

УДК 621.165.621.438

Современные мировые тенденции повышения эффективности газотурбинных установок

Жавино К.В., Хомич В.В.

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

Использование парогазовых технологий является основной тенденцией развития мировой теплоэнергетики в последние десятилетия, что связано с разработкой надежных и экономичных газотурбинных установок (ГТУ). Электрический КПД современных одноцелевых ГТУ достигает 38...40 и даже 45%, а КПД бинарных парогазовых установок (ПГУ) на основе таких ГТУ приближается к 60%. Максимальная единичная мощность газотурбинных установок к настоящему времени превысила 300 МВт.

Основными направлениями повышения эффективности ГТУ являются: увеличение температуры газа перед турбиной (до 1500°C) и степени повышения давления в компрессоре (более 20). Это возможно благодаря широкому внедрению новых материалов: монокристаллических для лопаток турбины, хромистых сталей для дисков, высокопрочного чугуна с шаровидным графитом для корпусов компрессора; использованию специальных термоизолирующих покрытий лопаток и металлокерамических облицовочных плиток в камерах сгорания, а также прогрессивных технологий охлаждения паром высокотемпературных элементов (камер сгорания, статорных и роторных деталей газовой турбины) с последующим использованием пара в цикле ПГУ.

Разработаны компактные мало эмиссионные камеры сгорания, использующие эффективные «сухие» методы подавления образования вредных выбросов (содержание NO_x ниже 25 ppm, а в ряде случаев достигается уровень выбросов NO_x менее 10...15 ppm).

Для поддержания высокой экономичности однофазных ГТУ на частичных нагрузках применяются поворотные лопатки входного направляющего аппарата компрессора, а также направляющих аппаратов его нескольких первых ступеней, что позволяет снижать мощность ГТУ до 50...60% номинальной за счет уменьшения расхода воздуха через компрессор без понижения начальной температуры газов. Сохранение (или даже некоторое повышение) температуры газов после газовой турбины (а значит и на входе в котел-утилизатор) обеспечивает на переменных нагрузках достаточно высокую экономичность работы паротурбинной части и ПГУ в целом.

По уровню эффективности ГТУ, серийно производимые за рубежом, могут быть условно разделены на четыре класса [1].

Класс E. Установки, разработанные в середине 80-х годов прошлого столетия, обладающие высокой надежностью, длительным межремонтным периодом и требующие сравнительно небольших расходов на сервисное обслуживание. Температура на входе в турбину 1100°C, степень повышения давления в компрессоре 10...12; КПД ГТУ 33...35% (ПГУ — 52...53%).

Класс F. Разработки первой половины 90-х годов, характеризующие современный серийный технический уровень. Температура на входе в турбину 1250... 1350°C, степень повышения давления в компрессоре 15...17; КПД ГТУ 35...36% (ПГУ — 54...55%).

Класс FA (FB), Газотурбинные установки с КПД 36...38,5 % (ПГУ — 56...58%), спроектированные во второй половине 90-х годов, завоевывающие рынок в настоящее время.

Класс G (H). Передовые образцы сверхмощных ГТУ с КПД 39...40% (ПГУ — 58...60%), температурой перед турбиной 1400...1500°C и степенью повышения давления в компрессоре более 20.

Крупнейшие фирмы мира продолжают выпускать новые модели газовых турбин, постоянно повышая эффективность их работы. Однако пути совершенствования установок, используемые разработчиками, различны.

Так, исследуются и обсуждаются преимущества и недостатки замкнутого парового охлаждения высокотемпературных элементов газовой турбины в сравнении с широко применяемым открытым воздушным охлаждением, при котором воздух, отобранный за соответствующими ступенями компрессора, после системы охлаждения выпускается в проточную часть газовой турбины.

Специалисты General Electric и Westinghouse уже начали использовать пар для охлаждения камеры сгорания и других (как неподвижных, так и вращающихся) деталей своих машин в составе ПГУ. Японская Mitsubishi сообщает о положительном опыте использования пара для охлаждения элементов статора в своих установках класса G и о трудностях его применения во вращающихся частях своих турбин класса H. Благодаря разработанной Mitsubishi системе парового охлаждения инженеры фирмы уже добились температуры перед турбиной 1500°C и разрабатывают программу создания ГТУ на температуру 1700°C [1].

Крупнейшие европейские производители Siemens и Alstom не планируют усложнять свои турбины паровым контуром охлаждения и применяют традиционную воздушную схему, которая обеспечивает более высокую маневренность установок.

Для повышения эффективности разрабатываемых ГТУ фирмы применяют также различные тепловые схемы. Так, специалисты General Electric используют промежуточное охлаждение воздуха в компрессоре, специалисты фирмы Alstom — промежуточный перегрев газов при расширении, а на заводах Siemens продолжается производство установок, работающих по простой схеме.

Например, новая газотурбинная установка MS9001H General Electric [2] мощностью 282 МВт имеет коэффициент полезного действия 39,5%, КПД комбинированного цикла с этой ГТУ достигает 60%. Компрессор обеспечивает степень повышения давления 23 на 18 ступенях. Вместо традиционной трехступенчатой турбины использована схема с четырьмя ступенями, что при возросшей степени расширения газов позволило сохранить высокий внутренний КПД. Главной инновацией машины класса H стало комбинированное паровоздушное охлаждение, применение которого позволяет увеличить массовый расход воздуха через горелочные устройства и тем самым повысить мощность установки, одновременно повышая эффективность охлаждения, поскольку теплоемкость пара выше, чем воздуха. Использование замкнутого парового контура дает возможность увеличить температуру перед турбиной на 111°C (до 1440°C) благодаря отсутствию сбросного охлаждающего воздуха. Запуск турбины проходит при воздушном охлаждении, но уже на переходных режимах для охлаждения лопаток 1-й и 2-й ступеней подключается паровое. Пар забирается из цилиндра высокого давления (ЦВД) паровой турбины ПГУ, проходит контур охлаждения и возвращается в цилиндр среднего давления (ЦСД). Таким образом, паровое охлаждение привязывает газовую турбину к утилизационному циклу [2, 3].

В другой новой модели ГТУ фирмы General Electric LMS100 сочетаются технологии стационарных газовых турбин и авиационных двигателей. Для повышения КПД работы установки в простом цикле до рекордных 45% применена схема с промежуточным охлаждением циклового воздуха, которая позволяет уменьшить работу компрессора на сжатие, а также поддерживать уровень вырабатываемой энергии и в жаркую погоду. Степень повышения давления составила 40. При этом воздух

охлаждается во внешнем охладителе, тем самым появляется возможность подогрева питательной воды для электростанции. ГТУ LMS100 трехвальная с выделенной пятиступенчатой силовой турбиной. Мощность ГТУ составляет 98,3 МВт. Проведенные испытания показали исключительные маневренные качества новой турбины: 50% мощности установка набирает менее чем за 1 мин, а на номинальный режим выходит спустя 10 мин. Однако высокая степень сжатия в компрессоре ограничила температуру на выходе из ГТУ до 417°C, что несколько снизило эффективность использования LMS100 в составе ПГУ (КПД 54 %).

Специалисты Siemens в своей новой турбине SGT5-8000H отдали предпочтение более простой схеме воздушного охлаждения (что стало возможным благодаря применению материалов и покрытий нового поколения), обеспечивающей более высокую маневренность. SGT5-8000H, обладающая передовыми значениями заявленных КПД (простого цикла 39% и более 60% в составе ПГУ), выигрывает во времени пуска и скорости изменения нагрузки по сравнению с другими машинами класса H General Electric и Mitsubishi, в которых для охлаждения используется пар. Турбина SGT5-8000H в настоящее время — самая большая газовая турбина в мире. Ее мощность составляет 340 МВт, длина более 13 м, а масса 444 т.

В самой мощной турбине международного консорциума Alstom GT-26 используется оригинальная тепловая схема с промежуточным перегревом газа при расширении — технология ACS. Воздух сжимается в 22-ступенчатом компрессоре до давления 3,34 МПа и поступает в основную камеру сгорания, в которой сжигается 2/3 топлива. Затем продукты сгорания с температурой 1213°C расширяются в одноступенчатой турбине высокого давления и поступают в дополнительную камеру сгорания, куда подводится оставшаяся 1/3 топлива. После этого газы расширяются в четырехступенчатой турбине низкого давления. Обе камеры сгорания кольцевые, обеспечивающие концентрации NOx в выхлопных газах менее 25 ppm (в дополнительной камере сгорания выбросов NOx практически нет). Сопловые и монокристаллические рабочие лопатки наиболее горячих ступеней турбин защищены фирменным покрытием SV20 (Ni, Cr, Al, Y) и охлаждаются воздухом. Мощность установки GT-26 составляет около 289 МВт, КПД — 39,1%. Располагаемая температура газа за турбиной 615°C позволяет достичь КПД ПГУ 58,5 % [3, 4].

Таким образом, анализ особенностей конструкции и тепловых схем последних моделей ГТУ ведущих фирм мира показывает, что за счет различных технических решений можно обеспечить экономичную, надежную и экологически безопасную работу высокотемпературных газотурбинных установок. При этом КПД одноцелевых ГТУ вплотную приближается к значению этого показателя для традиционных паротурбинных установок, а КПД комбинированных бинарных парогазовых установок превышает эту величину в 1,5 раза.

Литература

1. Лебедев А.С., Костенников С.В. Тенденции повышения эффективности ГТУ // Теплоэнергетика. – 2008. - № 6. – С. 11 – 18.
2. Smith D. H system steams on // Modern power systems. 2005, February. P. 17—20.
3. Цанев СВ., Буров В.Д., Ремезов А.Н. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций. М.: Издательство МЭИ 2002.
4. Ольховский Г.Г. Энергетические ГТУ за рубежом // Теплоэнергетика. - 2004. - № 11. - С. 71—76.