

# Сравнительные характеристики газотурбинных и поршневых мини-электростанций

(или почему министерство СССР «СовМинЭнергетики» в прошлом, а ОАО «Газпром» в нынешнем устанавливают Мини ТЭС преимущественно на базе ГТУ).

Рассмотрим различные типы приводов электрогенераторов, используемые в качестве основы для Мини ТЭС, их достоинства и недостатки.

## Газовые турбины

Благодаря повсеместному переходу в 90-е годы на использование природного газа в качестве основного топлива для электроэнергетики, газовые турбины заняли существенный сегмент рынка. Максимальная эффективность оборудования достигается на мощностях от 0,1 МВт и выше.

Принцип работы газовых турбин состоит в следующем: воздух, нагнетаемый в камеру сгорания компрессором, смешивается с топливным газом, формируя топливную смесь, и поджигается. Образующиеся продукты горения с высокой температурой ( $900^{\circ}\text{C}$ - $1200^{\circ}\text{C}$ ), проходя через несколько рядов лопаток, установленных на валу турбины, приводят к вращению турбины. Механическая энергия вала передается через (понижающий) редуктор электрическому генератору. Тепловая энергия выходящих из турбины газов поступает в теплоутилизатор.

Вместо производства электричества, механическая энергия турбины может использоваться для работы насосов, компрессоров и т.п.

Наиболее традиционным видом топлива для газовых турбин является природный газ, хотя это не исключает возможности использования других видов топлива. При этом газовые турбины **не предъявляют повышенные требования к качеству** его подготовки (химическому составу).

Температура исходящих из турбины газов составляет  $550^{\circ}\text{C}$ . Количественное соотношение тепловой энергии к электрической у газовых турбин составляет от **2,5:1**, что позволяет строить когенерационные системы, различающиеся по типу теплоносителя:

- Непосредственное (прямое) использование отходящих горячих газов;
- Производство пара низкого или среднего давления во внешнем котле;
- Производство горячей воды;
- Производство пара высокого давления (турбины комбинированного цикла).

КПД газовой турбины составляет 29% - 45%, в зависимости от параметров работы конкретной модели турбины и характеристик топлива. В составе когенерационных систем эффективность возрастает до 90% в расчете на условную единицу израсходованного топлива (по теплотворной способности). Газовые турбины обладают хорошими экологическими параметрами (эмиссия  $\text{NO}_x$  на уровне 25 ppm).

## Варианты применения газотурбинных электростанций

### 1. Парогазовый цикл.

При отсутствии тепловой нагрузки газотурбинные блоки комплектуются паровыми котлами утилизаторами и паровым турбогенератором. Что позволяет дополнительно получать около 50% электрической энергии. Что существенно повышает электрический КПД станции.

### 2. Когенерация.

Одновременная выработка тепловой и электрической энергии. Газотурбинные блоки комплектуются паровыми либо водяными котлами утилизаторами, с целью дальнейшего использования тепла для отопления, горячего водоснабжения либо технологических нужд. В зависимости от потребностей потребителя, котлы изготавливаются под необходимые характеристики воды или пара.

### 3. Тригенерация.

Тепло, вырабатываемое электростанцией, может быть использовано для получения охлажденной до  $+5^{\circ}\text{C}$  воды. С этой целью в качестве тепловой нагрузки подключается абсорбционная бромистолитиевая холодильная машина. Охлажденная вода может использоваться для кондиционирования и на технологические нужды. Выработка холода по тригенерационной схеме значительно дешевле, чем на электрических холодильных машинах.

Работа турбины сопровождается низким уровнем шума и вибрации, а для микротурбин очень низким шумом, поэтому для больших установок применяются индустриального типа здания (в том числе контейнерного типа), которые также обеспечивают защиту оборудования от воздействия неблагоприятных атмосферных условий и служат дополнительным шумоглушением.

## Поршневые двигатели

Поршневые двигатели, используемые в энергосистемах, обладают, с одной стороны, соизмеримой с турбинами эффективностью в части генерации электроэнергии. С другой стороны, создание когенерационных систем на базе поршневых двигателей сводится «на нет» рассеиванием тепловой энергии, часть которой отводится системой охлаждения двигателя (двигатель и масло, используемое в системе смазки, должны постоянно охлаждаться), а также пульсирующим характером потока отходящих газов (с температурой на уровне  $400^{\circ}\text{C}$ ). Количественное соотношение тепловой энергии и электрической у поршневых двигателей составляет от 0.5:1 до 1:1 (**значительно ниже чем у турбин**).

*На практике применяют два типа поршневых двигателей:*

- **С воспламенением от сжатия** (аналог автомобильного или судового дизеля), которые могут работать на дизельном топливе или природном газе

(с добавлением 5% дизельного топлива для обеспечения воспламенения топливной смеси). На рынке доступны модели от единиц киловатт до 15 МВт выходной электрической мощности. Несмотря на повсеместную тенденцию использовать газ (в основном по экологическим причинам), в некоторых случаях (отсутствие газопровода, цена строительства, время работы) экономически оправданно использовать дизельное топливо.

- **С искровым зажиганием** (аналог автомобильного бензинового двигателя). Электрическая выходная мощность двигателей этого типа, как правило, на 15-20% ниже, чем у дизелей (ограничивается специально для предотвращения детонации). Тепловая мощность у них также ниже, чем у дизелей. Двигатели с искровым зажиганием могут работать на чистом газе (природном газе, биогазе и других горючих газах).

Подготовка места установки поршневых двигателей должна обязательно включать решение вопросов, связанных с **вибрацией**. Наиболее эффективным методом является использование платформы с пневматической системой амортизации.

Поршневой двигатель конструктивно имеет **значительно больше движущихся частей** по сравнению с турбиной. Следовательно, **интервалы сервисного обслуживания, связанного с остановкой и ремонтом двигателя так же значительно короче, чем у турбин.**

**Существенное ограничение состоит в работе на неполной мощности** – поршневой двигатель, как правило, не рекомендуется запускать с нагрузкой менее 50% на продолжительный период времени, иначе неминуем выход из строя.

Для борьбы с **высокой эмиссией** вредных веществ в поршневых двигателях используются как внешние каталитические фильтры, так и конструктивные модификации самих двигателей, направленные на увеличение времени горения и степени сжатия топливной смеси. Это, в свою очередь, приводит к росту стоимости самого оборудования и эксплуатационных расходов. Высокая эмиссия поршневых двигателей связана в первую очередь с тем, что развитие этих технологии происходило в период отсутствия экологических ограничений и основное внимание уделялось максимизации выходной мощности и производительности.

## Микротурбины

Микротурбина используется в качестве двигателя модульных мини-ТЭС, работающих в диапазоне мощностей от 30 до 250 кВт.

Все движущиеся части микротурбинного двигателя – воздушный компрессор, генератор и сама турбина – расположены на одном валу, скорость вращения которого может достигать – 96000 оборотов в минуту. Вал закреплен на воздушных подшипниках, что позволяет отказаться от жидкостной смазки и использовать для этого воздух. Воздух также обеспечивает охлаждение двигателя и управляющей электроники. Это позволяет значительно снизить стоимость обслуживания оборудования по сравнению с другими технологиями. Для микротурбин стандартным считается проведение регламентных работ **не чаще чем 1 раз в год**, что обеспечивает **коэффициент использования более 98%**.

Хотя основным видом топлива для микротурбин является природный газ, они также могут не менее эффективно работать и на другом топливе (попутный нефтяной, биологический газы, шахтный метан, сжиженный пропан, бутан, дизель или керосин).

Микротурбины демонстрируют наилучшие показатели по экологическим параметрам по сравнению с остальными приведенными в настоящем обзоре технологиями: содержание NOx в отходящих газах не превышает 9 ppm, CO – до 15 ppm (на номинальной мощности), **что в 10 (!) раз лучше**, чем у поршневых двигателей и в 5 – чем у турбин. В настоящее время требования к указанным параметрам возрастают год от года в геометрической прогрессии. По этой же причине в том числе за рубежом, в таких странах как Германия и Англия в основном используются именно газотурбинные электростанции.

Микротурбины не вибрируют, акустическая эмиссия не превышает 65 ДБ и легко гасится с помощью дополнительных кожухов. Корпус микротурбины имеет защиту от влаги и позволяет устанавливать оборудование на открытой площадке, снижая тем самым расходы на организацию специальных помещений.

По совокупности все эти преимущества позволяют применять микротурбины в качестве постоянно работающего энергоисточника генератора даже в густонаселенных городских центрах внутри и вне помещений, отводя городской сети роль резерва.

В связи с тем, что микротурбины являются достаточно инновационным продуктом на рынке распределенных энергосистем (активное коммерческое применение началось только в 1998 году) и стоимость оборудования, отнесенная на единицу электрической мощности в настоящее время не выше, чем у других технологий, использование микротурбин в когенерационных системах существенно улучшает их экономическую привлекательность.

Применение микротурбин в когенерации определяется температурой отходящих газов (  $505^{\circ}\text{C}$  ) и количественным соотношением тепловой энергии к электрической (от 2:1 до 1,5:1), составом и экологической безопасностью выхлопа (что не применимо к поршневым машинам), а именно:

- Прямое использование отходящего газа турбин для сушки, обогрева помещений, производства CO<sub>2</sub> (теплицы);
- Комплектация интегрированным или подключение внешнего теплообменника, в котором теплоносителем выступает вода или гликоль (горячее водоснабжение, отопление);
- Интеграция с климатическими системами для охлаждения и осушки помещений (например, в абсорбционном чиллере).

Достаточно часто когенерация на базе микротурбин устанавливается в дополнение к существующим промышленным системам производства тепловой энергии. Малая единичная мощность, масштабируемость и возможность эффективно работать в диапазоне нагрузок от 0 до 100% позволяют оптимизировать схемы производства энергии, что приводит к существенной экономии топлива и увеличивает срок службы оборудования.

Вышеизложенные преимущества позволяют достигать производительности **96% (!)** при когенерации, устанавливая микротурбины на сернистых газах или газах с низкой теплотворной способностью.

## Системы комбинированного цикла

Комбинированная система строится на основе промышленной газовой турбины, поток горячих отходящих газов которой, направляется на производство пара, который, в свою очередь, поступает в паровую турбину. Как правило, такие системы используются генерирующими компаниями в случае, когда необходимо максимизировать производство электрической энергии. Когенерация в этом случае играет подчиненную роль и обеспечивается за счет отвода части тепла из паровой турбины. В принципе, комбинированные системы можно построить и на базе других типов двигателей (кроме газовых турбин), представленных в данном документе.

**Сравнительный анализ газотурбинной энергоустановки с другими источниками энергии позволяет сделать вывод, что:**

### Электрический КПД

Наивысший электрический КПД у газовой турбины – до 45 % и не более 40 % у газопоршневого двигателя достигается при работе под 100%-ной нагрузкой. При снижении нагрузки до 50%, электрический КПД газовой турбины снижается. Для газопоршневого двигателя такое же изменение режима нагрузки вообще не рекомендуется из-за опасности перегрева, и, как следствие снижение ресурса.

### Климатические условия площадки

Номинальный выход мощности, как газовой турбины, так и газопоршневого двигателя зависит от высоты площадки над уровнем моря и температуры окружающего воздуха.

При повышении температуры свыше +25°C электрический КПД у газовой турбины падает на 3-5 %. При температурах ниже 0°C, КПД газовой турбины повышается. В отличие от газовой турбины газопоршневой двигатель имеет большее снижение электрического КПД в интервале температур от 0°C до +50°C.

### Условия работы

**Количество пусков:** газовая турбина может запускаться и останавливаться более 1000 раз в год, что практически не отражается на назначенном ресурсе энергоустановки. У газопоршневого двигателя количество запусков уменьшают его ресурс.

**Время запуска:** время до принятия нагрузки после старта составляет у газовой турбины 1,5-3 минуты, у газопоршневого двигателя 5-10 минут.

### Проектный срок службы, интервалы техобслуживания

Ресурс до капитального ремонта составляет у газовой турбины - 25000 - 60 000 рабочих часов (8 лет) при общетехническом ресурсе 100 000 часов, у газопоршневого двигателя до среднего ремонта 8 000 – 12 000 часов, а капремонт равен 10 000-20 000 рабочих часов (табл. 1).

**Стоимость капитального ремонта:** - газовая турбина с учётом затрат на запчасти и материалы - 10-25% от первоначальной стоимости,  
- газопоршневые машины – 50...70% от первоначальной стоимости.

## Техобслуживание

	Газопоршневой двигатель	Микротурбины До 1 мВт	Турбины, промышленные от 1 мВт
Интервалы периодического техобслуживания, час	500 - 1000	8 000	3 000 - 10 000
Средний ремонт	ремонт головок цилиндров	через год работы замена фильтров	
	8000 -12 000 (8-10 месяцев)	через 2 года замена инжектора и термопары	-
Капитальный ремонт	10 000 - 20 000	60 000	30 000 - 100 000

Наименование	Диапазон электрической мощности, мВт	КПД электрический, %	Эксплуатационные затраты, центов/1 кВт	Цена, 1кВт установленной мощности долл. США
Газовая турбина	0,8 – 30	23 – 44	0.06	890 - 1150
Поршневые двигатели	0.003 – 15	25 – 40	1.45	1200 - 1800
Микротурбины	0.03 – 0.2	28 - 32	0.04	800 - 1000

## Капиталовложения

Как показывают расчёты, удельное капиталовложение (USD/кВт) в производство электрической и тепловой энергии у газопоршневых двигателей составляет, например для станции 1,0 МВт – 1200-2200 USD/кВт, у аналогичной мощности

ГТЭС этот показатель составляет 790-1050 USD/кВт. Это преимущество ГТЭС неоспоримо для мощностей от 0,6 до 25 МВт.

Соотношение производительности, начальных инвестиций и удельной стоимости для различных типов двигателей (без учета стоимости утилизаторов тепла) приведено в табл. 2

Таблица 2

## ИТОГИ

Преимущества и недостатки по двигателям, используемым в когенерационных системах:

Наименование	Преимущества ГТЭ	Недостатки ГТЭ
Индустриальная газовая турбина	<p>Надежность Отсутствие водяной системы охлаждения Гибкость по отношению к выбору топлива Низкая эмиссия вредных веществ <b>«Высокоэнергетический» выход тепловой энергии</b> <b>Стоимость обслуживания в несколько раз(до 5-и раз) ниже, чем у поршневых двигателей</b> Практически нулевой расход смазочного масла (материала); <b>Быстрый запуск, в том числе при низких температурах воздуха</b> Возможность работы <b>во всем диапазоне</b> мощности (от 10 до 100%), в том числе с резким падением либо возрастанием нагрузки; Практически отсутствует вибрация;</p>	<p>Требуется компрессия топлива(использование дожимных компрессоров)</p>
Поршневой двигатель	<p>На 1,5 % более высокий электрический КПД Широкий спектр моделей по выходной мощности</p>	<p>Очень дорогое обслуживание (использование смазочных масел(материалов) и охлаждающих жидкостей) - <b>высокий расход смазочного масла (от 5 до 10 % от расхода топлива)</b> <b>Высокая эмиссия вредных веществ (требования мин.экологии возрастают год от года)</b></p> <p><b>Ограничение по работе на частичных режимах (не ниже 50% и не выше 80%)-выход из строя при резких падениях – возрастаниях нагрузок;</b></p> <p>Высокий уровень (низкочастотного) шума,вибрации; <b>Низкая тепловая эффективность;</b> Высокое соотношение вес/выходная мощность; Ресурс работы значительно ниже, чем у</p>

		турбин;
Микротурбина	<p>Высокая надежность и длительный срок службы (ресурс).</p> <p>Низкая стоимость обслуживания (отсутствие жидкостной смазки, удаленный мониторинг)</p> <p>Быстрый запуск</p> <p>Масштабируемость</p> <p>Возможность автономной работы</p> <p>Гибкость по отношению к выбору топлива</p> <p>«Высокоэнергетический» выход тепловой энергии</p> <p>Самая низкая эмиссия вредных веществ по сравнению с другими приведенными выше технологиями</p> <p>Практически отсутствует - вибрация</p>	<p>Относительно низкая выходная мощность одного турбогенератора (30-250 кВт).</p> <p>Высокая удельная стоимость кВт установленной мощности</p>