

ОПЫТ СОЗДАНИЯ И РАЗВИТИЯ СТАЦИОНАРНЫХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК

Акимов Н.К.

ОАО “Турбомоторный завод”, г. Екатеринбург

Уральской школе стационарного газотурбостроения исполняется 40 лет. Первый Главный конструктор Турбомоторного завода Михаил Михайлович Ковалевский, являясь талантливым инженером, дальновидно определил основные направления конструирования отечественных стационарных газовых турбин, на которые базируется и современное развитие высокотемпературных газотурбинных установок.

За прошедшие годы было создано три поколения газотурбинных установок с начальной температурой газа (температурой перед турбиной) 760°C 920°C - 1080°C . И каждый бросок в 160 градусов был бы невозможен без решения целого комплекса научно-исследовательских, конструкторских, технологических и производственных задач.

При создании и развитии ГТУ для газоперекачивающих агрегатов решалась задача повышения единичной мощности с 6 МВт до 25 МВт и увеличения КПД с 24% до 32% при одновременном существенном снижении массогабаритных показателей и при сохранении ресурса и надежности установок. Сравнительные характеристики установок приведены в табл. 1.

Основными принципами, осуществленными уже при создании первой газотурбинной установки, были: высокая экономичность при простой тепловой схеме, надежность и выносливость при большом ресурсе (до 100 тыс. часов), относительно простая конструктивная схема, сравнительно малые массогабаритные показатели. Для первой и последующих стационарных ГТУ характерны следующие конструктивные решения:

— прямоточная конструкция с размещением турбин, компрессора и встроенных камер сгорания в едином корпусе;

— отсутствие горячих трубопроводов большого диаметра с высоким внутренним давлением;

— двухпорные роторы, обладающие высокой виброустойчивостью;

— системы охлаждения роторов, исключаящие в течение 100 тыс. часов серьезные поломки и разрушения, позволяющие изготавливать диски турбины из сталей перлитного класса;

Наименование параметра	Тип ГТУ		
	ГТН-6-750	ГТН-16	ГТН-25-1
Мощность, МВт	6,3	16,0	25,0
КПД, %	24,5	29,0	32,0
Начальная температура, К (°С)	1033 (760)	1193 (920)	1353 (1080)
Степень повышения давления	6,0	11,5	13,0
Массовый расход, кг/с	45,5	89,0	103,0
Удельная масса, в % к массе ГТ-6-750	100	51,0	34,1

— малые вибрационные напряжения в лопаточных аппаратах компрессора и турбины, позволяющие обходиться без бандажных связей.

Перечисленные конструктивные решения стали общими для современных стационарных газовых турбин мировых фирм.

В конце 70-х было разработано **второе** поколение приводных ГТУ мощностью 16 МВт с начальной температурой газа 920° С и со степенью повышения давления в однокаскадном трансзвуковом компрессоре, равной 11,5. При выборе температуры учитывался достигнутый уровень жаропрочности и коррозионной стойкости сплавов для обеспечения ресурса не менее 25 тыс. часов в неохлаждаемой конструкции 1-й рабочей лопатки турбины.

Имея в виду необходимость обеспечения надежной эксплуатации турбин при более высоких температурах газа, автор и его коллеги уже в те годы предприняли поиск конструкций эффективных устройств охлаждения лопаток, рабочих колес и роторов турбин. Описания соответствующих изобретений приведены, в частности, в [1-3].

В **третьем** поколении ГТУ (рис. 1) мощностью 25 МВт (конец 80-х годов) температура газов была увеличена до 1080° С, а степень повышения давления до 13. При сохранении общих принципов конструирования получили развитие детали, узлы и системы, обеспечивающие работу при более высоких параметрах цикла:

— конструкция камеры сгорания и горячей части турбины выполнены термоэластичными (каждый элемент конструкции имеет свободу расширения в процессе прогрева и остывания турбины);

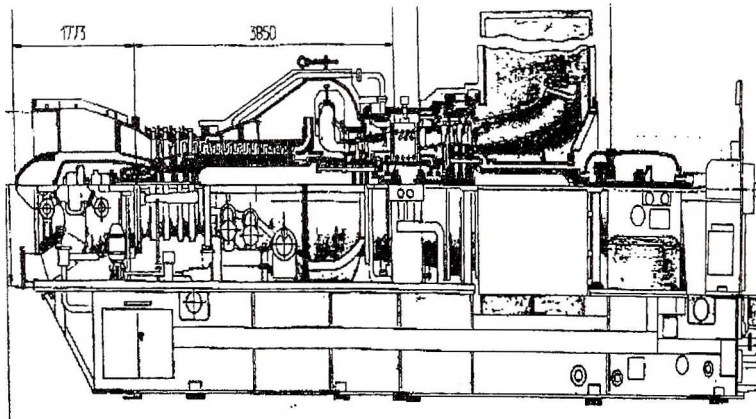


Рис. 1. ГТУ третьего поколения мощностью 25 МВт

- охлаждаемые сопловые лопатки 1-й ступени выполнены одиночными (а не сегментами из 2-3 лопаток), а охлаждаемая рабочая лопатка - в монокристаллическом исполнении;

- компрессор имеет 4 ряда поворотных направляющих аппаратов, управляемых на пуске и частичных режимах;

- роторы компрессора и турбин выполнены сборными со стяжными болтами и "хиртовыми" соединениями;

- для снижения статических и динамических нагрузок рабочие лопатки первых ступеней компрессора выполнены из титановых сплавов;

- конструкция ГТУ и отдельных ее узлов обеспечивает высокую ремонтопригодность в условиях эксплуатации.

Чтобы обеспечить надежную работу системы подвода охлаждающего турбину воздуха, предложено, запатентовано и внедрено новое устройство [4], которое одновременно позволяет экономно расходовать воздух.

При создании ГТУ третьего поколения специалисты завода в творческом содружестве с институтами: НПО "Машпроект", ЦКТИ, ВТИ, ЦНИИТМАШ, ЗМИ, разработали и внедрили конструкции деталей и узлов, обеспечивающих надежную работу с минимальным ресурсом горячей части турбины в 25 тыс. час. и с общим ресурсом установки 100 тыс. часов. Решению этих задач в большой степени способствовало обращение к опыту предприятий авиационного двигателестроения: СНТК им. Н.Д.Кузнецова, НПО "А. Льюлка-Сатурн", МНПО "Салют". О рациональном использовании при создании стационарных ГТУ достижений авиационного двигателестроения свидетельствует и опыт германской фирмы Siemens [5].

В области применения материалов завод проводит рациональную политику, направленную не только на обеспечение большого ресурса, но и на снижение стоимости ГТУ. Поэтому для деталей и узлов, работающих при температурах ниже 500°C , применяются традиционные стали, свойства которых также проверены длительной эксплуатацией в течение 150-250 тыс. час. в паровых турбинах, созданных Турбомоторным заводом. Для деталей горячего тракта (в первую очередь, для лопаток) институтами (ЦНИИТМАШ, ЗМИ, ЦКТИ) в содружестве с заводом созданы специальные жаропрочные и коррозионно-стойкие сплавы на никелевой основе - ЦНК-7, ЦНК-8М, ЗМИ-3, ЗМИ-3У, которые прошли длительную проверку не только в лабораторных условиях, но и на заводских натуральных экспериментальных стендах, а также в условиях многолетней эксплуатации на компрессорных станциях.

В настоящее время созданные сплавы для лопаток стационарных ГТУ по комплексу свойств не уступают зарубежным аналогам.

В 1990-1991 г.г. заводом в содружестве с НПО "А. Люлька-Сатурн" и с ЦНИИТМАШ впервые была разработана и внедрена конструкция и технология получения крупногабаритных охлаждаемых рабочих лопаток с высотой профильной части пера - 100 мм, хордой - 60 мм и с массой 1 кг в монокристалльном исполнении. За счет использования оправдавшей себя на практике передовой авиационной технологии был достигнут коэффициент выхода годных монокристалльных отливок рабочих охлаждаемых лопаток более 0,65.

Обеспечение коррозионной стойкости лопаток и других деталей горячей части достигалось рациональным сочетанием применения сплавов и защитных покрытий. Были проведены исследования и в натуральных условиях испытаны различные покрытия: термодиффузионные, электроннолучевые и плазменные.

Для деталей горячей части турбин с начальной температурой газов до 1080°C серийно освоены термодиффузионные покрытия типа алитирования с добавлением редкоземельных элементов.

Для защиты от высокотемпературной газовой коррозии сопловых и рабочих лопаток из никелевых сплавов разработано и успешно применяется алюмосилицидное покрытие. Такое покрытие обеспечивает ресурс в 30 тыс. час. коррозионной стойкости при минимальной стоимости.

В настоящее время завод работает над созданием четвертого поколения газотурбинных установок. Завершастся разработка унифицированного ряда энергетических газовых турбин мощностью от 30 МВт до 50 МВт с начальной температурой газов от 1343 К (1070°C) до 1500 К (1227°C). Начато изготовление первой установки этого ряда - ГТЭ-25У для ГТУ-ТЭЦ в г. Электросталь ОАО "Мосэнерго" В ГТЭ-

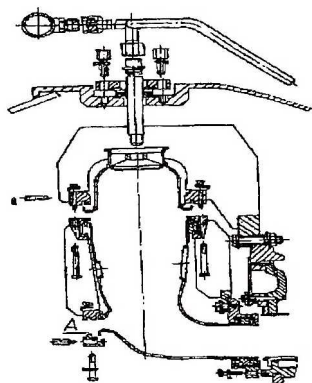


Рис. 2. Схема камеры сгорания ГТУ

25У одновальная газовая турбина с двухпорным ротором соединена с электрогенератором через понижающий редуктор. Для энергетических установок средней мощности (до 70 МВт) такой подход стал общим в мировом стационарном газотурбостроении, т.к. позволяет существенно сократить число ступеней в турбомашине, массу собственно ГТУ при достижении высоких КПД и маневренности. В конечном итоге это определяет конкурентоспособность и цену газотурбинной установки. ГТЭ-25У присущи решения, характерные для лучших стационарных ГТУ:

- дисковый ротор со стяжками и "хиртовыми" соединениями;
- двухпорный ротор с подшипниками скольжения по концам;
- осевой выхлопной диффузор;
- генератор, расположенный со стороны осевого компрессора;
- встроенная в корпус секционно-кольцевая камера сгорания.

Основные компоненты мощного типового ряда - компрессор, камера сгорания и собственно турбина - формируют компактную и удобную с точки зрения эксплуатации и технического обслуживания конструкцию. Однокаскадный осевой компрессор со степенно повышения давления 13,5 имеет 16 ступеней, из которых первые 4 ряда направляющих лопаток - поворотные. Проточная часть компрессора сформирована на основе моделирования хорошо изученного и проверенного в эксплуатации компрессора установки ГТН-16 в оптимальной точке с добавлением одной ступени сзади. При профилировании рабочих лопаток компрессора уточнены вибрационные характеристики с целью повышения вибрационной надежности.

Осевой компрессор имеет резервы для повышения как степени сжатия до 17, так и увеличения КПД с 85% до 87%, что потребует для повышения единичной мощности до 50 МВт и КПД ГТУ до 36%.

Камера сгорания (рис. 2) представляет собой секционную систему из 14 радиально расположенных пламенных труб, объединенную на выходе осердиальным единым газосборником, жестко закрепленным на обойме турбины. Камера сгорания сконструирована по принципу предварительного приготовления топливо-воздушной смеси и обеспечения эмиссии NOx не более 25

прт. Конструкция горячей части камеры состоит из отдельных элементов, обладающих свободой температурных расширений и эффективно охлаждаемых для обеспечения длительного ресурса (более 25 тыс. час.). Разработка и исследование камер сгорания, которые проводились совместно с Всероссийским теплотехническим институтом, показывает достижимость исходных технических требований по экологии и надежности.

Собственно турбина - четырехступенчатая, с развитой системой охлаждения имеет три охлаждаемых венца (сопловые лопатки 1 и 2 ступени и рабочая лопатка 1 ступени). При проектировании турбин использован опыт НПО "А. Льюлька-Сатурн", а при изготовлении лопаток турбин - технология и оборудование МНПО "Салют". При этом охлаждаемая рабочая лопатка выполняется в монокристалльном исполнении из сплава ЦНК-8М с "вихревой" матрицей.

Газотурбинная установка ГТЭ-25У содержит много традиционных для предприятия технических решений. При проектировании ГТУ четвертого поколения основное внимание было уделено оптимизации профилирования и конструирования лопаток компрессора и турбин по следующим направлениям:

- аэродинамическое совершенство;
- вибрационная и статическая прочность;
- минимизация массы при сохранении большого ресурса (более 25000 час. для турбинных лопаток и 50000 час. для компрессорных);
- сокращение затрат на изготовление оснастки и инструмента, достигаемое профилированием групп ступеней;
- внедрение современных технологий и оборудования для уменьшения затрат на изготовление.

Успешное решение перечисленных задач во многом определяется не только высокой квалификацией сотрудников завода, но и увлеченным использованием ими уже имеющейся быстродействующей вычислительной техники. Поскольку потребность в ней и в программных средствах еще велика, разработан и реализуется проект более полной взаимосвязанной информатизации всех подразделений завода. Это должно привести не только к существенному сокращению времени решения инженерных задач, но и к повышению уровня их достоверности, в том числе, благодаря возможности оперативно учитывать прежние ошибки и успехи.

Действительно, результаты богатейшего опыта, накопленного конструкторами и технологами Турбомоторного завода, хранятся, в основном, в чертежах и других итоговых документах на созданные установки. Что касается *процессов поиска и коррекций* проектных решений, то сведения о них хранятся в памяти специалистов и передаются новому поколению инженеров пока лишь путем прямого

общения. Поэтому в проекте информатизации предусмотрено оснащение заводских компьютеров базами знаний и экспертными системами.

Большое внимание уделяется также развитию и совершенствованию систем автоматизированного проектирования, включающих структурно-параметрическую оптимизацию основных компонентов ГТУ. Такие САПР создаются в содружестве с Самарским государственным аэрокосмическим университетом. С помощью одной из них - САПР рабочих лопаток турбин - уже выявлены весьма значительные резервы снижения масс колес некоторых ступеней ГТН-25-1 и ГТЭ-25У при сохранении требований прочности.

На предприятии разработан и реализуется проект информационной системы, объединяющей все стадии создания новых турбомашин: маркетинг - конструирование - технология - подготовка производства - ценообразование - изготовление - эксплуатация.

Вывод. Приведенные выше, а также ранее опубликованные материалы (см., например, [6]) показывают, что ОАО "Турбомоторный завод" обладает научно-техническим и производственным потенциалом для создания и изготовления конкурентоспособных высокоэффективных стационарных газотурбинных установок в мощностном ряду от 6 МВт до 50 МВт.

Список литературы

1. Охлаждаемая рабочая лопатка турбомашин/Акимов Н.К., Горшков В.Н., Гродский Г.О. и др. А.с. N 930989 от 21 января 1982 г. Государственный комитет СССР по делам изобретений и открытий.
2. Охлаждаемое рабочее колесо газовой турбины./ Авербух В.Е., Акимов Н.К., Бакуменко И.К. и др. А.с. N 1126025 от 1 июня 1982 г. Государственный комитет СССР по делам изобретений и открытий.
3. Охлаждаемый ротор турбомашин./ Акимов Н.К. А.с. N 1132613 от 29 октября 1982 г. Госкомитет СССР по делам изобретений и открытий.
4. Устройство для отбора и подвода охлаждающего воздуха к ротору газовой турбины./ Акимов Н.К., Проскураков Г.В. Патент N 1251621 на изобретение N 1251621 от 20 августа 1993 г. Комитет РФ по патентам и товарным знакам.
5. Беккер Б., Финк Г. Газовые турбины типового ряда 3А сочетают испытанные на практике и новые технологии KWU с "ноу-хау" авиационных двигателей / Simens Power Journal. Специальное издание. 1996. С. 5-9.
6. Акимов Н.К., Проскураков Г.В. Новые газоперекачивающие агрегаты мощностью 16 и 25 МВт./ "Тяжелое машиностроение", 1996. N 6. С.7-11.