

УДК 621.438

Е.Г. ЖУЛИНА, канд.ф.-м.н., доцент каф. «Автомобильный Транспорт», НГПУ им. К. Минина, e-mail: zhulina-1@yandex.ru

Ф.Е. КАЛЬНИЦКИЙ, канд.т.н., доцент каф. «Автомобильный Транспорт», НГПУ им. К. Минина, e-mail: kfe-01@mail.ru

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ АВТОНОМНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК НА ТРАНСПОРТЕ

E.G. Zhulina, F.E. Kalnickij

PROSPECTS OF APPLICATION OF AUTONOMOUS GAS-TURBINE PLANTS TRANSPORT

Статья содержит анализ современного состояния автономных энергетических установок малой мощности, выполненный в соответствии с научно-исследовательской работой кафедры «Автомобильный транспорт» НГПУ им.К.Минина. В работе приведен перечень преимуществ и недостатков автономных газотурбинных двигателей, рассмотрены их принципиальные схемы, представлен обоснованный набор инновационных решений в конструкциях таких двигателей.

Ключевые слова: автономные энергетические газотурбинные установки, микротурбина, коэффициент полезного действия, экономичность, утилизация теплоты отработавших газов.

The article contains analysis of modern state of Autonomous power units of installations of low power, made in accordance with the scientific-research work of the kaphaedra Automobile transport. The paper provides a list of advantages and disadvantages of autonomous gas-turbine engines, considered their principal schemes, proposed a valid set of innovative solutions in the design of such engines.

Key words: Autonomous energy gas-turbine installations, microturbine, efficiency, economy, utilization of heat of the exhaust gases.

Без какого-либо преувеличения можно утверждать, что в последние десятилетия в теплоэнергетике произошли кардинальные качественные изменения. Коэффициент полезного действия парогазовых установок, постепенно заменяющих традиционные конденсационные и теплофикационные турбины, сегодня достигает 65%. Количественную оценку происходящих изменений можно получить, сравнивая эффективность парогазовых и лучших традиционных установок, коэффициент полезного действия которых не превышает 40%.

Вместе с тем, широкий спектр требований, предъявляемых потребителями к качеству и стоимости энергообеспечения, разнообразие климатических, бытовых и промышленно-производственных условий деятельности потребителей, а также необходимость постоянной замены отслужившего энергогенерирующего оборудования делает неизбежным непрерывный ввод в действие автономных и мобильных энергетических установок малой мощности. Такие установки базируются, главным образом, на дизель-генераторах, газопоршневых установках и микротурбинах [1].

К наиболее важным областям применения микротурбинных энергетических установок можно отнести:

1. Медицинские учреждения, серверные комнаты и центры, промышленные предприятия.
2. Газораспределительные станции, вспомогательное оборудование при транспортировке газа и нефти.

3. Труднодоступные районы, в которых проводится разведка полезных ископаемых, и энергодефицитные районы нашей страны.

4. Резервирование энергогенерирующих мощностей для ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций.

Преимущества малоразмерных газотурбинных двигателей достаточно широко исследованы, в частности, и в отечественных разработках транспортных газотурбинных двигателей.

Приведём краткий перечень преимуществ малоразмерных газотурбинных двигателей [2,3].

1. Низкий уровень токсичности.
2. Многотопливность, включая возможность работы двигателя на смеси жидких топлив без переналадки топливной аппаратуры.
3. Низкие уровни шума и вибраций.
4. Быстрый запуск двигателя при низких температурах окружающей среды (время пуска на 25-40 минут меньше, чем у дизельного двигателя).
5. Существенно меньшая, чем у дизельного двигателя, теплоотдача в масло (зачастую охлаждающая жидкость в газотурбинной установке отсутствует вовсе).
6. Благоприятная для транспортного средства характеристика крутящего момента газотурбинного двигателя.
7. Значительно меньшая трудоёмкость эксплуатационного обслуживания.

Важное значение для автономных энергоустановок имеют высокая надёжность микротурбин, их высокая длительная работоспособность и способность длительно работать при эксплуатации на низких и очень низких режимах. Последнее качество микротурбин особенно значимо при эксплуатации автономных энергоустановок в условиях низких температур. В районах Крайнего Севера и Дальнего Востока нашей страны эксплуатация дизельных установок резко уменьшает ресурс двигателя.

Наряду с преимуществами малоразмерных турбин и микротурбин следует также отметить и их недостатки. К числу недостатков этих установок традиционно относят больший, чем у дизельных двигателей, удельный расход топлива и уменьшение экономичности таких установок при повышении температуры окружающей среды. Далее в этой статье будет приведен комментарий первого из этих двух недостатков. Необходимость такого комментария объясняется значительными достижениями, реализованными именно в автономных энергетических установках.

Приведенный обзор объясняет непрерывно повышающийся интерес к автономным энергетическим установкам и спрос на установки с использованием микротурбин.

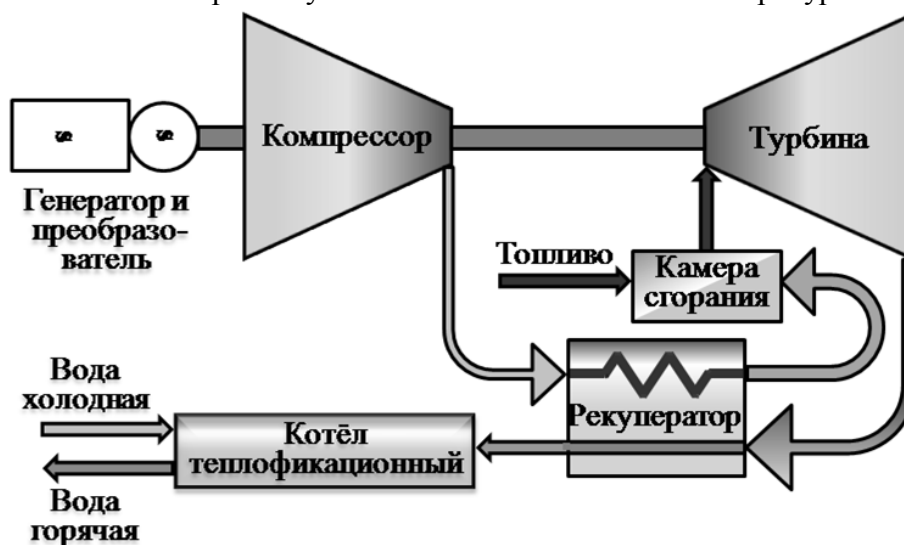


Рисунок 1 – Принципиальная схема автономной энергетической установки на базе микротурбины

Выполним обзор основных компоновочных и конструкторских решений современных энергетических газотурбинных установок. Этот обзор особенно интересен благодаря тому, что современная микротурбина аккумулирует в себе достаточно много инновационных решений.

На рисунке 1 приведена принципиальная схема автономной энергоустановки, на рисунке 2 – компоновочная схема микротурбины, а на рисунке 3 – компоновочная схема всей установки.

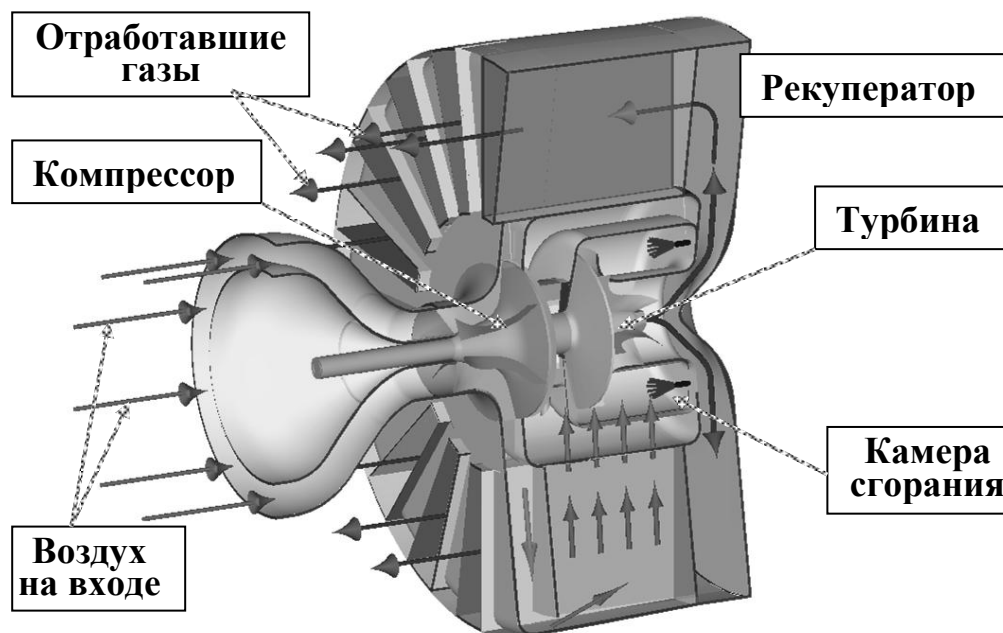


Рисунок 2 – Схема компоновки микротурбины

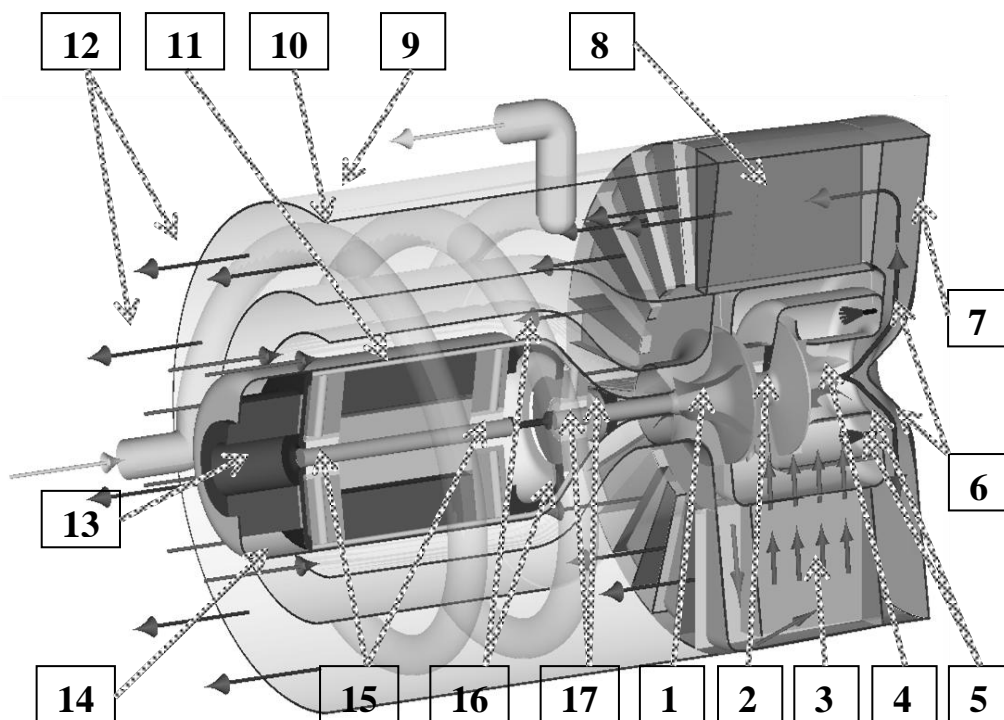


Рисунок 3 – Схема компоновки автономной энергетической установки на базе микротурбины: 1 – компрессор; 2 – подшипник радиальный воздушный; 3 – канал рекуператора воздушный; 4 – турбина; 5 – камера сгорания с форсунками; 6 – газ после турбины; 7 – реку-

ператор кольцевой; 8 – канал рекуператора газовый; 9 – котёл теплофикационный; 10 – змеевик котла; 11 – генератор; 12 – газы отработавшие; 13 – преобразователь электрического тока; 14 – воздух на входе в установку; 15 – подшипники генератора воздушные; 16 – каналы воздушные; 17 – подшипник воздушный радиально-упорный.

Изображённая автономная энергетическая установка (АЭУ) отличается наличием устройства, обеспечивающего преобразование тока переменной частоты, вырабатываемого генератором при разных частотах вращения ротора микротурбины, в постоянный ток, а затем преобразование постоянного тока в переменный с требуемой потребителю частотой. Ротор микротурбины, как правило, имеет большую частоту вращения, а в приведенной схеме установки ротор генератора имеет такую же частоту, и потому генератор имеет малые размеры, массу и малый момент инерции. Этим, а также отсутствием инерционного редуктора между микротурбиной и генератором объясняется высокая приёмистость АЭУ, изображённой на рисунке 3. Так выполнены многие современные автономные энергетические установки на базе микротурбин [1].

В современной практике используются также установки, имеющие редуктор между ротором микротурбины и электрогенератором. Так выполнены энергоустановки фирмы Ingersoll [1,4,5].

В этом случае сам генератор имеет большие размеры, а установка требует специальной системы автоматического регулирования, обеспечивающей малую зависимость частоты вращения ротора микротурбины от режима её работы. Такое решение является следствием отказа от достаточно сложной системы преобразования переменного тока изменяющейся частоты при изменении частоты вращения турбогенератора в переменный ток фиксированной частоты.

К числу важных достижений в создании автономных энергетических установок следует отнести реализацию комплексной утилизации теплоты отработавших в установке газов. Воздух из окружающей среды поступает в компрессор микротурбины, сжимается и транспортируется через теплообменник – рекуператор в камеру сгорания. В камеру сгорания непрерывно подаётся также и топливо. Горячие продукты горения расширяются в турбине энергоустановки, совершая механическую работу. Часть этой работы расходуется на сжатие воздуха компрессором, а часть преобразуется в электрическую энергию, вырабатываемую электрогенератором.

Воздух после компрессора нагревается в рекуператоре отработавшими в турбине газами, имеющими достаточно высокую температуру. Такая система утилизации теплоты отработавших газов увеличивает электрический коэффициент полезного действия микротурбины (27-32%). Этот эффект был достигнут благодаря созданному рекуператору с высокой тепловой эффективностью (80-90%). Высокая длительная работоспособность и стабильные характеристики рекуператора в процессе его эксплуатации подчёркивают научно-техническую значимость выполненной работы.

После рекуператора отработавшие газы микротурбины имеют относительно низкую температуру, однако они всё ещё обладают значительным количеством низкопотенциальной теплоты. Эта теплота используется в автономных энергетических установках для нагрева холодного теплоносителя в теплофикационном котле. Нагретый холодный теплоноситель в дальнейшем используется в производственных процессах или в бытовом отоплении.

Отработавшие в установке газы имеют температуру, близкую к температуре окружающей среды. Такое использование низкопотенциальной теплоты установки кардинальным образом увеличивает её теплофикационный коэффициент полезного действия (см. таблицу 1).

Оговоримся, авторам этой статьи не удалось найти информацию о стабильности тепловых и гидравлических характеристик теплофикационного котла АЭУ. Известно, что при низких температурах отработавших газов (100 - 130°C) на теплопередающей поверхности котла образуется слой сажи, который значительно уменьшает коэффициент теплопередачи и увеличивает гидравлическое сопротивление газотока. Этот процесс протекает особенно ин-

тенсивно при наличии в отработавших газах соединений серы, сажи и окиси углерода. Предположительно, эта проблема была решена благодаря малому содержанию этих веществ в отработавших газах микротурбины.

Комплексная утилизация теплоты отработавших газов микротурбины – сначала в регенеративном цикле двигателя, а затем в теплофикационном котле – значительно уменьшает разницу в эффективности газотурбинных автономных энергоустановок по сравнению с дизельными.

В приведенной на рисунке 3 компоновке автономной энергетической установки на базе микротурбины ротора турбины и генератора установлены на трёх радиальных воздушных подшипниках и в одном упорно-радиальном воздушном подшипнике [1,6,7, 8].

Использование воздушных подшипников в микротурбинах позволяет размещать подшипники даже в наиболее горячих зонах ротора установки и полностью отказаться от жидкостного охлаждения всей установки в целом. Эти факторы также относятся к числу преимуществ современных АЭУ на базе микротурбин.

Нельзя обойти вниманием и проблему токсичности выхлопа автономных энергетических установок. На протяжении многих последних десятилетий идёт упорная работа над уменьшением токсичности всех типов тепловых энергетических установок. Затрачиваются огромные усилия и средства, наблюдаются радикальные достижения, а проблема остаётся по-прежнему актуальной. И с этой точки зрения микротурбина обладает заметными достоинствами. Это объясняется прежде всего благоприятными условиями для создания качественной топливовоздушной смеси. Относительно большие габариты камеры сгорания микротурбины, очень большие коэффициенты избытка воздуха ($\alpha > 7$) – это предпосылки для обеспечения полного сгорания топлива и создания малотоксичной камеры сгорания.

В современных микротурбинах зачастую реализовано гомогенное горение топлива – тип горения, в котором жидкое топливо предварительно испаряется и превращается в газ, а затем образовавшийся газ перемешивается с воздухом в достаточно большом пространстве. Такого типа опытная камера сгорания в восьмидесятых годах прошлого века прошла успешные стендовые испытания на Горьковском автомобильном заводе. Эту камеру сгорания уже в то время отличало не только полное сгорание топлива, но и полное отсутствие сажи и малое количество окиси углерода в продуктах горения. В настоящее время в микротурбинах появляются ещё и каталитические камеры сгорания.

Приведенный в этом обзоре набор инновационных решений в конструкциях современных АЭУ не является достаточно полным, но и в таком виде он позволяет судить о масштабах и перспективах применения микротурбин в автономных энергоустановках. В таблице 1 приведены основные параметры некоторых современных микротурбинных энергетических установок [1].

Таблица 1 – Параметры современных микротурбинных энергетических установок

		Toyota	Capstone	Elliot	Turbec	Ingersol R
Масса	кг	-	3200	1860-2040	2200-3700	-
Мощность электрическая	кВт	50	200	100	105	250
Частота вращения компрессора	об/мин	80000	45000	68000	70000	45000
Частота генератора	об/мин	80000	45000	68000	70000	1500
Подшипники	-	Воздушные		Шариковые + скольжения	Шариковые	
Кпд электрический (суммарный)	-	26(<76)	34(-)	29(75)	30(77)	32(51)
Наибольшая температура газа	°С	940	-	926	950	925
Степень	-	3,5	<5,0	4,0	4,5	-

повышения давления						
Выбросы NO _x	ppm	<15	<9	<24	<15	9...15
Ресурс (до кап. ремонта)	час	48000 (12000)	100000 (60000)	72000 (24000)	60000 (30000)	80000 (-)

Как видим из таблицы 1, современные автономные энергетические установки на базе микротурбин имеют очень высокий ресурс, высокий суммарный (с учётом утилизации теплоты отработавших газов в теплофикационном котле) и низкий уровень токсичности отработавших газов. Ранее уже был приведен более полный перечень преимуществ таких энергоустановок.

Прогрессирующая потребность в автономных энергоустановках на базе микротурбин требует развития научно-технических работ в этом направлении. В нашей стране на Горьковском автомобильном заводе к началу перестройки был создан и прошёл всесторонние стендовые и дорожные испытания автомобильный газотурбинный регенеративный двигатель. Этот двигатель по своим параметрам, конструкторским и научно-техническим решениям несколько не уступал лучшим западным опытными образцам таких двигателей. Мы обладали и некоторыми приоритетами и лучшими решениями, в частности, в создании высокоэффективного работоспособного компактного регенератора и его системы уплотнения. К сожалению, в начале перестройки эти работы были прекращены.

Созданный в те годы Горьковским автомобильным заводом научно-технический задел может служить базой для развития работ по автономным энергоустановкам на базе микротурбин. Преемственность этих работ может быть продолжена, например, в области разработки математических моделей микротурбин и энергоустановок на их базе. Эта статья сотрудников кафедры «Автомобильный транспорт» НГПУ им.К.Минина знаменует начало этой работы.

В наших планах разработать полную математическую модель автономной энергетической установки во всём диапазоне режимов её работы. Предполагается исследовать одновальную микротурбину и двухвальную с регулируемым сопловым аппаратом тяговой турбины. На базе этой модели планируется создать структурную схему системы автоматического регулирования установки и разработать программу расчёта работы установки на переходных режимах, разработать оптимальный алгоритм работы системы регулирования, обеспечивающий высокое качество переходных процессов и возможно более быстрый приём полной нагрузки после работы на холостом ходу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Обзор и состояние развития современных газотурбинных установок малой мощности. – Санкт-Петербург: НТЦ «Микротурбинные технологии», 2011. – 46с./ (<http://stc-mtt.ru/wp-content/uploads/2011/05/0001x.pdf>)
2. Ефремов, А.С. Какой двигатель нужен современному танку?/ А.С.Ефремов // Техника и вооружение. – 2010. – №9. – С.12-17.
3. Кальницкий, Ф.Е. Опыт создания и эксплуатации малоразмерных регенеративных газотурбинных двигателей/ Ф.Е. Кальницкий, В.И. Лукьянов, В.Т. Маханёв // Авиационная техника. – 1992. – №3. – С.27-33.
4. James Watts. Microturbine Developments At Ingersoll-Rand Energy Systems. ASME Turbo Expo GT2005-69158, 2005.
5. U.S. Department of Energy. Final ATS Annual Program Review Meeting December 4-6, 2000 Alexandria, VA.
6. Micro-turbine generators. Edited by M.J.Moore. Professional Engineering. 2002. Printed in the USA.
7. Capstone Development Efforts. Matt Stewart. Capstone Engineering. IGTI – Atlanta.GA - June. 2003.

8. Advanced Microturbine Program. Capstone Turbine Corp. Jeff Willis. DOE DE-FC02-00CH11058. DER Peer Review. Washington, D.C., December 2005. Capstone Turbine Corp.

©Жулина Е.Г., Кальницкий Ф.Е., 2013