версиями ГТУ, несмотря на повышение температуры рабочего тела на входе в турбину. Таким образом, тепломеханические нагрузки – низкие, а график технического обслуживания не изменился. Более того, отливки рабочих лопаток остались неизменными, что обеспечивает быструю поставку модернизированных компонентов.

Пленочное охлаждение лопаток первой ступени позволяет регулировать массовый расход воздуха путем точного подбора диаметра отверстий. Это особенно актуально для первой ступени направляющих лопаток – здесь необходимый расход охлаждающего воздуха снижен на 40 % от общего расхода для компонентов горячей части.

Новая точка расположения выбрана для регулирующего клапана в системе подачи воздуха на вторую ступень направляющих лопаток. Давление воздушного потока было снижено, а необходимое охлаждение достигнуто без изменения геометрии профиля лопаток. Аналогичные модификации выполнены для третьей ступени лопаток. Кроме того, был уменьшен диаметр отверстий подачи охлаж-

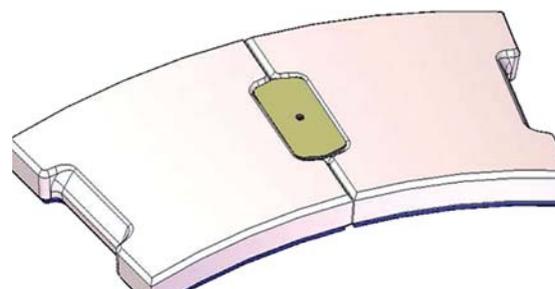


Фото 5.
Керамическая плитка и
металлический держатель

дающего воздуха, расположенных вдоль кромок лопатки.

Расход охлаждающего воздуха для рабочих лопаток второй ступени сокращен за счет использования дроссельных пластинок на входной секции лопатки. Был изменен профиль отверстий каналов охлаждающего воздуха лопаток третьей ступени на новую цилиндрическую конфигурацию с турбулизаторами. Такое решение, при использовании термобарьерных покрытий, позволяет уменьшить диаметр отверстий без изменения распределения температурных полей на лопатке.

Камера сгорания

Главной задачей при модификации камеры сгорания было повышение эксплуатационных параметров ГТУ АЕ64.3А с использованием передовых технологий, примененных в турбине АЕ94.3А, у которой внутренняя поверхность камеры сгорания покрыта керамическими плитками для тепловой защиты.

Модификация КС заключалась в замене металлических плиток керамическими. Ранее требовалось охлаждение металлических плиток в камере сгорания – после их замены эта необходимость отпала. Охлаждаться должны только металлические держатели керамических плиток. Вся конструкция в целом требует меньшего объема воздуха для охлаждения. Как указывалось ранее, сэкономленный воздух добавляется на вход горелок для поддержания стабильности горения и повышения температуры на входе в турбину.

Новые керамические пластины и держатели будут заменены металлическими на первых трех ступенях камеры сгорания (рис. 7). Керамические пластины крепятся к поверхности камеры сгорания с помощью металлических держателей (фото 5). В результате модификации необходимый объем охлаждающего воздуха снизится на 40 %.

Основные размеры камеры сгорания останутся неизменными. Для сохранения внутреннего объема КС применены более тонкие керамические пластины по сравнению с применяющимися в АЕ94.3А. Специальная форма керамических плиток и держателей способствует сокращению механических нагрузок в местах контакта керамических и металлических деталей.

Нужно отметить, что техническое обслуживание КС стало более удобным. Плитки и держатели демонтируются фронтально (не сбоку), болтовое крепление к корпусу осуществляется с помощью специальной запатентованной системы. Она обеспечивает простоту демонстрации во время обслуживания на площадке,

а также исключает блокирование компонентов по причине окисления или тепломеханической усталости.

Обслуживание керамического покрытия камеры сгорания такое же, как и для АЕ94.3А. Специальные датчики вибраций (акселерометры) установлены на внешнем корпусе КС. Эффективность их работы проверялась на испытательном стенде, после чего датчики были доработаны, и в настоящее время замечаний по их работе нет.

Горелки

Воздух, высвобождаемый в результате сокращения объема вторичного воздуха, добавляется на вход горелок, чтобы обеспечить стабильное горение и повысить температуру на входе в турбину с 1190 до 1215 °С при поддержании требуемых уровней эмиссии NO_x и CO .

Модификация горелок заключалась в изменении конструкции осевых и диагональных завихрителей. Была обеспечена возможность работы на газообразном и жидком топливе.

В процессе модернизации разработан ряд решений, основанных на технологии горелок HR3 и VeLo NO_x (горелка КС турбины АЕ94.3А, оснащенная пилотной горелкой, с использованием технологии работы на обедненной топливной смеси). Они были испытаны под давлением на испытательном стенде компании в г. Сеста. Для модификации газовой турбины был выбран вариант, показавший лучшие результаты в процессе испытаний. Диагональные завихрители горелок оснащены резонаторами Helmoltz. **D**

Последней версией газовой турбины является модель АЕ64.3А Improved, которая продемонстрировала высокие результаты в процессе опытно-промышленной эксплуатации. В настоящее время эта модель доступна на рынке. Модификация газовых турбин модели АЕ64.3А продолжается – следующий этап запланирован на 2015 год.

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на конференции Russia Power-2014, с согласия компании PennWell.