

СИСТЕМЫ АВТОНОМНОГО РАСПРЕДЕЛЕННОГО ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ: МИКРОТУРБИНЫ

Материал подготовил к.т.н. Г.В. Мельник

В последние годы все большее внимание энергетиков привлекают микротурбины — мини-атюрные газотурбогенераторы мощностью примерно от 25 до 500 кВт, используемые для длительной работы в непрерывном режиме. На следующие 5–10 лет прогнозируется значительный рост местного производства энергии с помощью микротурбин.

Появившись на рынке совсем недавно — в конце 90-х годов — микротурбины нашли применение в системах энергоснабжения таких объектов, как жилые дома и учреждения, гостиницы, супермаркеты, школы, технопарки и малые промышленные предприятия. Они обеспечивают обслуживаемые объекты не только электрической, но и тепловой энергией, в том числе используемой для нужд охлаждения. В качестве преимуществ микротурбин называют [1]:

- Возможность работы на самых различных видах топлив — как газообразных (природный газ, пропан, биогаз, попутный газ нефтяных месторождений), так и жидких (дизельное топливо и керосин).

- Возможность использования энергии топлива не только для производства электроэнергии, но и для нужд отопления и охлаждения (кондиционирования воздуха) посредством когенерации, т. е. одновременной выработки электричества и тепла (СНР), либо электричества, тепла и холода (ССНР).

- Чрезвычайно низкий уровень выбросов NO_x , CO и SO_x .

- Способность обеспечить гарантированное энергоснабжение объекта даже в условиях полной потери сетевого питания.

Пионером и мировым лидером в данной области считается калифорнийская фирма «Capstone Turbine Corporation» (США), выпустившая первый промышленный образец микротурбины в декабре 1998 года. По состоянию на декабрь 2004 года было продано более 3200 изделий [2]. Кроме того, микротурбины разрабатывают американские компании «Ingersoll-Rand», «Honeywell Allied Signal», «Solar Turbines», «UTC Power», «FlexEnergy» и «General Electric».

На протяжении нескольких лет фирма «DTE Energy Technologies» ведет разработку агрегата мощностью 400 кВт, названного «мини-турбиной».

В Европе на этом рынке работают фирмы «Turbec и Bowman», в Японии — «Elliott Energy Systems» (Ebara Group) и «Toyota». Однако активность европейских производителей на рынке США незначительна, а японские фирмы, по мнению Кита Филда, директора департамента общественных связей Capstone Turbine Corporation, имеют мало шансов выстоять в конкурентной борьбе против Capstone даже у себя на родине по причине значительно худших экологических показателей [1].

В 2000 году Министерство энергетики США объявило конкурс на создание лучших образцов микротурбин в рамках национальной программы развития малой энергетики (Distributed Energy Program), рассчитанной на 2000–2006 годы [3]. Правительственные инвестиции в реализацию этой программы составят 60 миллионов долларов. На конкурс могут быть представлены концепции, технологии, конструкции как агрегата в целом, так и отдельных его компонентов.

Предлагаемые изделия должны удовлетворять следующим требованиям:

- КПД (по электрической мощности) — не менее 40 %;

- Содержание NO_x в отработавших газах (при работе на природном газе) — не более 7 ppm.

Показатели надежности:

- Срок службы — не менее 45 000 часов;

- Ресурс до капитального ремонта — не менее 11 000 ч.

Экономические показатели:

- Стоимость оборудования — не более \$500/кВт;

- Стоимость электроэнергии должна обеспечить конкурентоспособность в сравнении с альтернативными источниками (в том числе энергосистемами).

В программе приняли участие следующие производители оборудования:

- Capstone;

- General Electric;

- Ingersoll-Rand;

- Solar Turbines;

- UTC.

Основные особенности микротурбин как особого класса энергооборудования наиболее удобно рассмотреть на примере их ведущего производителя — компании «Capstone Turbine Corporation» [2].

Микротурбины Capstone Turbine Corporation

Несколько лет назад фирма занималась разработкой электромобиля, аккумуляторы которого должны были непрерывно подзаряжаться от бортового двигателя внутреннего сгорания мощностью 30 кВт, работающего на дизельном топливе, керосине или газовом топливе. В качестве такого двигателя была выбрана микротурбина. Проектанты автомобиля предъявили к ней следующие требования: минимум движущихся частей, высокий КПД и уровень атмосферных выбросов, близкий к нулю. Было построено несколько десятков концепткаров, однако двигатель оказался настолько удачным, что возникла идея адаптировать его для более широкого (в ближайшей перспективе) рынка когенерационных установок.

Схема микротурбины Capstone показана на рис. 1.

По существу, турбина имеет единственную движущуюся часть — ротор с воздушным охлаждением, вращающийся со скоростью до 96 000 об/мин. Переменное напряжение высокой частоты с выхода генератора поступает в статический силовой преобразователь, на входе которого формируется напряжение промышленной частоты (10–60 Гц) с амплитудой 400–480 В, совместимое с сетью. Патентованная конструкция воздушных подшипников устраняет необходимость в жидкой смазке и обеспечивает хорошую динамику при сверхвысоких скоростях вращения вала, а наличие статического преобразователя позволяет отказаться от механического редуктора. Такая схема позволяет обойтись малыми габаритами (весь агрегат помещается в шкаф, по размерам сопоставимый со средним бытовым холодильником).

По мнению фирмы, двигатель обладает следующими преимуществами.

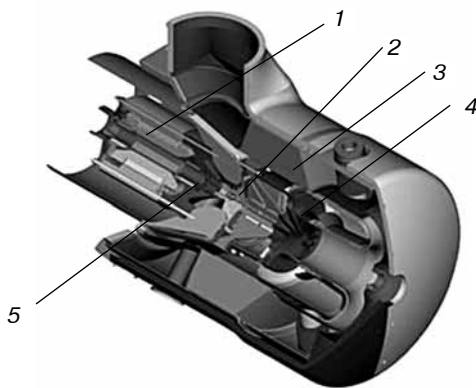


Рис. 1. Схема микротурбины Capstone:

1 — генератор на постоянных магнитах; 2 — центробежный компрессор; 3 — регенератор; 4 — центробежная турбина; 5 — воздушные подшипники

Минимизация простоя оборудования

Надежность двигателя обеспечивается простой его конструкции, которая сводит вероятность отказов к минимуму. Так, простой турбоагрегатов, работающих на природном газе высокого давления и пропане, не превышает 0,1 % по времени. А встроенная система защиты и автоматической диагностики позволяет предотвращать большинство отказов.

Резервирование сетевого питания

Микротурбогенератор может работать в параллель с сетью, реализуя встроенные алгоритмы слежения за нагрузкой в локальной сети, покрытия пиковой нагрузки или заданного времени работы; кроме того, он может работать и в автономном режиме. При исчезновении сети контроллер агрегата отключает его от сети и реконфигурирует систему для одиночной работы таким образом, чтобы агрегат взял на себя локальную нагрузку. При восстановлении сети процесс идет в обратном порядке, при этом питание локальной нагрузки от сети восстанавливается. Все это происходит автоматически.

Масштабируемость

Возможно объединение от 2 до 20 агрегатов в единую систему мощностью до 1,2 МВт; такие системы могут быть объединены в сеть, мощность которой не ограничена. При этом выделяется ведущий агрегат, с которого осуществляется все управление и отбор мощности как при одиночной, так и при параллельной работе. В случае отказа одного из агрегатов остальные автоматически распределяют между собой его нагрузку. Специальный блок управления может обеспечить параллельную работу до 100 агрегатов.

Широкий выбор топлива

Агрегаты могут работать на самых различных видах газового топлива, в том числе на природном газе, пропане и биогазе с очень низкой теплотворной способностью (до 3115 ккал/м³). Возможно даже использование в качестве топлива высокосернистого газа, содержащего до 7 % сероводорода. Основными видами жидкого топлива для микротурбин являются керосин и дизельное топливо.

Низкие эксплуатационные расходы

Поскольку в турбине применены воздушные подшипники и воздушное охлаждение, в нем отсутствует масло и другие рабочие жидкости, нуждающиеся в периодической смене. По регламенту ТО-1 проходит через 8000 часов и сводится к смене воздушных фильтров.

Чрезвычайно низкий уровень выбросов

При работе на газовом топливе содержание окислов азота в отработавших газах не превышает 9 ppmv при 15 % O₂ (в последних спецификациях этот показатель снижен до 5 ppmv). Содержание

окси углерода и углеводов в отработавших газах не превышает 40 ppmv и 9 ppmv соответственно. Столь низкий уровень выбросов, достигаемый за счет патентованной технологии приготовления обедненной рабочей смеси, становится возможным благодаря непрерывности процесса сгорания в газовой турбине. По названным показателям микротурбины Capstone не уступают лучшим моделям крупных турбоагрегатов, где, в отличие от микротурбин, применяется селективная каталитическая очистка отработавших газов. Наличие нескольких (обычно трех) форсунок в агрегате позволяет минимизировать выбросы также и на долевых режимах. Длительные испытания не выявили какого-либо ухудшения экологических показателей со временем.

По результатам испытаний, проведенных Агентством США по охране окружающей среды (EPA), фактический уровень вредных выбросов составляет:

NO_x — 3,0 ppmv (0,068 г/кВт·ч)

CO — 3,5 ppmv (0,045 г/кВт·ч)

SO_2 — 0,090 г/кВт·ч

CO_2 — 0,254 г/кВт·ч

Отмечается, что, согласно правилам Управления по контролю воздушных ресурсов штата Калифорния, являющихся одними из самых жестких в мире, все владельцы энергоустановок, работающих на минеральном топливе, обязаны вести постоянный мониторинг вредных выбросов. Исключение делается для установок, где выброс NO_x и CO по результатам испытаний не превышает 3,264 и 0,272 г/кВт·ч соответственно. Таким образом, пользователи микротурбин Capstone освобождены от этой обязанности, поскольку, как видно из приведенных выше данных, указанные агрегаты укладываются в данный лимит с большим запасом.

Дистанционное управление и контроль

Управление может вестись как вручную, с дисплея, расположенного на передней панели агрегата, так и через последовательно подключенный модем. Оба метода обеспечивают доступ ко всем соединениям и каналам управления. Архитектура системы является открытой, что обеспечивает возможность ее интеграции с централизованными системами управления и контроля зданий с помощью стандартных протоколов связи. Встроенная защита по отклонению параметров сети Контроллер обладает встроенными функциями защиты сети, устраняющими необходимость во внешних реле и контакторах. Цифровой контроллер управления мощностью связан с механическим контактором и бесконтактными выключателями, которые отключают агрегат от сети в случае отклонения ее параметров от нор-

мы. В частности, обеспечивается защита по длительным и кратковременным отклонениям напряжения и частоты в обе стороны от номинала. Имеется также пассивная защита по превышению скорости изменения частоты.

По заключению Объединенной Сертификационной Лаборатории (Underwriters' Laboratories — UL) агрегат Capstone Model 330 отвечает требованиям стандарта подключения к нью-йоркской сети. Для обеспечения, в случае необходимости, защиты от обратного потока мощности может быть использован недорогой счётчик импульсов, работающий под управлением контроллера Capstone, или обычное реле обратной мощности.

Сертификат безопасности

Системы подачи газа высокого и низкого давления сертифицированы на соответствие новому Стандарту UL 2200, регламентирующему параметры генераторов при одиночной и параллельной работе. Им присвоена также сертификационная марка ЕС.

Самосинхронизация

Статический силовой преобразователь обеспечивает самосинхронизацию с сетью, устраняя тем самым необходимость в ручной синхронизации и в каких-либо устройствах автоматической синхронизации. При работе в параллель с сетью коэффициент гармонических искажений находится в допустимых пределах согласно требованиям МЭК 519. При одиночной работе напряжение каждой фазы может регулироваться в пределах от 150 до 480 В~.

Способность работать в режиме резерва

Как одиночные агрегаты, так и группы агрегатов могут работать в автономном режиме. Обеспечивается возможность автоматического пуска и приема нагрузки по любой программе при исчезновении напряжения в сети. Вместо ныне выпускаемых моделей С30 и С60, с января 2006 года в продажу поступила 65-киловаттная модель для систем когенерации в двух вариантах — С65 и С65-ICHP (с возможностью питания системы кондиционирования).

Параметры турбогенераторов Capstone номинальной мощностью 65 кВт приведены в табл. 1.

По сведениям [2], на Сахалине имеются две установки С30, работающие на попутных газах нефтяных скважин.

По данным [1], стоимость 30-киловаттной микротурбины (без учета установки) составляет от \$30 000 до \$35 000, 60-киловаттной микротурбины — от \$50 000 до \$60 000. Однако, согласно данным [5], один агрегат Capstone С60 (для целей когенерации, и, в частности, для использования в качестве источника тепла для абсорбционного холодильника) обошелся бы банку

Таблица 1

Параметры турбогенераторов Capstone

Параметр	Значение
Номинальная мощность на выходных клеммах	65 кВт
КПД по электрической мощности	29% по низшей теплотворной способности (НТС) топлива
Полная мощность на выходных клеммах	65 — параллельная работа с сетью; 83 — одиночная работа (при напряжении 480 В)
Напряжение	380–480 В~
Выходное соединение	3 фазы
Частота	50 или 60 Гц (задается программно)
Номинальный ток в установившемся режиме	100/125 А
Тип силового преобразователя	Инвертор
Коэффициент нелинейных искажений по току	Согласно МЭК 519
Требования к топливу	
Природный газ	Высшая теплотворная способность (ВТС) 6,25–9,1 ккал/м ³
Давление топлива на входе	5,17 бар**
Расход энергии топлива на полной мощности	192772 ккал/ч [НТС]; 212180 ккал/ч [ВТС]
Удельный расход энергии (тепловая мощность)	2923 ккал/ч [НТС]
Удельный расход энергии (электрическая мощность)	2772 ккал/ч [НТС]
Экологические характеристики	
Выбросы NO _x	< 5 ppmv при 15% O ₂
Выбросы CO	< 40 ppmv
Выбросы углеводородов	< 9 ppmv
Температура ОГ	309 °С
Расход ОГ	0,49 кг/с
Энергия ОГ	141 370 ккал/ч
Тепловые характеристики C65-ICHP***	
Подогрев воды (медный теплообменник)	95758 ккал/ч [112 кВт]
Общий КПД модуля регенератора	80%
Подогрев воды (теплообменник из нержавеющей стали)	66779 ккал/ч [78 кВт]
Общий КПД модуля регенератора	64%
Массогабаритные показатели (C65/C65-ICHP)	
Ширина × глубина × высота	762 × 1956 × 2108 мм 762 × 1956 × 2388 мм
Вес:	
вариант для параллельной работы	758/1000 кг
двухрежимный вариант	1121/1364 кг

*При линейной нагрузке.

**Возможна поставка с внешними бустерами, обеспечивающими работу при избыточном давлении газа от 0,01 до 1,03 бар.

***Приведены значения для следующих параметров охлаждающей воды: расход 2,5 л/с, температура на входе –60 °С в случае медного теплообменника, и 30 °С в случае теплообменника из нержавеющей стали (применяется, главным образом, при использовании хлорированной воды).

Citibank West, заказавшему соответствующий проект, почти в \$100 000, а вместе с расходами по установке и закупке сопутствующего оборудования — порядка \$200 000. Закупка и установка двух агрегатов Capstone C60 с учетом нужд соседних офисных зданий на Wall Street (отопление и кондиционирование) обошлась бы порядка \$300 000.

Стоит упомянуть о применении микротурбин Capstone в агрегатах, работающих на биомассе, а также в установках газификации древесной стружки [4].

Микротурбины фирмы «Ingersoll-Rand»

Компания «Ingersoll-Rand» в настоящее время выпускает когенерационные агрегаты двух типов на базе микротурбины — MT70 и MT250 электрической мощностью 70 и 250 кВт соответственно [5].

Их основными преимуществами являются:

- высокий суммарный КПД установки;
- возможность параллельной работы агрегатов между собой и с сетью;
- низкий уровень вредных выбросов;
- возможность применения встроенного рекуператора;
- возможность применения встроенного вспомогательного газового компрессора промышленного типа;
- расчетный срок службы — 80 000 часов (с учетом капитальных ремонтов).

Для привода генератора в них используется механический редуктор. В конструкции применяется ротор из нитрида кремния, устойчивый к высоким температурам, который достаточно дешев благодаря хорошо отработанной технологии.

Коммерческие поставки агрегатов MT70 начались в 2002 году, а MT250 — в 2004 году. К началу августа 2006 года суммарная наработка микротурбин Ingersoll-Rand достигла 1 млн моточасов, а их общая установленная электрическая мощность составила 14 МВт, что достаточно, например, для обеспечения электричеством 9000 жилых домов. Подсчитано, что за 4 года работа указанных агрегатов на природном и попутном газе позволила сократить выброс CO₂ в атмосферу на 20 000 тонн по сравнению со средней ГРЭС аналогичной мощно-



Рис. 2. Микротурбина фирмы Ingersoll-Rand

сти. Это равносильно выводу из эксплуатации 3000 автомобилей сроком на один год или облесению площади свыше 2000 гектаров.

Основные параметры агрегата MT70 представлены в табл. 2

Типичное применение микротурбин Ingersoll-Rand — очистные сооружения канализации, выделяющие большое количество метана. Обычно

Таблица 2

Параметры агрегата MT70

Параметр	Значение
Электрический КПД (± 2)	29 % по НТС без газового бустера (вспомогательного газового компрессора), 28 % по НТС с газовым бустером
Номинальная тепловая мощность (ВТС)	2396 ккал/кВт·ч без газового бустера; 3414 ккал/кВт·ч с газовым бустером
Номинальная тепловая мощность (НТС)	2966 ккал/кВт·ч без газового бустера 3073 ккал/кВт·ч с газовым бустером
Электрическая мощность (± 15)	70 кВт (номинал) при 15°C без газового бустера, 68 кВт (номинал) при 15°C с газовым бустером, 92 кВт при 17°C
Напряжение	480 В~
Частота	60 Гц
Соединение обмоток генератора	3-фазное (звезда), 4-проводное
Температура выхлопных газов без	232 °C
Расход газа	0,726 кг/с
Максимальный расход воды	6,8 м ³ /ч
Максимальное давление воды на входе	862 кПа
Максимальная температура воды на входе	82 °C
Параметры топливного газа	
Давление на входе	1–517 кПа
Минимальная температура	1,7 °C
Максимальная температура:	
• с газовым бустером	46°C
• без газового бустера	66°C
Уровень выбросов при полной нагрузке	
NO _x	<5 ppmv при 15% O ₂
CO	<6 ppmv при 15% O ₂
ЛОС	<5 ppmv при 15% O ₂
Уровень шума на расстоянии 1 м	78 дБа
Температура окружающего воздуха	
Исполнение для закрытых помещений	+2 ÷ +46°C
Исполнение для наружного размещения	-23 ÷ +46°C

попутный газ сгорает в факелах, что приводит к бесцельному расходованию топливных ресурсов, и к тому же вносит свой вклад в создание парникового эффекта. Применение когенерационной установки позволяет использовать энергию газа для выработки не только электричества, но и тепла, используемого для технологических целей, отопления и горячего водоснабжения. Такой установкой является система EcoWorks фирмы «Ingersoll-Rand» на базе описанных выше микротурбин. Система EcoWorks может полностью или частично покрывать энергетические потребности большинства очистных сооружений. Одна или несколько установок EcoWorks могут вырабатывать электроэнергию и одновременно горячую воду для подогрева метатенков. За счет этого снижается расход топлива, необходимого для подогрева метатенков, или вообще отпадает необходимость в дополнительном топливе. Система регенерации EcoWorks обеспечивает выработку воды питьевого качества, пригодную для умывания и приготовления пищи. Учитывая крайне низкий уровень выбросов EcoWorks, тепло выхлопных газов может быть использовано для обогрева влагопоглощающего колеса осушителя, для замещения части топлива, расходующего форсунками топки, для обогрева котла и иных нужд. При этом суммарный КПД системы может достигать 70 % и более.

Встроенная система топливоподготовки EcoWorks обеспечивает возможность использования в качестве топлива газообразных отходов с самыми различными параметрами. В этом состоит одно из отличий EcoWorks от других двигателей, в том числе и микротурбин, где для этих целей, как правило, для топливоподготовки приходится использовать дорогостоящие внешние системы, создаваемые по индивидуальным проектам, но не исключающие необходимости переделок и дополнительных регулировок в процессе эксплуатации. Система топливоподготовки EcoWorks обеспечивает осушение газов из метатенка, которые затем сжимаются и охлаждаются, тем самым предотвращается опасное для двигателя загрязнение газов. Система топливоподготовки обеспечивает также работу микротурбин в местах, где имеются источники топливного газа низкого давления или топлива с очень малой теплотворной способностью, например, газа, содержание метана в котором не превышает 35 %.

Микротурбины фирмы «Turbec»

Фирма «Turbec S.p.A» появилась в 2004 году в результате слияния «Turbec AB» (совместного предприятия шведского концерна «Volvo» и АBB) и итальянской фирмы «API S.r.l. Turbес S.p.A» выпускает газотурбоагрегаты типа T100 электрической мощностью 100 кВт, основные данные

Таблица 3

Параметры агрегата типа T100

Параметр	Значение
Место установки	Внутри помещения/снаружи
Габариты	Ширина 900 мм, высота 1810 мм, длина 2770 мм
Вес для установки внутри	T100 P 2250–2750 кг
Вес для установки снаружи	T100 PH 2770–3100 кг
Топливо	Природный газ ¹⁾
Напряжение	400/230 В~, 3 фазы
Частота	50 Гц (60 Гц)
Давление (мин./макс.)	0,02 / 1,0 бар
Температура (мин./макс.)	0 / 60 °С
Низшая теплотворная способность	38–50 МДж/кг
Тепловая мощность (горячая вода)	155 кВт (±5) при 70–90 °С
Суммарный КПД	77 % (±1) при 70–90 °С
Минимальная температура воды на входе	50 °С
Максимальная температура воды на выходе	150 °С
Минимальное давление воды	25 бар
Температура выхлопных газов	90 °С при 70–90 °С
Электрическая мощность	100 кВт (±3)
Электрический КПД	33 % (±1)
Расход топлива	333 кВт
Расход выхлопных газов	0,80 кг/с
Температура выхлопных газов	270 °С
Уровень шума на расстоянии 1 метра	70 дБа
NO _x	< 15 ppmv = 32 мг/МДж по топливу ^{2) 3)}
CO	< 15 ppmv = 18 мг/МДж по топливу ^{2) 3)}
Расчетный срок службы основных компонентов	
Газовая турбина	> 60 000 ч
Рекуператор	> 60 000 ч
Камера сгорания	> 30 000 ч

¹⁾ По желанию потребителя установка может быть рассчитана на различные виды топлива (в том числе биогаз, дизельное топливо, керосин, метанол).

²⁾ Объемный расход выхлопных газов при 15% O₂, 100% нагрузке и температуре воздуха на входе 15 °С.

³⁾ Агрегат Turbec T100 сертифицирован CARB (Управление по контролю воздушных ресурсов штата Калифорния).

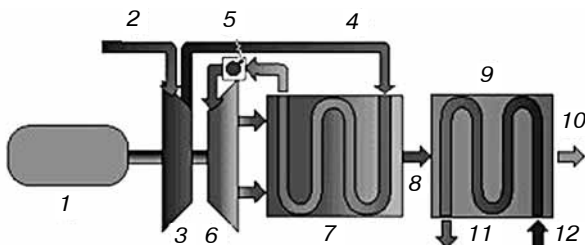


Рис. 3. Схема установки:

1 — генератор; 2 — вход воздуха; 3 — компрессор; 4 — подача воздуха в рекуператор; 5 — камера сгорания; 6 — турбина; 7 — рекуператор; 8 — выхлоп; 9 — теплообменник; 10 — выход выхлопных газов; 11 — выход воды; 12 — вход воды

которых представлены в табл. 3. К августу 2006 года их общая наработка составила 1 563 295 моточасов [7]. Схема установки показана на рис. 3.

Другие производители

О микротурбинах других производителей информация крайне скудная. Известно, что фирма «General Electric» ведет поисковые работы по созданию микротурбин мощностью 175–350 кВт, однако какие-либо данные о коммерческих изделиях отсутствуют.

В Англии микротурбины электрической мощностью 80 кВт строит компания «Bowman» [8] (рис. 4).

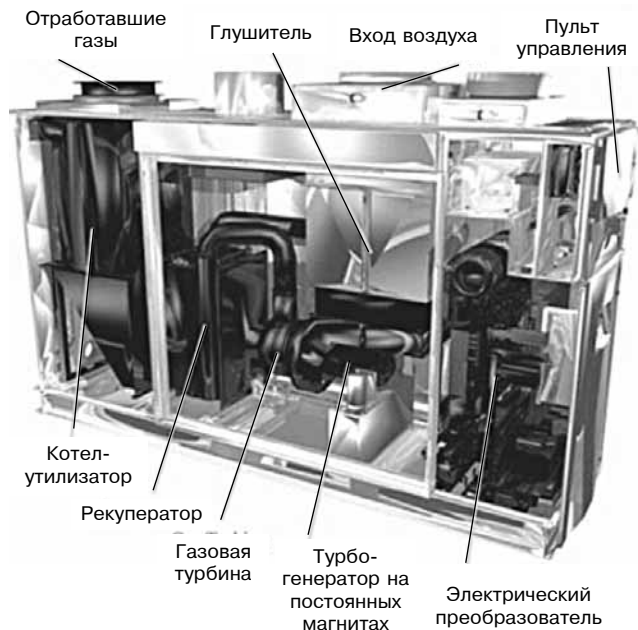


Рис. 4. Схема микротурбинной установки фирмы «Bowman»

Габариты установки — 3100 × 1922 × 876 мм, сухой вес — 1930 кг.

Однако недавно фирма объявила, что в дальнейшем ограничится лишь поддержкой установок, уже поставленных на внутренний рынок в Англии и в некоторые страны Южной Европы.

Источники:

1. Gene Dallaire. Microturbines: Power to the People. DISTRIBUTED ENERGY - The Journal for Onsite Power Solution, November-December 2004.
2. Capstone Introduces a New Generation of Microturbine Energy Systems. <http://www.microturbine.com>
3. David Engle. Retrofit Powers Up. DISTRIBUTED ENERGY - The Journal for Onsite Power Solution, September-October 2004.
4. <http://www.flexenergy.com>
5. Ingersoll Rand Microturbine Fleet Logs 1 Million Operating Hours
6. <http://energy.ingersollrand.com/>
7. <http://www.turbec.com/>
8. <http://www.bowmanpower.co.uk/>