

УДК 621.438

## АВТОНОМНАЯ ДОЛГОРЕСУРСНАЯ МАЛООБСЛУЖИВАЕМАЯ ЗАМКНУТАЯ ГАЗОТУРБИННАЯ УСТАНОВКА, РАБОТАЮЩАЯ НА ОРГАНИЧЕСКОМ ТОПЛИВЕ

© 2012 А. Н. Арбеков

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

В работе представлены результаты разработки и испытаний опытного образца замкнутой газотурбинной установки мощностью 1...3 кВт, работающей на природном газе.

*Замкнутая газотурбинная установка, рекуператор, рекуперативный цикл, центробежный компрессор, центростремительная турбина, автономный потребитель.*

### Введение

В настоящее время потребность в энергоснабжении автономных необслуживаемых потребителей малой мощности, которая превышает 200 штук в год, покрывается в основном за счёт покупки энергетических установок за рубежом. Основным поставщиком такого оборудования является израильская фирма "Ormat Technologies inc", выпускающая паротурбинные установки единичной мощностью от 0,6 до 4 кВт, работающие на органическом рабочем теле, и ставшая практически монополистом на Российском рынке.

Основными конкурентами данных установок сегодня являются термоэлектрические генераторы как отечественного, так и зарубежного производства, которые заняли нишу от 0,16 до 1 кВт.

Верхняя часть диапазона перекрывается микрогазотурбинными установками открытого цикла американской фирмы "Carrstone Turbine Corporation" С-30, дефорсированными до мощности от 15 до 10 кВт. Если первые две установки характеризуются низким уровнем экономичности (КПД 3...5 %) и высокой ценой (около \$70000 1 кВт установленной мощности), то микротурбинная установка на номинальном режиме (30 кВт) имеет КПД 25...27 % и значительно дешевле (\$1600...\$1900 за 1 кВт).

### Опытный образец ЗГТУ

В качестве отечественной альтернативы ещё в 1990-е в МГТУ им. Н.Э. Баумана под руководством В.Л. Самсонова при участии ряда предприятий авиакосмической промышленности был создан конверсионный образец замкнутой газотурбинной установки (ЗГТУ) мощностью 1...3 кВт, работающей на природном газе и предназначенной для электро- и теплоснабжения радиорелейных станций (РРС) систем связи ОАО «Газпром».

Опытный образец модуля этой установки был разработан и испытан в кооперации НИИЭМ МГТУ им. Н.Э. Баумана, ОАО «НПО Наука» и ОАО «НПО Энергомаш». На рис. 1 показана принципиальная схема модуля ЗГТУ, а на рис. 2 - фотография её нетеплоизолированного вида в испытательном боксе ОАО «НПО «Энергомаш».

Образец наработал свыше 500 часов при более 150 циклах запуск-останов [1, 2]. Его КПД составляет 15 % при температуре газа при входе в компрессор 15°C и мощности установки, равной 1 кВт. Горелка нагревателя, спроектированная для работы на природном газе, удовлетворительно функционирует и на авиационном керосине [3].

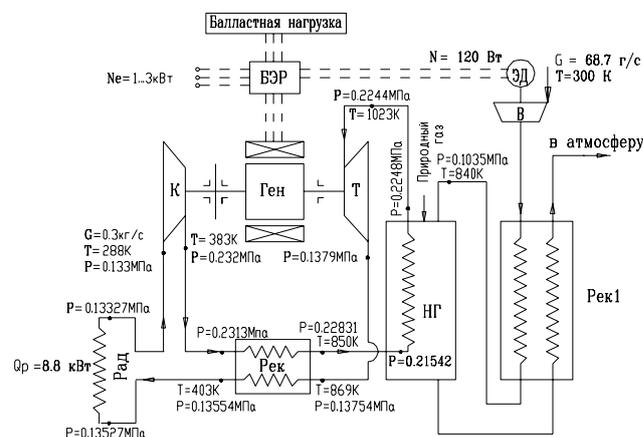


Рис. 1. Принципиальная схема опытного образца модуля ЗГТУ  $N_e = 1...3$  кВт, работающей на природном газе

Узлы и элементы модуля расположены в контейнере, имеющем размеры: длина 1,74 м, ширина 1,54 м и высота (по выхлопному патрубку) 4,0 м, а его компоновка, представленная на рис. 3, аналогична компоновке паротурбинной энергоустановки фирмы «Ормат», поскольку предполагалась их взаимозаменяемость, в том числе и по местам крепления к фундаменту РЛС.

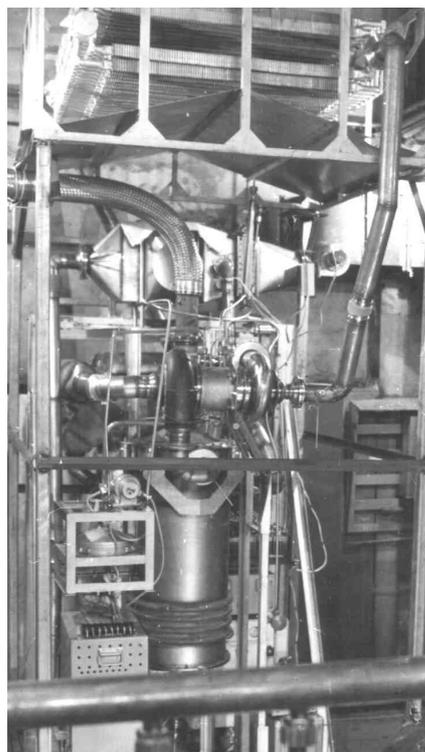


Рис. 2. Опытный образец ЗГТЭУ мощностью 1...3 кВт, работающий на природном газе в боксе ОАО «НПО «Энергомаш»

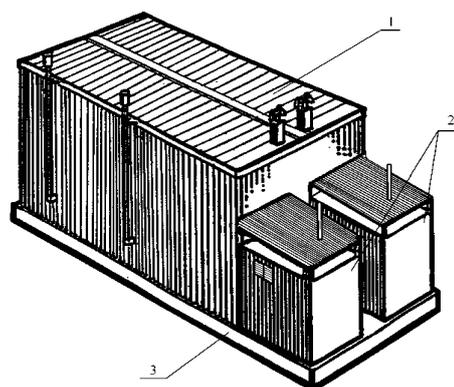


Рис.3. Компонентная схема ЗГТУ в составе аппаратной РРС: 1 – приборный контейнер; 2 – ЗГТУ; 3 – рама

Основным достоинством ЗГТУ является возможность выбора состава и молярной массы рабочего тела, а также давления в замкнутом контуре, что обеспечивает возможность создания мощного ряда установок в диапазоне мощностей от 1 до 20 кВт, закрывая тем самым нишу между паротурбинными и микрогазотурбинными установками. Сравнение энергетических установок представлено в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики установок

Наименование параметра	МГТУ, Россия	Ormat, Израиль	Capstone, США
Тип установки	ЗГТУ	ЗПТУ	ГТУ
Диапазон электрической мощности, кВт	1 - 15	0,2 – 4,0	10 – 30
Диапазон напряжений, В	220 В 50 Гц, 27 ... 120 В	27/120 В	150 / 480 В, 50...60 Гц
Температура воздуха, °С	-50...+35(+60)	-50...+50	- 50...+60
Вид топлива	Природный газ, авиационный керосин, дизель		
Ресурс работы, год	20	20	7
Наработка на отказ, ч	15000	30000	
КПД по электричеству, %	17,0	4,0	25,0
КПД по полной энергии, %	70	60	60
Расход природного газа, кг/ч	0,7	2,87	2,3
Масса, кг	860	2000	651
Габариты, м	2,0×1,8×2,6(4)	2,0 × 1,7 × 5,0	1,9 × 0,72 × 1,34
Время запуска при T <sub>окр</sub> = -50°С, мин	120, не более	120, не более	3
Частота и объем регламентных работ	1 раз в год, два дня		
Допуск на отклонение от вертикали	нет	да	нет
Давление в камере сгорания (топке)	атмосферное	атмосферное	0,35...0,50 МПа

Возможность применения ЗГТУ для решения указанных задач обусловлена хорошо разработанной элементной базой и опытом эксплуатации нескольких сотен тысяч авиационных, транспортных и стационарных газотурбинных двигателей и устано-

вок, некоторые из которых эксплуатируются свыше 30 лет и имеют работы до капитального ремонта 100 000 часов.

Длительный ресурс работы и надежность ЗГТЭУ могут быть оценены через опыт эксплуатации отечественных ГТУ и ГТД открытого цикла, наработка на отказ элементов и узлов которых составляет:

- газовые опоры 2 000 000 ч;
- турбины 100 000 000 ч;
- компрессоры 17 000 000 ч;
- генераторы переменного тока 6 000 000 ч;
- рекуператоры 5 000 000 ч;
- трубопроводы и арматура 100 000 000 ч;
- электрические системы 500 000 ч;
- электронная аппаратура 250 000 ч.

Следует отметить, что по таким позициям, как газовые опоры, рекуператоры и генераторы переменного тока, данные по наработке на отказ американских специалистов существенно выше, чем отечественных.

В качестве опорных систем блоков ТГК упомянутых ЗГТЭУ используются те же газовые опоры, что применяются в турбомашинах ОАО "НПО Наука", эксплуатируемые на самолетах Ту-204, Ил-96 в воздушной среде при том же температурном уровне. Они накопили тысячи циклов «запуск-останов», в наибольшей степени влияющие на ресурс опорных газодинамических систем. По статистике ресурс лепестков газовых опор вырабатывается после утонения на 60 мкм полиимидного покрытия их поверхностей. В основном это утонение происходит не в процессе работы подшипников, а при пуске-останове. Каждый цикл пуск-останов считается эквивалентным 1000 часов непрерывной работы. Поэтому в настоящее время ресурс работы газовых опор такого типа исчисляется десятилетиями. Эксплуатация в МГТУ более десятка агрегатов ЗГТСЭП с роторами на газовых опорах при работе на геликсеноновых смесях, криптона, неоне и аргоне подтвердила надёжную работу системы «ротор - газовые опоры».

В НИИЭМ МГТУ им. Н.Э. Баумана при участии ОАО «Аэроэлектромаш» разработан стенд для испытания на нейтральных газах центробежных компрессоров ЗГТЭУ мощностью от 0,5 до 10 кВт. На стенде испытываются ЦБК, работающие на геликсеноновой смеси, криптона, аргоне, неоне при скорости вращения до 70 000 об/мин, кото-

рая обеспечивается высокоскоростным электроприводом со статическим частотным преобразователем, а система сбора и обработки информации выполнена на базе быстродействующей ЭВМ с выводом на экран оператора. В НИИЭМ МГТУ им. Н.Э. Баумана разработана модельная матрица высокотемпературного пластинчато-ребристого теплообменника, выполненного из сплава 70НХБТЮ и способного работать при температуре 800°C. Компактность поверхности теплообмена с короткими прямыми смещёнными рёбрами, образующими эту матрицу, составляет ~ 2000 м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>.

Для создания серийного производства ЗГТУ необходимо выполнить отработку критических элементов энергоустановок, к которым относятся:

- центробежный высокооборотный малоразмерный компрессор, предназначенный для сжатия инертных газов и их смесей (степень повышения давления 1,6-2,4 в рабочей точке);
- высокотемпературная центростремительная турбина (температура газа перед турбиной 1200 – 1500 К);
- высокотемпературные газодинамические лепестковые подшипники;
- высокооборотный, высокочастотный генератор трёхфазного переменного тока с ротором на редкоземельных постоянных магнитах, способный работать при повышенных температурах (до 500°C);
- пластинчато-ребристые рекуператоры из жаропрочных материалов;
- система управления и регулирования ЗГТУ;
- система отвода теплоты.

### **Определение параметров мощностного ряда ЗГТУ**

Создание мощностного ряда ЗГТУ возможно за счёт изменения массового расхода, молярной массы газа и температуры газа перед турбиной. В качестве исходных данных приняты параметры опытно-промышленного образца ЗГТУ мощностью в диапазоне от 1 до 3 кВт, работающей на органическом топливе, которые представлены в табл. 2.

Степень повышения давления, соответствующая максимальному значению КПД, равна 1,75. Выбор степени повышения давления однозначно определяет все параметры установки при заданных исходных данных.

Таблица 2. Исходные данные

№ п.п.	Наименование параметра	Размерность	Значение
1	Молярная масса рабочего тела	кг/кмоль	83,8
2	Температура перед компрессором	К	313
3	Температура перед турбиной	К	1033
4	Степень рекуперации	-	0,95
5	Коэффициент сохранения давления	-	0,94
6	КПД турбины	-	0,88
7	КПД компрессора	-	0,78
8	Относительные перетечки рабочего тела	-	0,02

Для изучения возможности создания мощностного ряда ЗГТУ выполнены расчёты циклов для номинальной мощности 3, 5 и 7,5 кВт, при возможности двукратного форсирования по необходимости. В качестве рабочих тел рассмотрены геликсеноновые смеси с молярными массами 83,8 кг/кмоль (криптон) и 39,95 кг/кмоль (аргон). На рис. 4 представлены результаты определения расхода рабо-

чего тела через контур в указанных условиях. Зависимость расхода рабочего тела с молярной массой 39,95 кг/кмоль при выходной мощности 6 кВт практически совпадает с зависимостью для рабочего тела с молярной массой 83,8 кг/с при мощности 3 кВт, что свидетельствует о возможности повышения мощности и таким путём.

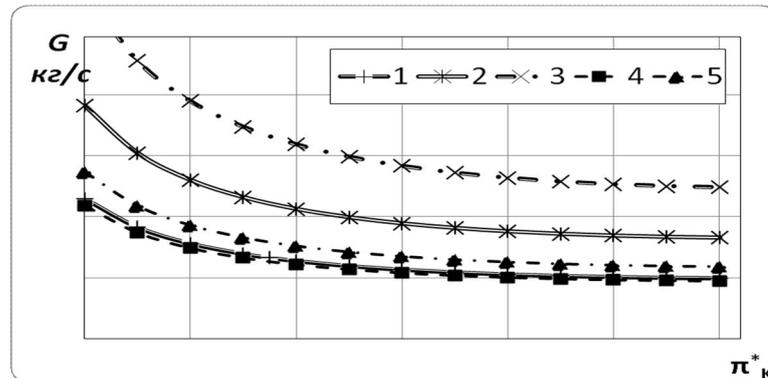


Рис. 4 Влияние молярной массы и мощности установки на расход рабочего тела: 1 – 83,8 кг/кмоль, 3 кВт; 2 – 83,8 кг/кмоль, 5 кВт; 3 – 83,8 кг/кмоль, 7,5 кВт; 4 – 39,95 кг/кмоль, 6 кВт; 5 – 39,95 кг/кмоль, 7,5 кВт

Соответственно расходам изменяются и тепловые мощности нагревателя газа, рекуператора и конечного холодильника, как это показано на рис. 5, обозначения к которому приведены в табл. 3.

Из представленных на рис.5 данных видно слияние кривых для ЗГТУ одной и той же мощности, но с разными рабочими телами, что свидетельствует о возможности подбора рабочего тела для ЗГТУ одинаковой мощности, но разных массогабаритных характеристик. Полученные результаты сведены в табл. 4.

### Заключение

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

1. Создание мощностного ряда ЗГТУ, работающих на органическом топливе, возможно:

- 1) увеличением массового расхода рабочего тела в контуре;
- 2) снижением молярной массы рабочего тела;
- 3) смещением рабочей точки в сторону максимальной работы цикла.

2. Снижение молярной массы рабочего тела требует одновременного повышения давления в контуре, приводит к необходимости увеличения частоты вращения ротора и ограничено термпрочностными свойствами конструкционных материалов.

3. Увеличение массового расхода рабочего тела осуществляется повышением давления в контуре, что приводит к некоторому снижению эффективности теплообменного оборудования.

Таблица 3. Обозначения к рис. 5

№ п/п	Позиция на рис. 5	Молярная масса, кг/кмоль	Мощность, кВт	Теплообменный аппарат
1	1	83,8	3	нагреватель газа
2	2	83,8	3	концевой холодильник
3	3	83,8	3	рекуператор
4	4	83,8	5	нагреватель газа
5	5	83,8	5	концевой холодильник
6	6	83,8	5	рекуператор
7	7	83,8	7,5	нагреватель газа
8	8	83,8	7,5	концевой холодильник
9	9	83,8	7,5	рекуператор
10	10	39,95	6	нагреватель газа
11	11	39,95	6	концевой холодильник
12	12	39,95	6	рекуператор
13	13	39,95	7,5	нагреватель газа
14	14	39,95	7,5	концевой холодильник
15	15	39,95	7,5	рекуператор

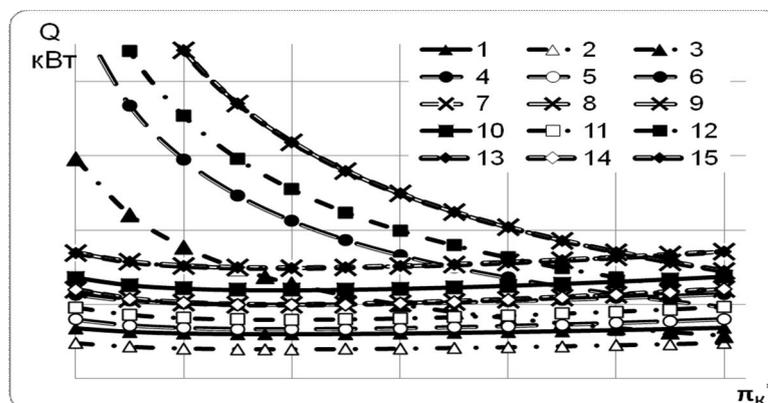


Рис. 5 Тепловые мощности нагревателя газа, рекуператора и концевого холодильника при различных молярных массах газа и мощностях ЗГТУ

Таблица 4. Параметры ЗГТУ различной агрегатной мощности

№ п/п	Наименование параметра	Размерность	Значение				
			3,0	5,0	7,5	6,0	7,5
1	Молярная масса рабочего тела	кг/кмоль	83,8			39,95	
2	Мощность	кВт	3,0	5,0	7,5	6,0	7,5
3	Тепловая мощность нагревателя газа	кВт	11,9	19,9	29,8	23,9	29,8
4	Расход рабочего тела	кг/с	0,255	0,425	0,637	0,243	0,304
5	Тепловая мощность рекуператора	кВт	25,5	42,5	63,7	51	63,7
6	Тепловая мощность концевого холодильника	кВт	7,93	13,2	19,8	15,9	19,8
7	Мощность турбины	кВт	10,6	17,6	26,5	21,2	26,5
8	Мощность компрессора	кВт	6,73	11,2	16,8	13,5	16,8

4. Смещение рабочей точки в сторону максимальной работы требует соответствующего увеличения частоты вращения ротора, приводящего к росту напряжений растяжения в деталях ротора.

Опыт, накопленный сегодня в авиационном, транспортном и стационарном газотурбостроении, а также технологии, разработанные при создании опытных образцов космических и наземных ЗГТУ в России, по-

зволяют рассчитывать на восполнение имеющегося пробела в диапазоне мощности от 3 до 15 кВт рядом автономных отечественных ЗГТУ, работающих на органическом топливе.

Автор благодарит сотрудников МГТУ имени Н.Э. Баумана, МЭИ, ОАО «НПО Энергомаш имени В.П. Глушко», ОАО «Наука», ОАО «Аэроэлектромаш» за участие в работах и обсуждение результатов.

### **Библиографический список**

1. 1-й опытный образец замкнутой газотурбинной энергоустановки электрической мощностью 1...3 кВт, работающей на природном газе, для радиорелейных систем связи магистральных газопроводов, расположенных в отдаленных районах страны [Текст]: отчёт НИИЭМ МГТУ им. Н.Э. Баумана по н/и теме Т1012. Т. 1. Пояснительная записка, 1997.
2. 1-й опытный образец замкнутой газотурбинной энергоустановки электрической мощностью 1...3 кВт, работающей на природном газе, для радиорелейных систем связи магистральных газопроводов, расположенных в отдаленных районах страны [Текст]: отчёт НИИЭМ МГТУ им. Н.Э. Баумана по н/и теме Т1012. Т. 2. Иллюстрации. Ч. 1 и 2, 1997.
3. Исследование замкнутой газотурбинной энергоустановки электрической мощностью,  $N_e = 1...3,5$  кВт, работающей на керосине, для радиорелейных систем связи [Текст]: отчёт НИИЭМ МГТУ по н/и теме ГЭТ-1/91, 1991.
4. Разработка, изготовление и испытание регулируемого статического частотного преобразователя для питания высокоскоростного электропривода стенда для испытания центробежного компрессора, работающего на нейтральных газах [Текст]: отчёт НИИЭМ МГТУ по н/и теме Т1017, 1997.
5. Перспективная ЗГТЭУ  $N_e=1...4$  кВт, работающая на органическом топливе [Текст] / Ю.С. Елисеев, В.Ю. Николенко, С.М. Романов [и др.] // Тез. докл. 11-й Всерос. Межвуз. науч. – техн. конф. «Газотурбинные и комбинированные установки и двигатели», МГТУ им. Н. Э. Баумана, 15...17 ноября 2000. - М., 2000. - С. 17-18.
6. Михеев, В.А. Опыт эксплуатации автономных источников электропитания радиорелейных станций систем связи магистральных газопроводов ОАО "Газпром" и требования к характеристикам их энергоустановок [Текст] / В.А. Михеев // Тез. докл. 11-й Всерос. Межвуз. науч. – техн. конф. «Газотурбинные и комбинированные установки и двигатели», МГТУ им. Н. Э. Баумана, 15...17 ноября 2000. - М., 2000. - С. 118.
7. Бачурин, Б.Л. Опыт эксплуатации энергоустановки фирмы «Ормат» в качестве автономного источника электропитания станций радиорелейных линий предприятий Минсвязи РФ [Текст] / Б.Л. Бачурин, А.И. Ногтев // Тез. Докл. 10-й Всерос. межвуз. науч. – техн. конф. «Газотурбинные и комбинированные установки и двигатели», МГТУ им. Н. Э. Баумана, 19...21 ноября 1999. – М., 1999. - С. 150-151.
8. Proposal. Advanced closed cycle vapor turboalternator USSR technology transfer. Telecom Energy International, 1989.

## **OFF-LINE LONG-LIFE UNSERVICE CLOSE GAS ORGANIC FUEL-POWERED TURBINE**

© 2012 A. N. Arbekov

Bauman Moscow State Technical University

The results of design and tests experimental facility of close gas organic fuel-powered 1...3 kilowatt turbine, main characteristics and prospects of development were presented.

*Closed gas turbine, recuperator, centrifugal compressor, centripetal turbine, off-line user.*

### **Информация об авторах**

**Арбеков Александр Николаевич**, доктор технических наук, доцент, заведующий отделом, Московский государственный технический университет имени Баумана. E-mail: [arbekov@power.bmstu.ru](mailto:arbekov@power.bmstu.ru). Область научных интересов: замкнутые газотурбинные установки, термодинамические циклы, схемы газотурбинных установок, газодинамика.

**Arbekov Alexander Nikolaevich**, Doctor of Technical Sciences, associate professor, Head of department, Bauman Moscow State Technical University. E-mail: [arbekov@power.bmstu.ru](mailto:arbekov@power.bmstu.ru). Area of research: close gas turbines, thermodynamic cycles, schemes of gas turbines, gas dynamic.