

Про створення автономних джерел електроенергії на основі мікрогазотурбінних установок (μГТУ) з керамічними конструкційними матеріалами у гарячому тракті. Створення мультимодульної установки потужністю 30 кВт на основі 15 модулів потужністю по 2 кВт вирішує проблеми матеріаломісткості, надійності, ефективності та екологічності

Ключові слова: автономні джерела електроенергії, мікро одиниця газової турбіни, гарячий пень, одиниця мультимодуля

О создании автономных источников электроэнергии на основе микрогазотурбинных установок (μГТУ) с керамическими конструкционными материалами в горячем тракте. Создание мультимодульной установки мощностью 30 кВт на основе 15 модулей мощностью по 2 кВт решает проблемы материалоемкости, надежности, эффективности и экологичности

Ключевые слова: автономные источники электроэнергии, микро единица газовой турбины, горячий пень, единица мультимодуля

On developing autonomous electric power sources on the base of micro gas turbine units (μGTU) with ceramic constructional materials in the hot path. Developing multi-module unit with capacity 30 kW made up of 15 modules with capacity 2 kW each which solve the problems of material consumption, reliability, efficiency, and ecological compatibility

Key words: autonomous electric power sources, micro gas turbine unit, the hot path, multi-module unit, material consumption, reliability

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫЕ МУЛЬТИМОДУЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ КЕРАМИЧЕСКИХ МИКРОГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК

А. В. Сударев

Доктор технических наук, профессор, академик АТН,
генеральный директор*

А. С. Молчанов

Заместитель генерального директора*

А. А. Сурьянинов

Главный конструктор*

*ООО «Научный Центр «Керамические Двигатели» им. А.М.
Бойко»

пр. Полюстровский, д. 15, корп. 2, г. Санкт-Петербург, 195221

Контактный тел: 07-812-225-34-53

E-mail: soudarev@boykocenter.spb.ru

В. Г. Конаков

Доктор химических наук, профессор, генеральный директор

ООО «НТЦ «Стекло и керамика»

пр. Полюстровский, д. 15, корп. 2, г. Санкт-Петербург, 195221

Контактный тел: 07-812-225-77-87

konakov@mail.wplus.net

Участившиеся техногенные катастрофы, вызывающие длительные перерывы в поставке электричества и тепла тысячам потребителей вызвали развитие систем автономных энергетических микроисточников (АЭМ), усиливающих независимость потребителя от различных социально-экономических обстоятельств. АЭМ необходимы для магистральных газопроводов, коммунального сектора, робототехники, всех видов транспорта, микролетательных аппаратов, авиационной и космической техники [1,2]. Требования оптимальности АЭМ сводятся к высокой удельной мощности, т.е. к максимальной экономичности при минимальных массе и объеме. Представленная на рис. 1 зависимость удельной массовой плотности энергии E_m от удельной массовой

мощности N_m для различных видов автономных энергетических источников убедительно показывает, что наилучшее сочетание этих показателей имеют системы на основе микрогазотурбинных установок (μГТУ) [3-5].

Концепция создания μГТУ основывается на известном природном законе трехмерного пространства: «Если линейные размеры (D) объекта изменяются в (n) раз, то поверхности (F) его изменяются в (n^2) раз, а объемы (V) и массы (M) – в (n^3) раз», из которого применительно к энергетическим двигателям (мощностью $N-F$) следует: «Если при одинаковых начальных условиях уменьшить масштаб энергетического двигателя в (n) раз, то его удельная мощность ($кВт/кг$, $кВт/л$) в (n) раз увеличится».

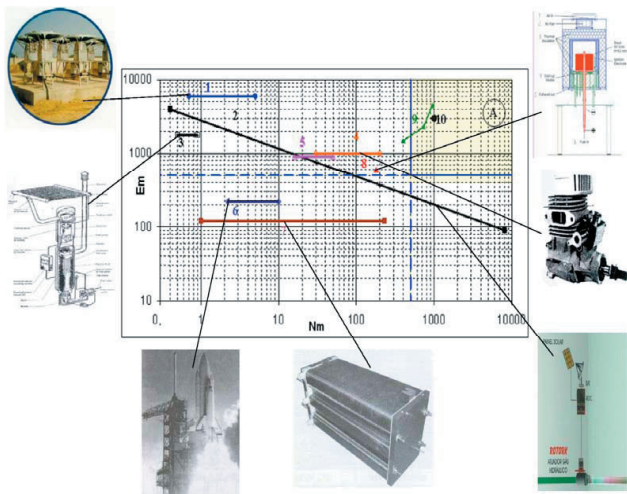


Рис. 1. Зависимость удельной массовой плотности энергии E_m (Вт·ч/кг) от удельной массовой мощности N_m (Вт/кг) для различных видов автономных энергетических источников

Обозначения: 1 – термоэлектрические генераторы; 2 – фотоэлектрические солнечные батареи; 3 – установки ORMAT; 4 – микродвигатели внутреннего и внешнего сгорания; 5 – твердополимерные топливные элементы; 6 – твердооксидные топливные элементы; 7 – аккумуляторные батареи; 8 – сверхкомпактные топливные элементы типа Spirocell; 9- μ ГТД простого цикла по проекту Massachusetts Institute of Technology (MIT) и Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd (IHI); 10- μ ГТД с регенерацией по проекту MIT.

Сравним удельные массовые мощности N_{em} двигателей 1 и 2 при $D_1 = mD_2$:

$$N_{em1} = \frac{N_{e1}}{M_1} = \frac{m^2 N_{e2}}{M_2 m^3} = \frac{N_{e2}}{m M_2} = \frac{N_{em2}}{m}; \text{ или } N_{em2} = m N_{em1}. \quad (1)$$

Видно, что уменьшая мощность двигателя в 10 раз, его удельная мощность в 10 раз возрастает, т.е. при одинаковых начальных условиях многократно снижается как стоимость установленной мощности, так и стоимость производимой им электрической и тепловой энергии. Конечно, начальные условия далеко не одинаковы для двигателей разного масштаба (прежде всего, коэффициента полезного действия (КПД) турбомашин, электрогенераторов). Более точный анализ [6] показывает, что показатель степени в этом законе должен быть не 3, а от 2,6 до 2,8, т.е. при $m=10$ можно рассчитывать на пяти-шести кратное увеличение удельной мощности двигателя.

Достижение высокого КПД цикла μ ГТУ зависит от многих факторов: выбора базового термодинамического цикла, аэродинамического и механического совершенства узлов и т.д. В настоящее время совершенствование μ ГТУ неразрывно связано с увеличением температуры на входе в турбину (ТИТ). Но рост ТИТ требует введения охлаждения горячих металлических узлов проточной части турбины, что практически ограничивает абсолютную величину КПД и ресурс металлических деталей. Применение в таких μ ГТУ конструкционных керамических материалов, позволяет снять указанные противоречия, а также существенно снизить выбросы оксидов азота и углерода и создать низкотоксичную μ ГТУ.

Повышение экономической эффективности, экологичности и надежности μ ГТУ может быть достигнуто при применении следующих разработанных и испытанных конструктивных инноваций:

- безлапаточного типа микротурбомашин, позволяющего устранить резко возрастающее негативное влияние на их газодинамическую эффективность протечек и перетечек рабочего тела через зазоры между роторными и статорными элементами турбомашин;

- керамической микрокамеры сгорания без разделения ее воздушных трактов с разными законами радиального изменения закрутки встречно-смещенных струй, что дает возможность снизить гидравлические потери при проведении процессов горения и вторично-госмесеобразований обеспечить эмиссию менее 5 ppm (при 15% кислорода) оксида углерода СЩ – на пусковых режимах, оксидов NO_x – на номинальном;

- рекуперативного микровоздухоподогревателя с турбулизацией подслоя ламинарного течения вдоль всей поверхности обеих сторон стенок теплообменной матрицы, за счет чего суммарное сопротивление воздухоподогревателя по газовому и воздушному трактам уменьшается более чем на 25% (с 8 до 6% при степени регенерации 86%);

- микроэлектрогенератора, статорная и роторная части которого встроены в статорные и роторные части турбомашин так, что электрический КПД микроэлектрогенератора приближается к 100%.

На рис. 2 представлен продольный разрез и основные керамические детали и узлы разрабатываемой (электрический КПД 28 %) рекуперативной керамической μ ГТУ (МЭМС F/E-BC2) мощностью 2 кВт и ТИТ = 1350°C.

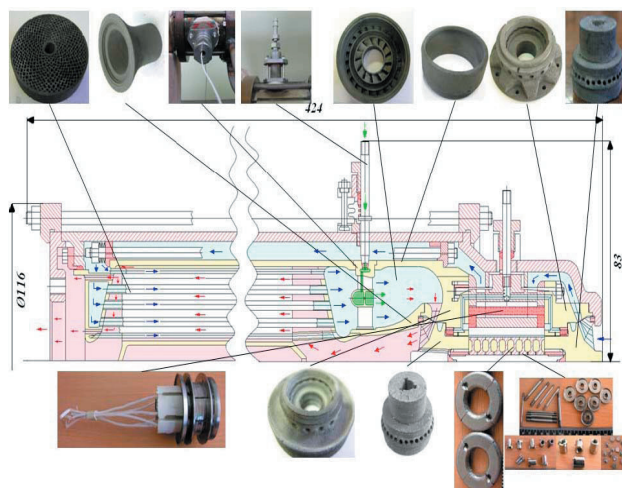


Рис. 2. Керамическая МЭМС F/E-BC2

Одна из самых сложных задач при создании МЭМС F/E-BC2 – разработка инновационных материаловедческих (лазерносинтезируемый кермет, безусадочная керамика), технологических (отказ от алмазного инструмента, диффузионная сварка, полная автоматизация изготовления) и конструктивных (туннельные турбины, матрично-кольцевые рекуператоры, встроенные электрогенераторы) концепций успешно решается при совместной работе ООО «Бойко Центр» и ООО «Стекло и Керамика».

При этом создание более мощной установки может быть основано простым объединением нескольких подобных μ ГТУ в едином мультимодульном блоке.

В табл. 1 сравниваются одинаковые по мощности установки - μ ГТУ С30 фирмы Capstone и мультимодульной установки из 15 газотурбинных керамических МЭМС F/E-BC2 мощностью по 2 кВт каждая.

Таблица 1

№	Фирма (ГТУ) Параметр	Capstone	Boyko Center
1	Мощность, кВт	30	2×15=30
2	Электрический КПД, %	28±2	28±1
3	Эмиссия NOx, ppm (при 15% O ₂)	<9,0	<5,0
4	Размеры (L×H×B), или ØD×L, мм	1900×1344×714	(Ø116×424)×15
5	Объем, м ³	1,823	(0,0045×15)= 0,0672×1,5 = 0,102
6	Масса, кг	578	6×15= 90
7	Удельная мощность	массовая, Вт/кг	62,8
8		объемная, Вт/л	16,46
			444

Видно, что при одинаковой мощности, эффективности и экологичности мультимодульная установка 15 F/E-2BC более чем в 6 раз легче и более чем в 18 раз компактнее, чем выполненная в виде одного двигателя Capstone C30.

Таким образом, достоинства многомодульных энергетических установок (ЭУ) на основе керамических μ ГТУ заключаются в:

- увеличении автономности воздушного, морского, автомобильного, железнодорожного и других видов транспорта;
- устранении необходимости в простоях для ремонта ЭУ, поскольку любой модуль можно заменить на запасной;
- резком увеличении среднего КПД за период эксплуатации ЭУ, так как изменение мощности ЭУ осуществляется включением-отключением модулей, работающих всегда на номинальном наиболее экономичном режиме модуля;
- существенном упрощении системы управления, регулирования и защиты;
- повышении пожаро - и взрывобезопасности μ ГТУ, так как модули работают на газовой смазке;
- упрощении системы запуска, торможения, реверсирования, накопления энергии, обеспечения пиковых нагрузок;
- в большинстве случаев проектирование ЭУ может быть сведено к определению числа модулей и их

компоновке и привязке к системам подвода-отвода рабочего тела, энергоносителей, контроля и т.д. в конкретных условиях заданного пространства;

- и самое главное, в результате всего перечисленного, значительно сократятся затраты на изготовление (материалы, оборудование, рабочая сила, помещения, транспортировка, инструмент, стелды и т.д.) и эксплуатацию (ремонт, обслуживание, диагностика, запасные части и т.д.), а следовательно и на вырабатываемую установкой энергетическую и тепловую энергию.

Выводы

1. Создание конкурентоспособных высокоэффективных и экологически чистых автономных источников электроэнергии на основе микрогазотурбинных установок (μ ГТУ) требует повышения температуры на входе в турбину и применения керамических конструкционных материалов в горячем тракте μ ГТУ.

2. Создание мультимодульной установки мощностью 30 кВт на основе 15 керамических модулей μ ГТУ мощностью 2 кВт каждый, позволяют решить проблему надежности, обеспечить снижение массы более чем в 6 раз, объема примерно в 18 раз при постоянном уровне коэффициента полезного действия в диапазоне мощностей 10 – 100 % от номинала, обеспечить эффективность и экологичность на уровне лучших зарубежных аналогов.

Литература

1. Akulov Yu.P et al., Problems of minituarization of airspace devices of planerary protection. Materials of Science-Engineering Workshop "Problems of minituarization in the aviation and airspace technique". International Festival of Pilot Groups (Zhukovsky town, Moscow region, Russia), 13.08.2004, p 10.
2. Shustov A.V. et al., Microtechnique and aviasystems. Abstract. Там же pp. 2-3.
3. Epstein, A., 1999, Microturbomachery, United States Patent No 5.923.940, 55p.
4. Isomura, K., "Feasibility Study of a Gas Turbine at Micro Scale", 2001, ASME, 2001-GT-101, New Orleans, LA, p.8.
5. Фокин Г.А., Применение автономных химических и нетрадиционных источников электрической энергии для энергообеспечения линейных потребителей магистральных газопроводов и газораспределительных станций, Научно-технические ведомости СПбГПУ 4-1(89) 2009, стр. 131-140.
6. Г.С. Скубачевский, Авиационные газотурбинные двигатели. Конструкция и расчет деталей, М.: «Машиностроение», 1974 г., 520 с.
7. www.capstoneturbine.com.- Фокин.