

Радиальные газовые и паровые турбины

А. Г. Соболев – ООО «Таурис Энерджи»

Основная тенденция развития газовых турбин малой мощности – снижение стоимости жизненного цикла за счет повышения экономичности и уменьшения количества деталей и узлов (прежде всего лопаточных ступеней). Таким требованиям полностью удовлетворяют радиальные ГТУ, которые заняли прочную нишу на рынке многоагрегатных электростанций мощностью до 10...12 МВт.

In brief

Radial gas and steam turbines.

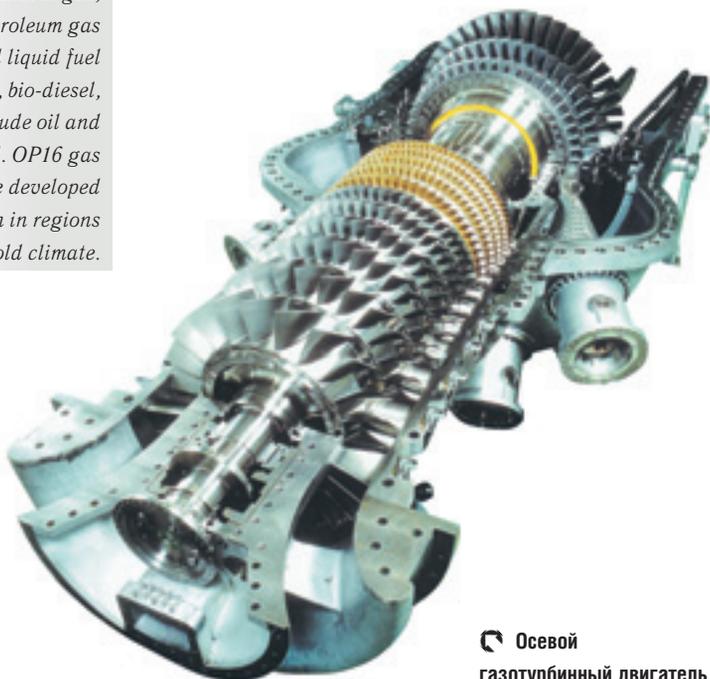
The main trend in the development of small gas turbines is abatement life cycle cost by means of economical operation and reduction of parts and units number (particularly, blade stages). Radial gas turbines are completely adequate for these requirements. They are in demand in the segment of multi-units power stations rated at 10...12 MW.

The most powerful radial gas turbines are produced by OPRA Turbines and Dresser-Rand. OPRA OP16-3 gas turbine has electric output of 1.85 MW (ISO) and electrical efficiency of 26 %. It can operate on natural gas, associated petroleum gas and biogas, and liquid fuel such as diesel, bio-diesel, ethanol, crude oil and pyrolysis oil. OP16 gas turbines are developed for the operation in regions with cold climate.

Осевые и радиальные турбины

При проектировании новых или модернизации существующих моделей газовых турбин используются определенные концептуальные подходы. Основными среди них являются:

- снижение стоимости за счет применения освоенных параметров цикла, технологий и материалов. Простота конструкции, радикальное сокращение количества ступеней лопаточных машин, переход на одновальный, с высокой степенью сжатия газогенератор – все это снижает стоимость ГТД и его жизненного цикла;
- низкие эксплуатационные расходы за счет снижения расхода топлива (высокий КПД) и масла (малое число подшипниковых опор, перенос их в относительно холодную часть);
- низкие расходы на обслуживание, обусловленные простотой конструкции, малым количеством деталей, их высокой долговечностью и эксплуатационной технологичностью двигателя в целом.



Осевой газотурбинный двигатель

Современные энергетические газотурбинные установки можно разделить на две большие группы: конверсионные (на базе авиационных и судовых ГТД) и промышленные. Первые – это более легкие установки, отличающиеся более точным управлением, меньшими требованиями к вспомогательной инфраструктуре, но также и меньшим ресурсом.

ГТУ второй группы значительно более тяжелые, как правило, это одновальные установки. Они имеют тяжелый жесткий вал, лопатки постоянного профиля на основном протяжении проточной части, что обеспечивает их надежность, а также снижение стоимости и эксплуатационных затрат. Основным охладителем рабочих и сопловых лопаток турбины является воздух внешней системы. Такие ГТУ предъявляют более высокие требования к строительным работам и инфраструктуре, но при этом имеют более продолжительный срок службы.

Преобладающее большинство установок обеих групп имеют осевую конструкцию. Основными мировыми поставщиками осевых энергетических ГТУ в диапазоне мощности до 6 МВт являются компании Siemens, Solar, Rolls-Royce, Pratt & Whitney, Kawasaki. Среди отечественных производителей ведущие позиции занимают фирмы, разрабатывающие и изготавливающие авиационные газотурбинные двигатели, например ОАО «Авиадвигатель» и Пермский моторный завод.

Для достижения необходимой степени сжатия воздуха перед камерой сгорания (10 π_k и выше) осевые установки имеют большое количество ступеней компрессора (более десяти). У турбины – две (и более) ступени, оснащенные лопатками сложной охлаждаемой конструкции. Воздух для охлаждения лопаток должен иметь необходимую температуру и чистоту, так как засорение охлаждающих каналов приводит к снижению производительности и ресурса осевых турбин. Соответственно, требуется дополнительная система подготовки воздуха. Осевая конструк-

ция предполагает большие осевые размеры ротора, поэтому половина опор ротора находится в горячей части двигателя, что увеличивает количество уплотнений и приводит к увеличению невозвратных потерь смазывающего масла (угар), а также вынуждает использовать дорогостоящие синтетические масла.

Кроме осевых, существует класс радиальных турбин, в которых газовый поток движется перпендикулярно оси. Увеличение мощности таких турбин ограничивается их радиальными размерами, поэтому мощность существующих турбин данного типа не превышает 2 МВт.

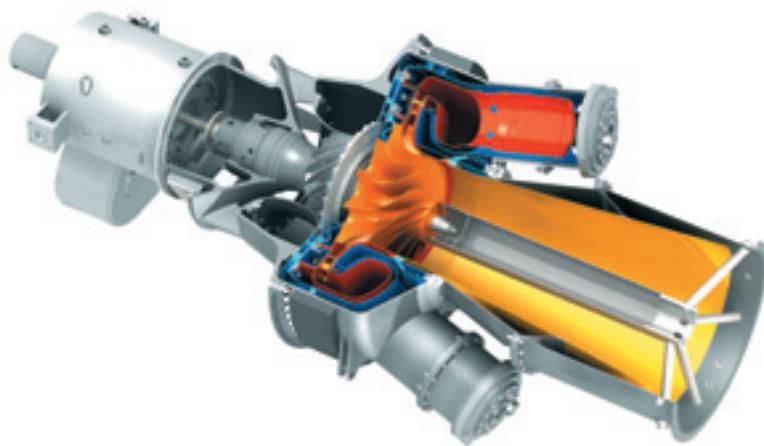
Радиальные турбины имеют одноступенчатый центробежный компрессор и одноступенчатую центростремительную турбину. Поскольку степень повышения давления в них относительно невысокая (до 7 π_k), снижается потребность в повышении давления подачи газообразного топлива. Рабочее колесо и сопловой аппарат радиальной турбины – неохлаждаемые, в связи с этим требования к цикловому воздуху и топливу не такие жесткие, как для осевых турбин.

Поскольку двигатели радиального типа имеет небольшие осевые размеры, в них применяется консольное крепление ротора с опорами в холодной части двигателя, что значительно увеличивает срок эксплуатации подшипников и сводит расход масла на угар практически до нуля. Радиально направленное движение рабочего тела позволяет применять камеру сгорания с вынесенными жаровыми трубами. Это повышает степень ремонтпригодности двигателя, а также делает его конструкцию более доступной для применения рекуперативной схемы.

В отличие от осевых ГТУ, предложение на рынке радиальных установок достаточно ограничено. В первую очередь, это связано с малым количеством конструкторских школ, развивающих данное направление. Одна из них – это норвежская школа.

История создания радиальных турбин

В 1964 г. в Главном норвежском промышленном конгломерате был спроектирован и поставлен на рынок первый в мире радиальный газотурбинный двигатель промышленного применения. Основателем и руководителем данного направления был Ян Мовил, продолжающий до настоящего времени совершенствовать свои разработки. В 1991 г. он основал новую компанию – OPRA Turbines, и в 2003 г. была выведена на рынок современная газовая турбина OP16, обладающая уникальными техническими и эксплуатационными характеристиками.



Радиальная газовая турбина OP16-3A

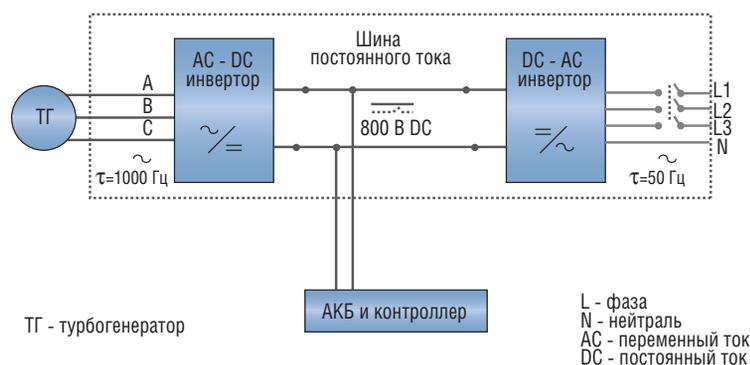
В свою очередь, на норвежском заводе компании Kongsberg было выпущено более 900 радиальных двигателей KG2. Сегодня Kongsberg является частью американской компании Dresser-Rand. Все установки норвежской школы являются полнорadiальными, одновальными, с планетарным редуктором и синхронным генератором, выполненные в соответствии с промышленными стандартами.

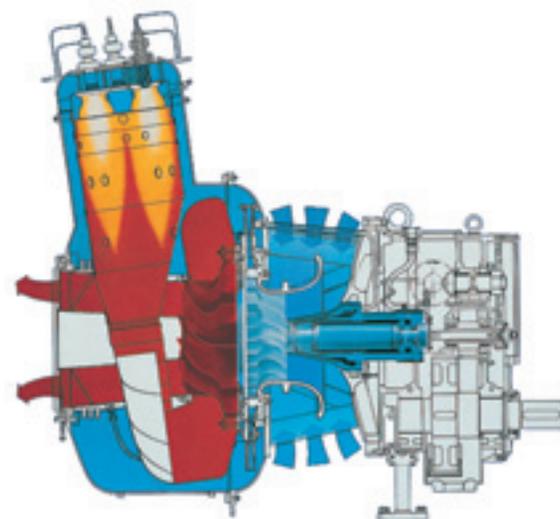
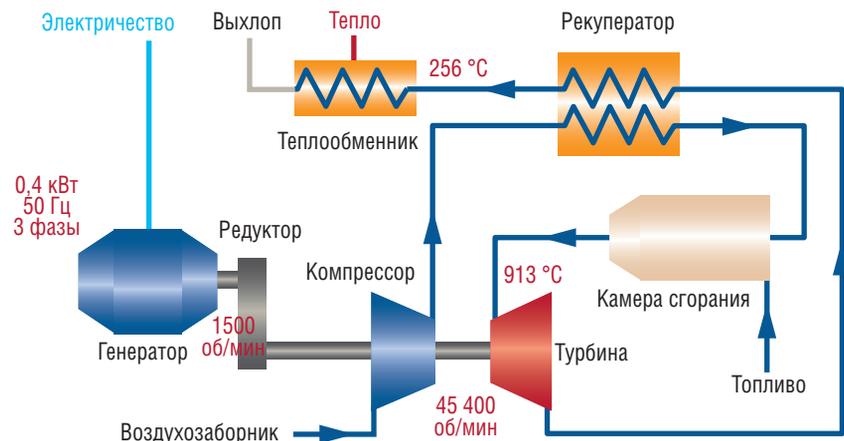
Менее мощные газовые турбины MT250, MT333 изготавливаются на заводе фирмы FlexEnergy (США), который до 2011 г. принадлежал компании Ingersoll-Rand (длительное время владевшей Dresser-Rand). Турбина MT250 имеет схожие с KG2 основные конструктивные решения – отличия лишь в мощности, размерах, наличии в MT250 рекуператора, обеспечивающего электрический КПД более 30 %.

Радиальные турбины малой мощности – микротурбины

Другое направление развития радиальных турбин малой мощности – это микротурбины. Их основой является высокооборотный радиальный газотурбинный двигатель, собранный на одном валу с генератором высокой частоты. В преобладающем большинстве микротурбины имеют легкий ротор на «сухих» опорах. Электроэнергия вырабатывается по следующей схеме: первичная выработка тока высокой

Электросиловая схема установки С200





➤ **Схема цикла установки MT250**

➤ **Радиальная газовая турбина KG2-3E**

переменной частоты (до 1600 Гц), затем его преобразование в постоянный ток и далее – в переменный ток частотой 50 (60) Гц.

Разработка микротурбин такой конструкции началась в 1990 году. (Однако компания Honeywell, например, разработала турбокомпрессор с ротором на компактных воздушных подшипниках более 30 лет назад). Прочно обосновались на российском рынке микротурбины, производимые компанией Capstone, мощностью 30 кВт (С30) и 65 кВт (С65). Они имеют высокооборотный легкий ротор на «сухих» опорах с подшипниками лепесткового типа. Для повышения электрического КПД двигатели Capstone оснащены рекуператорами типа Primary Surface (первичной поверхности).

В настоящее время ожидается подтверждение заявленных эксплуатационных характеристик для более мощных установок – 200 кВт (С200), с более тяжелым ротором. В них применяются те же конструкторские решения, что и на малых машинах С30 и С65. Установками С200 комплектуются агрегаты С600, С800, С1000.

В этом диапазоне мощности для российского рынка также поставляются радиальные установки MT250 (250 кВт по ISO) компании FlexEnergy. Они серийно изготавливаются с 2004 г. и хорошо зарекомендовали себя при работе на разнообразных видах газового топлива в различных климатических широтах. Конструкция установок FlexEnergy выполнена по классической схеме, с высоконадежным планетарным редуктором и синхронным генератором 0,4 кВт.

Опоры двигателя с подшипниками качения расположены в холодной части двигателя. В сравнении с «сухими» подшипниками, к ним предъявляются менее жесткие требования к защите от пыли. Объединенная система смазки предусматривает замену жидкости один раз в год. Двигатель MT250 оснащен рекуператором пластинчатого типа (Plate-Fin), который эффективнее рекуператора типа Primary Surface. Конструкцией MT250 сразу предусмотрена установка внутри корпуса штатного водогрейного теплообменника (до 0,3 Гкал/ч), а также дожимного компрессора для природного газа. (Характеристики микротурбин в табл. 1).

Табл. 1. **Характеристики микротурбинных установок (ISO)**

Параметр	С30	С65	С200	MT250	MT333
Электрическая мощность, кВт	30	65	200	250	333
Частота вращения ротора двигателя, об/мин	96000	96000	60000	45000	45000
Характеристика опор вала ротора	Воздушные подшипники лепесткового типа, безмасляные			Подшипники качения в холодной части двигателя. Объединенная система смазки «двигатель-редуктор»	
Характеристика схемы электрогенерации	Высокочастотный генератор на валу двигателя – инвертирование в постоянный ток – инвертирование в переменный ток 50 Гц			Планетарный редуктор (45000/1500 об/мин) – синхронный генератор 50 Гц	
КПД двигателя электрический	26-2 %	29-2%	33-2 %	30±2 %	32±2 %
Давление газового топлива на входе в двигатель, МПа	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6
Температура газа на выходе, °C	275	309	280	256	267
Расход рабочего тела на выходе, кг/с	0,31	0,49	1,3	2,13	2,41
Начало выпуска, год	1995	1995	2007	2004	2013

Радиальные турбины компаний OPRA и Dresser-Rand

Более мощные радиальные турбины сегодня производят компании OPRA Turbines (Нидерланды) и Dresser-Rand. Установка OP16-3 производства OPRA Turbines имеет электрическую мощность 1,85 МВт (по ISO), электрический КПД – 26 %. Она может работать как на газообразных видах топлива (природный газ, попутный нефтяной газ, биогаз, синтез-газ), так и на жидких (дизельное, биодизель, этанол, пиролизное масло, нефть). Степень повышения давления компрессора – 6,7. Установка имеет четыре камеры сгорания.

Энергоблоки OPRA специально разработаны для районов с холодным климатом (до –60 °С). За последние 8 лет было поставлено более 80 установок OP16-3 (более 50 из них в Россию), которые наработали свыше 1,5 млн часов.

Компания Dresser-Rand производит надежную радиальную газовую турбину KG2-3E электрической мощностью 1,8 МВт, электрический КПД – 16 %. Двигатель имеет одну жаровую трубу, степень повышения давления в компрессоре – 4,5. Следующее поколение двигателя KG2-3G обладает более высоким электрическим КПД (26 %) и малыми выбросами NO_x и CO. Степень повышения давления в компрессоре – 7, количество жаровых труб увеличено до 4 штук. В настоящее время две такие установки проходят стадию опытной эксплуатации. Лидерный образец KG2-3G был поставлен в 2012 г. для немецкой компании Wingas Transport GmbH.

Радиальные газовые турбины, обладающие минимальным количеством ступеней и, соответственно, ответственных деталей и узлов, являются компактными, с высокой степенью надежности. Они имеют низкую стоимость монтажа и технического обслуживания, межремонтный интервал составляет 8000 часов, ресурс до капремонта – 40 000 часов. Характеристики ГТУ даны в табл. 2.

Радиальная паровая турбина

Техническое решение с радиальным движением потока рабочего тела нашло применение при разработке и производстве паровой турбины S2E50-250 (Technora GmbH, Австрия). Оригинальная концепция турбины запатентованной конструкции основана на замене турбинных лопаток системой щетинок. Материал щетинок, их сечение, форма и плотность определяются с большой точностью, являясь результатом долгих исследований и испытаний при различных технических условиях.

Множественная тангенциальная подача рабочей среды на щетинки турбины оптимизи-

Табл. 2. Характеристики газотурбинных энергоустановок (ISO)

Параметр	OP16-3A	KG2-3E	KG2-3G
Мощность на валу двигателя, кВт	1900	1934	2000
Частота вращения ротора, об/мин	26000	18800	25500
Частота вращения выходного вала, об/мин	1500	1500	1500
Тип редуктора	планетарный	планетарный	планетарный
Расход топлива, кДж/кВт·ч	13680	21481	14118
КПД двигателя (механический на валу)	26,3 %	16,7 %	25,5 %
Степень повышения давления компрессора (π _к)	6,7	4,5	7,0
Давление газового топлива на входе в двигатель, МПа	1,2	0,8	1,2
Температура газа на выходе, °С	574	549	583
Расход рабочего тела на выходе, кг/с	8,7	15,0	9,5
Начало выпуска, г.	2004	2008	2012

руется системой форсунок, обеспечивающей превращение кинетической энергии рабочей среды в усилие с коэффициентом полезного действия 95 %. Измерения показывают, что аэродинамическое преобразование кинетической энергии происходит с минимальными потерями на трение и завихрение рабочей среды. Кинетическая энергия рабочей среды поглощается на входе в контур турбины таким образом, что, например, при скорости пара на выходе из форсунок 800 м/с его энергия полностью абсорбируется на 80 мм длины окружности рабочего колеса турбины.

Выход рабочей среды происходит по архимедовой спирали от центра паровой турбины. Удаление конденсата осуществляется отдельным вспомогательным контуром в нижней части турбины.

Рабочее колесо турбины установлено в системе высококачественных подшипников, изготавливаемых известными производителями. Подшипники имеют собственную систему смазки и охлаждения, которая является неотъемлемой частью каждой установки. Особое внимание уделено балансировке

 Газотурбинная установка OP16-3 в защитном кожухе





↻ Паротурбинная установка S2E

рабочего колеса турбины. И хотя при проведении испытаний и эксплуатации отдельных установок не было зарегистрировано вибраций, превышающих заявленные параметры, каждый блок паровой турбины S2E50-250 комплектуется датчиком вибраций с оперативным выводом информации на дисплей установки.

Рабочие колеса турбин традиционной конструкции очень чувствительны к точности изготовления и соблюдению технологического процесса. Они могут использоваться только в пределах ограниченных технических и эксплуатационных условий (часто только в зоне сухого пара), на высоких оборотах, требуют сложных систем обслуживания и эксплуатации и т.д.

Использование системы щетинок вместо лопаток открывает перед оператором новые возможности регулирования работы турбины:

- в дополнение к стандартным характеристикам, ПТУ может работать в режиме насыщенного (влажного) пара;
- может эксплуатироваться при частых и быстрых изменениях рабочих параметров;
- возможно регулирование работы от нуля до максимума при неизменном КПД;
- работа при низкой рабочей частоте вращения (3000 об/мин);
- время разгона из «холодного» состояния до максимума — до 10 минут;
- ПТУ можно эксплуатировать в горизонтальном и вертикальном положении.

Современные ГТУ на базе радиальных и паровых турбин мощностью до 2 МВт могут использоваться в самых сложных условиях эксплуатации. А заказчики могут быть уверены в длительной и надежной работе оборудования. **Д**

Мощность электростанции собственных нужд на Ханчейском месторождении будет увеличена.

Компания «Таурус Энерджи» поставила на Ханчейское месторождение (ООО «Новатэк-Таркосаленнефтегаз») оборудование фирмы OPRA Turbines B.V. В состав электростанции входят два агрегата OPRA мощностью по 2 МВт, работающие в простом цикле. В качестве топлива будет использоваться попутный газ газоконденсатного месторождения.

Энергоблок создан на базе однофазного газотурбинного двигателя OP16-3A с одноступенчатым центробежным компрессором (степень повышения давления 6,7), одноступенчатой радиальной турбиной и встроенным планетарным редуктором. Оба подшипника ротора турбокомпрессора расположены в холодной части двигателя, что обеспечивает долговечность опорных узлов и масляной системы за счет отсутствия угара масла. В составе ГТУ применяется генератор Leroy-Somer с напряжением 6,3 кВ.

Энергоустановки будут размещены в здании и синхронизированы с двумя ранее поставленными энергоблоками OPRA и газопоршневыми установками.

Строительство газотурбинной электростанции осуществляет консорциум пермских предприятий: ЗАО «Энергосервис» — ЕРС-подрядчик; ООО «Турбоэнергия и Сервис» — головная пусконаладочная организация; ООО «Таурус Энерджи» — поставщик основного генерирующего оборудования.

The output of power station on the site of Khancheykoye oil field will be increased.

Taurus Energy supplied two OP16-3A gas turbine plants (OPRA Turbines B.V.) to the site of Khancheykoye oil field under the contract with Novatek-Tarkosalneftegas Ltd. The station will operate in simple cycle. Main fuel is associated petroleum gas from gas condensate field. The construction of the station is carried out by consortium including Energoservice JSC and Turboenergia and Service Ltd. General contractor for the project is Energoservice JSC.

