

МИКРОТУРБИНЫ

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

В четвертом номере нашего журнала за 2006 г. был опубликован обзор, посвященный микротурбинам — относительно новому направлению развития малой энергетики. Микротурбина — экологически безопасный тепловой двигатель с высоким КПД и пониженными требованиями к топливу — является в ряде случаев оптимальным решением там, где нужны автономные малогабаритные источники электрической и тепловой энергии с большим ресурсом и минимальным обслуживанием.

Предлагаемая подборка включает материалы, где описаны некоторые области и объекты применения микротурбин за рубежом и в нашей стране.

МИКРОТУРБИННАЯ КОГЕНЕРАЦИОННАЯ УСТАНОВКА КОМПАНИИ «CALNETIX POWER SOLUTIONS»

Калифорнийская фирма «Calnetix Power Solutions» имеет многолетний опыт в области производства и поставок высокоэффективных электродвигателей, генераторов, магнитных подшипников и комплексных электроприводов, а также микротурбин. Ее изделия используются в распределенных энергосистемах, в системах кондиционирования воздуха, переработки газа, в производстве полупроводниковых приборов, медицинского и другого оборудования в разных странах мира. Официальным дистрибутором компании «Calnetix» в России является Технический Холдинг «Электросистемы».

Микротурбинные установки (МТУ) находятся в производстве с 1997 г. С 1997 по 2000 г. выпускались установки типа Т45 и Т60 мощностью соответственно 45 и 60 кВт, с 2000 по 2003 г. — установки ТА80 мощностью 80 кВт, а с 2004 г. по настоящее время компания выпускает только 100-киловаттные установки следующих модификаций:

➤ ТА-100 R — установка для производства электроэнергии (электростанция) (рис.1);

➤ ТА-100 RCHP — установка для комбинированного производства электроэнергии и тепла (когенератор) с электрической мощностью 100 кВт и тепловой мощностью от 160 кВт.

В зависимости от условий эксплуатации микротурбинные установки выпускаются в двух вариантах исполнения:



Рис. 1. Установка ТА-100 RCHP с микротурбиной

для эксплуатации внутри или вне помещения. Последние, в свою очередь, имеют два исполнения — для температуры наружного воздуха соответственно до $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ и до $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Появление микротурбин было вызвано растущей потребностью в надежных, долговечных, экологически безопасных автономных источниках постоянного электро- и теплоснабжения мощностью от нескольких десятков до нескольких сотен киловатт. Потребителями таких мощностей, как правило, являются офисные бизнес-центры, развлекательные и торговые учреждения, бани, бассейны, складские помещения, предприятия быстрого питания, малого и среднего бизнеса, больницы, прачечные и т. п. объекты.

Выбор микротурбинной установки является предпочтительным (по отношению к другим автономным источникам тепло- и электроснабжения) в случаях, когда:

➤ существуют жесткие ограничения по шуму, вибрациям и эмиссии вредных веществ;

➤ имеются ограничения по массе и габаритам;

➤ требуется «островной» (т. е. полностью автономный) режим работы, при котором электрическая нагрузка может изменяться от 0 до 100 % без каких-либо динамических ограничений, включая сбросы—набросы нагрузки в диапазоне от 0 до 100 %;

➤ графики потребления тепловой и электрической нагрузки не совпадают;

➤ требуется минимизировать затраты на ТО с периодичностью 4000—8000 ч.

Микротурбинная установка представляет собой изделие полной заводской готовности. При разработке использован блочно-модульный принцип, позволяющий заменять в случае необходимости отдельный узел, а не изделие в целом.

Все основные и вспомогательные системы и агрегаты смонтированы на единой пространственной раме. Для защиты от внешних воздействий используется защитный кожух со звукоизоляционным покрытием. В состав установки входят:

— турбогенератор;

— камера сгорания;

— регенератор;

— система утилизации тепла с котлом-утилизатором (КУ);

— система смазки;

— топливная система;

— дожимной газовый компрессор;

— блок силовой электроники (выпрямитель, инвертор, фильтр);

- цифровая система автоматического управления FADEC (Full Authority Digital Electronic Control);

- воздушная система охлаждения подкапотного пространства и силовой электроники;

- аккумуляторные батареи.

Принцип действия микротурбинной установки понятен из функциональной схемы, приведенной на рис. 2.

Очищенный атмосферный воздух попадает в воздухозаборник, откуда он поступает на вход компрессора. В компрессоре воздух сжимается, нагреваясь при этом до температуры 250 °С и далее поступает в специальный газоздушный теплообменник (регенератор), где он дополнительно подогревается до температуры 500 °С. Такое решение позволяет примерно вдвое повысить термический КПД установки. Нагретый сжатый воздух перед камерой сгорания смешивается с газообразным топливом высокого давления, откуда гомогенная газоздушная смесь поступает в камеру сгорания. Для повышения давления газа используется штатный встроенный дожимной компрессор. Предварительное смешение воздуха с газообразным топливом позволяет снизить уровень вредных выбросов по NO_x до 25 ppm при 15 % O_2 в диапазоне электрических нагрузок от 50 до 100 %, и до 60 ppm при 15 % O_2 на холостом ходу.

Поток газов из камеры сгорания, нагретых до температуры 926 °С, подается на колесо турбины, где, расширяясь, они совершают работу, вращая расположенные на том же валу колесо компрессора и высокоскоростной синхронный генератор. Из турбины газы с температурой 648 °С по газоходу направляются в регенератор, где отдают тепло сжатому воздуху, поступающему из компрессора. После регенератора температура отходящих газов снижается до 310 °С.



Рис. 2. Функциональная схема

На выходе из регенератора установлена байпасная заслонка, которая направляет отходящие газы либо через байпас, либо в котел-утилизатор. Последний представляет собой газоздушный теплообменник, где отходящие газы нагревают воду до требуемой температуры. Установка не имеет редуктора. В ней (в отличие от аналогичных изделий других производителей) частота вращения ротора практически не зависит от нагрузки и поддерживается постоянной на уровне 68 000 об/мин. Это позволяет без дополнительных аккумуляторных батарей осуществлять практически ступенчатый (в течение 0,3 с) наброс нагрузки. Высокочастотное напряжение на выходе генератора подвергается двойному преобразованию: из высокочастотного переменного в постоянное, а затем снова в переменное напряжение 400 или 480 В с частотой 50 или 60 Гц. Применение двойного преобразования обеспечивает стабильное выходное напряжение правильной синусоидальной формы.

Турбогенератор

Турбогенератор является основной частью установки, наиболее наукоемкой и трудоемкой. В отличие от компаний, которые для сокращения затрат на разработку используют в качестве первичного двигателя авиационные газовые турбины, разработчики «Elliot»–«Calnetix», используя свой богатый опыт в области вспомогательных энергоустановок, создали турбогенератор практически с нуля, максимально учитывая особенности эксплуатации энергетических установок в наземных условиях.

В результате был разработан турбогенератор, который принципиально отличается от агрегатов на основе авиационных двигателей. Эти отличия заключаются в следующем:

- простота конструкции (значительно сокращено количество прецизионных и весьма трудоемких в изготовлении деталей, узлов и агрегатов);

- более низкая степень повышения давления в компрессоре;

- применение конструктивных решений, которые традиционно используются в силовых установках наземного применения, таких как гидродинамический подшипник скольжения, керамические материалы, регенератор, низкоэмиссионная камера сгорания;

- более низкие затраты на техническое обслуживание;

- более высокий назначенный и межремонтный ресурс.

Турбогенератор (рис. 3) представляет собой высокооборотный одновальный агрегат с частотой вращения ротора 68 000 об/мин. Конструктивно он выполнен в одном корпусе, куда установ-

ливается ротор. К корпусу со стороны турбины примыкает камера сгорания, представляющая собой самостоятельный узел.

Ротор (рис. 4) является наиболее ответственной частью турбогенератора. На одном валу, изготовленном из высокопрочной стали, последовательно размещены:

- ротор высокоскоростного синхронного генератора с двумя запрессованными постоянными магнитами;

- колесо одноступенчатого центробежного компрессора;

- колесо одноступенчатой радиальной турбины, выполненное из термопрочного сплава с низким коэффициентом ползучести, прикрепленное к ротору при помощи сварки трением.

Ротор турбогенератора устанавливается на двух опорах. Первая опора расположена перед передним торцом втулки генератора, вторая — между втулкой генератора и колесом компрессора. В качестве первой опоры используется главный подшипник с керамическими шариками, который устанавливается в статорной части через промежуточные плавающие кольца, второй опорой является гидродинамический подшипник. Оба подшипника охлаждаются и смазываются высококачественным синтетическим маслом.

Особенностью ротора является консольное расположение колес компрессора и турбины, что позволило вынести все подшипники из горячей зоны. В результате применения этих конструктивных решений удалось:

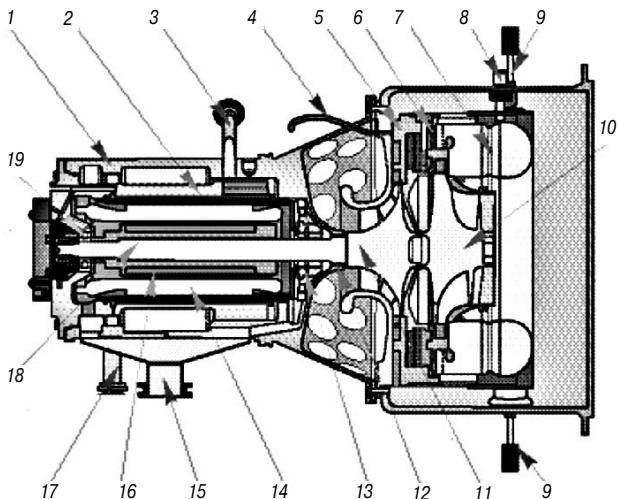


Рис. 3. Турбогенератор в разрезе:

1 — корпус; 2 — корпус статорной части; 3 — маслопровод (подвод масла); 4 — воздухопровод для поддува лабиринта; 5 — диффузор; 6 — сопловый аппарат; 7 — жаровая труба; 8 — свеча зажигания; 9 — топливный коллектор; 10 — колесо турбины; 11 — колесо компрессора; 12 — лабиринтное уплотнение; 13 — гидродинамический подшипник; 14 — статорные обмотки; 15, 17 — горловины слива масла; 16 — постоянные магниты; 18 — ротор; 19 — керамический подшипник качения

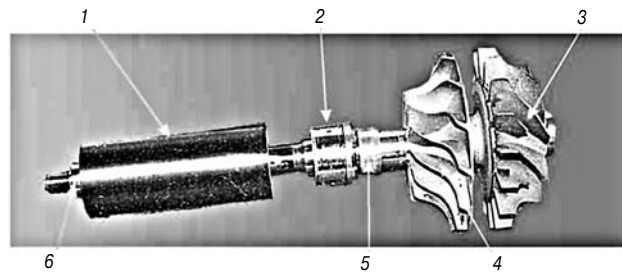


Рис. 5. Общий вид вала:

1 — ротор генератора с постоянными магнитами; 2 — гидродинамический подшипник; 3 — колесо турбины; 4 — колесо компрессора; 5 — лабиринтное уплотнение; 6 — керамический подшипник качения

- значительно уменьшить расход масла на угар, который составляет не более 0,001 г/кВт·ч против 0,3 г/кВт·ч в газоперекачивающих агрегатах (ГПА);

- уменьшить производительность и мощность привода насоса системы смазки;

- увеличить период замены масла и масляного фильтра (24 000 ч против 750–1000 ч в ГПА).

Использование высокоскоростного синхронного генератора и полупроводникового преобразователя напряжения позволило избавиться от «ахиллесовой пяты» большинства маломощных газовых турбин — редуктора.

Камера сгорания

Конструкция камеры противоточная, кольцевая, с многоточечной подачей газообразного топлива через отдельные инжекторы. Камера выполнена с возможностью длительной работы как при частичных, так и полных нагрузках установки.

Газ подается в камеру через 12 форсунок под давлением 5,2–6,2 бар. Процесс горения стабилен даже при значительных изменениях свойств используемого газа.

Регенератор

Газовоздушный регенератор предназначен для повышения термического КПД установки путем дополнительного подогрева воздуха после компрессора теплом отходящих газов турбины в газовоздушном пластинчатом теплообменнике. Экономия топлива происходит за счет увеличения температуры воздуха, который поступает в камеру сгорания из воздушного компрессора.

Система утилизации тепла с котлом-утилизатором

Система утилизации тепла отходящих газов обеспечивает подогрев сетевой воды до заданного значения. Регулирование температуры воды на выходе из КУ осуществляется за счет перепуска отходящих газов через байпасную магистраль КУ.

<http://www.micro-turbines.ru/pdf/calnetix.pdf>
<http://www.tapower.com/microturbines.asp>
<http://news.thomasnet.com/companystory/806491>

Технические характеристики микротурбинной установки TA-100 RCHP

Характеристика, параметр	Значение
Общие характеристики	
Электрическая мощность при САУ ¹ , кВт	100
Тепловая мощность (ГВС/отопление) (49/60) (70/95), кВт	172 / 160
Тепло, выделяемое при сгорании топлива, кВт	362
КПД электрический, %	29
КПД полный, %	> 75
Напряжение, В	~ 3-ф., 400
Частота, Гц	50
Колебание частоты, %	±1,0
Стабильность выходного напряжения ² , %	±5,0
Значение тока при нагрузке 100 %, А	200
Максимальное значение тока (перегрузка) в течение 5 с, А	300
Общее гармоническое искажение напряжения, %	<5%
Ток короткого замыкания, А	500
Тип электрического генератора	Высокооборотный, с двумя постоянными магнитами
Количество используемых аккумуляторов, шт.	2
Напряжение двух аккумуляторов, В	24
Уровень шума на расстоянии 1 м / 10 м, дБ	75/62
Массогабаритные характеристики	
Длина (внутреннее / наружное исполнение), мм	3111,5 / 3316,5
Ширина (внутреннее / наружное исполнение), мм	917 / 917
Высота (внутреннее / наружное исполнение), мм	2123 / 2250
Масса (внутреннее / наружное исполнение), кг	1814 / 2040
Характеристики газотурбинного агрегата³ (привода генератора)	
Расход газа в режиме номинальной мощности при САУ (для $H_u = 33,4/38,3$ МДж/Нм ³), Нм ³ /ч	39/34
Частота вращения ротора ⁴ , об/мин	68000
Расход воздуха, кг/с	1
Максимальное аэродинамическое сопротивление на выпуске, Па	1250
Характеристики системы воздушного охлаждения	
Расход воздуха на охлаждение силовой электроники, Нм ³ /с	0,38
Расход воздуха на охлаждение масляно-воздушного радиатора масляной системы, КУ5 и дожимного компрессора, Нм ³ /с	0,755
Максимальное аэродинамическое сопротивление присоединяемого газохода выхлопных газов, Па	1240
Максимальное аэродинамическое сопротивление присоединяемого воздуховода для отвода охлаждающего воздуха от масляно-воздушного радиатора и КУ, Па	50
Максимальное аэродинамическое сопротивление присоединяемого воздуховода охлаждающего воздуха от силовой электроники и дожимного компрессора, Па	185
Характеристики топливной системы	
Избыточное давление газа на входе в дожимной компрессор, кПа	от 5 до 35
Характеристики масляной системы	
Объем масляного бака, л	19
Тип используемого масла ⁶	Mobil SH C 824
Характеристики системы утилизации тепла	
Температура отходящих газов на входе в КУ, °С	около 310
Температура отходящих газов на выходе из КУ, °С	около 90
Температура воды на входе в КУ, °С	70
Температура воды на выходе из КУ, °С	95
Минимальный рекомендуемый поток воды, л/мин	75

¹ САУ — стандартные атмосферные условия: температура воздуха -15 °С, влажность 60 %, атмосферное давление — 760 мм рт. ст.

² При дестабилизирующих факторах: сброс/наброс нагрузки, изменение температуры окружающего воздуха и др.

³ Под газотурбинным агрегатом подразумевается турбогенератор с камерой сгорания и регенератором.

⁴ Частота вращения ротора генератора практически не зависит от величины нагрузки.

⁵ КУ — котел-утилизатор отходящих газов.

⁶ Замена масла производится через каждые 24 000 моточасов (раз в три года).

МИКРОТУРБИНЫ ДЛЯ АВТОБУСОВ С ГИБРИДНЫМИ СИЛОВЫМИ УСТАНОВКАМИ

Междугородный автобус — идеальный объект для применения гибридных силовых установок. В большинстве существующих гибридных установок используется последовательная схема с дизель-генератором, от которого во время рейса заряжаются аккумуляторы для увеличения пробега машины без дозаправки. Реже вместо дизеля используется бензиновый двигатель, иногда в качестве вспомогательного агрегата (ВА) применяются даже топливные элементы.

Фирма «DesignLine International Holdings Ltd.» пошла по другому пути, применив в качестве ВА междугородного автобуса микротурбину. Калифорнийской компании «Capstone Turbine Corp.» были заказаны 150 микротурбин, которые должны быть поставлены в течение 2009 г.

Они будут установлены в автобусах ECOSaver IV с гибридным электроприводом. Четвертое поколение этой модели предназначено для североамериканского рынка.

Автобусы ECOSaver с микротурбинами «Capstone» работают в разных странах мира уже около 10 лет. Первые такие автобусы появились в Новой Зеландии (где и находится фирма «DesignLine»), а недавно они вышли на маршруты в городе Charlotte (Северная Каролина, США), где «DesignLine» открыла свое новое производство. Эти автобусы выполняют также коммерческие перевозки в Нью-Йорке и в Гонконге.

До настоящего времени из всех микротурбин только микротурбины «Capstone» поставляются в промышленных масштабах в качестве двигателей для городских автобусов. В 2007 г. фирма «Capstone» получила заказ на 15 микротурбин от «Eco Power Technology» (Италия). Двенадцать из них предназначались для городских автобусов области Абруццо, еще три — для Министерства охраны окружающей среды.

На момент подготовки данного материала продано более 4500 микротурбин «Capstone» (в большинстве своем — для привода стационарных генераторов), наработавших в общей сложности 19 млн моточасов.

Микротурбины «Capstone», предназначенные для транспортных установок, имеют мощность 30 и 65 кВт и способны работать на различных топливах, в том числе — на малосернистом дизельном топливе, сжатом или сжиженном природном газе, керосине или пропане (сжиженном нефтяном газе). Турбины мощностью 30 кВт, заказанные «DesignLine», работают на дизельном топливе.

Микротурбина здесь используется в качестве вспомогательного двигателя, расширяющего



Автобус ECOSaver

максимальный пробег автобуса без дозаправки. Аккумуляторы могут подзаряжаться от местной сети ночью, когда тарифы на электроэнергию минимальны. Энергия системы может использоваться для питания кондиционера или для ускорения разгона машины.

Нормальным считается, когда автобус возвращается в парк с аккумуляторами, заряженными на 60 %. При уровне заряда аккумуляторов более 70 % ВА используется только для их подзарядки. При таком уровне заряда автобус может работать в режиме «чистого» электродвижения с выключенным ВА. При среднем уровне заряда аккумуляторов (от 40 до 70 %) ВА используется в режиме частичной нагрузки, достаточной для поддержания среднего уровня заряда. При падении уровня заряда ниже 40 % мощность ВА увеличивается настолько, чтобы можно было повысить уровень заряда аккумуляторов до среднего.

Автобусы DesignLine ECOSaver IV выпускаются в трех исполнениях: длиной 30, 35 и 40 футов (примерно 9,1, 10,7 и 12,2 м соответственно). В качестве накопителей энергии могут быть использованы свинцово-кислотные, никель-металлгидридные и ионно-литиевые аккумуляторы. Для этой же цели могут применяться суперконденсаторы. Для электродвижения используются два асинхронных электродвигателя типа Bosch Rexroth Idramate мощностью 120 кВт каждый. Бортовая система автоматики автобуса обеспечивает контроль и управление всеми элементами гибридной системы электродвижения, а система управления аккумуляторов — контроль и управление зарядом и разрядом аккумуляторов на уровне отдельных ячеек.

Экономия топлива в гибридных автобусах ECOSaver IV с микротурбинами вдвое превышает этот показатель по сравнению с обычными автобусами с дизельным приводом, составляя более 27 000 л в год.

По расчетам «DesignLine» пробег автобуса на одном галлоне дизельного топлива составляет семь миль (что соответствует расходу 33 л на километр).

Снижаются не только затраты на топливо, но и эксплуатационные расходы, так как система Capstone практически не требует обслуживания. Поскольку турбина, компрессор и генератор имеют общий вал, система имеет всего одну движущуюся часть. Благодаря использованию воздушных подшипников микротурбины не нуждаются в смазке. Система воздушного охлаждения исключает необходимость в радиаторе, водяном насосе, термостате, шлангах, приводных ремнях и внешних устройствах. К тому же благодаря системе рекуперативного торможения снижается стоимость эксплуатации тормозов. По расчетам «DesignLine», общие эксплуатационные расходы за срок службы автобуса должны сократиться на 40 %.

Микротурбина обеспечивает радикальное снижение выбросов NO_x без применения внешних средств очистки отработавших газов. Трогание с места происходит более плавно благодаря отсутствию трансмиссии. В режиме нулевых выбросов, т. е. при остановленном ВА, система работает фактически бесшумно. При работе ВА уровень наружного шума снижается по сравнению с дизельным автобусом на 75 %, а уровень внутреннего шума — на 100 %.

*Microturbines for Hybrid Buses
Diesel Progress North American Edition, July 2008*

МИКРОТУРБИНЫ ДЛЯ МУСОРНОГО ПОЛИГОНА ВО ФРАНЦИИ

В течение двух десятков лет на мусорном полигоне Mentaure в La Ciotat, живописном городке на средиземноморском побережье Франции, сжигали метан, образующийся в результате разложения отходов.

Тысячи кубометров метана, ежегодно образующиеся на свалках, давно уже не рассматриваются как бесполезные отходы. В городе La Ciotat, например, этот газ стал источником питания местной электростанции мощностью 1,4 МВт. Производимой ею электроэнергией хватает для энергообеспечения 2000 домов. В качестве первичных двигателей на электростанции используются 18 микротурбин «Capstone», работающих на получаемом со свалки метане, при этом город продает энергию в сеть. По оценке фирмы «Verdesis», занимающейся продажей турбин «Capstone» в Бельгии и Франции, 18 микротурбин мощностью 65 кВт каждая производят значительно меньше вредных выбросов по сравнению с поршневыми двигателями той же мощности.

Снижение выбросов углекислого газа и окислов азота в поршневых двигателях требует применения дорогостоящего оборудования. Но даже при наличии такого оборудования их выбросы более чем в 10 раз превышают аналогичные показатели для микротурбин «Capstone».

Микротурбины еще более выигрывают по экологическим показателям благодаря воздушным подшипникам, поскольку это означает, что они не нуждаются в смазочных маслах, охлаждающих жидкостях и других экологически вредных материалах.

С момента своего ввода в строй в июне 2007 г. на день написания этого материала наработка электростанции «Mentaure» превысила 4000 ч. Обычно топливный газ очистки не требует, однако в данном случае, учитывая специфику источника, фирма «Verdesis» спроектировала систему очистки газа от воды, сульфидов водорода и силиконов, содержащихся в мусорном газе.

Поскольку полигон «Mentaure» расположен в сухой местности, а его возраст свыше 20 лет, содержание метана в мусорном газе не превышает 30 %. Для сравнения можно сказать, что в аналогичный показатель для более новых полигонов, расположенных в не столь сухих местах, составляет более 50 %. Однако низкое содержание метана в данном случае не помешало использованию микротурбин.

Последние оказались не слишком чувствительны к колебаниям процента метана, что особенно важно для мусорных полигонов, где содержание метана в газе с возрастом обычно падает.

Поскольку в каждой микротурбине есть всего одна движущаяся часть, электростанция нуждается лишь в минимальном техобслуживании. Оно проводится раз в три месяца и занимает не более 20–30 мин, в течение которых проверяются воздушные и газовые фильтры, а также фильтр воздуха для охлаждения электроники. Таким образом, техобслуживание микротурбин по сравнению с другими типами двигателей, оказывается намного быстрее, проще и сопряжено с меньшими рисками.

Опыт, полученный при эксплуатации электростанции в Mentaure, побудил руководство «Verdesis Group» приступить к планированию постройки аналогичных электростанций на мусорных полигонах в Германии, Испании, Швейцарии, Австрии, Франции и Бельгии.

Во Франции уделяется большое внимание инновационным технологиям получения экологически чистой энергии. Страна предпринимает значительные усилия для ослабления зависимости от импорта нефти и газа, а также для снижения вредных выбросов. Использование мусорного газа позволяет продвинуться вперед для решения обеих задач.

*Microturbine Power for «Trashy» French Power Plant
Diesel progress international edition May-June 2008*

