Экспериментальное исследование характеристик ступени малоразмерного центробежного компрессора

08, август 2012

DOI: 10.7463/0812.0432308

Арбеков А. Н., Новицкий Б. Б.

УДК 621.438

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

novitskiybronislav@gmail.com

Введение

Создание автономных маломощных многоцелевых энергетических установок, предназначенных для электро-, тепло- и холодоснабжения автономных потребителей является основой развития систем распределенной энергетики, позволяющей избавиться от возникающих потерь, при передаче электроэнергии на значительные расстояния, особенно в труднодоступные районы. Для решения указанной проблемы может быть использована замкнутая газотурбинная установка, работающая на органическом топливе и способная работать на различных рабочих телах. Автономные энергетические установки на базе ЗГТУ являются развитием космических энергосистем перспективы которых описаны в докладе А.И. Леонтьева и В.Л. Самсонова «Космические солнечные замкнутые газотурбинные энергодвигательные установки» на XI Всероссийской межвузовской научно-технической конференции «Газотурбинные и комбинированные установки и двигатели» Идеология автономной наземной ЗГТУ представлена в докладе «Блок турбогенератора-компрессора опытных образцов космической и наземной ЗГТЭУ $N_e = 1...3$ кВт» С.В. Голубевым и В.Л. Самсоновым на X Всероссийской межвузовской научно-технической конференции

«Газотурбинные и комбинированные установки и двигатели». ЗГТУ содержит ряд критических узлов (центростремительная турбина, газодинамические опоры ротора, высокочастотные, высокоскоростные генераторы, высококомпактные рекуперативные теплообменные аппараты, газонагреватели и концевые охладители газа), одним из которых является центробежный компрессор. Данная работа является продолжением исследований, представленных в докладе В.С. Бекнева и А.Н. Арбекова «Расчёт, проектирование, изготовление и испытание усовершенствованной ступени центробежного компрессора блока ТК 1-го опытного образца ЗГТЭУ $N_e = 1 \dots 3$ кВт, работающей на органическом топливе» представленным на конференции «Будущее машиностроения России 2009», но на другом рабочем теле, что позволяет получить полную картину характеристик колеса компрессора на всех применяемых в ЗГТУ рабочих телах. Исследование характеристик малоразмерного центробежного компрессора, работающего на смеси инертных газов с высокой молярной массой, представляет собой сложную научно-техническую задачу, решение которой возможно при использовании соответствующего оборудования и методики.

Стенд исследований характеристик ступеней малоразмерных ЦБК

Определение характеристик малоразмерной ступени ЦБК (рисунок 1) проводится в НИИ ЭМ МГТУ им. Н.Э. Баумана на модернизированном стенде, специально созданном в рамках работы [2], гидравлическая схема которого представлена на рисунке 2. Рабочее тело сжимается в ступени исследуемого ЦБК поз. 1 и подается в напорный трубопровод с электроприводной дроссельной заслонкой поз. 4, служащей для изменения гидравлического сопротивления тракта, откуда поступает в

водоохлаждаемый газоохладитель поз. 5, а затем через сопло Вентури поз. 6 возвращается на всас ЦБК.

Приводом рабочего колеса компрессора служит высокооборотный электродвигатель на постоянных самарийкобальтовых магнитах разработанный и изготовленный ОАО «Аэроэлектромаш».

Рабочее колесо ЦБК установлено роторе электропривода поз 9, к которому подводится трехфазный электрический ток переменной частоты от регулируемого статического частотного преобразователя (РСЧП) фирмы «Дельта» (Тайвань) мощностью 45 кВт поз. 10, запитываемого от трехфазной электрической сети переменного тока напряжением 380 В через автомат безопасности. Ротор вращается в двух опорных и одном упоре газодинамических подшипниках.

Рис. 1. Рабочее колесо малорасходного центробежного компрессора

Охлаждение статора электродвигателя осуществляется проточной водой, которая поступает по трубопроводу через вентиль. В охладитель газа вода поступает по трубопроводу с запорно-регулирующей арматурой. Вспомогательный охладитель газа служит для отвода теплоты от газа поз 2., идущего на охлаждение подшипниковых узлов и ротора.

Рис. 2. Принципиальная схема стенда для экспериментального исследования ступени ЦБК: 1 – ступень центробежного компрессора; 2 – вспомогательный охладитель газа; 3, 7 – байпасные трубопроводы, системы охлаждения подшипников; 4 – дроссельная заслонка; 5 – концевой охладитель; 6 – сопло Вентури; 8 – жидкостная система охлаждения статора электродвигателя; 9 – электродвигатель; 10 - регулируемый статический частотный преобразователь

При определении характеристик ступени компрессора требуется контролировать большое количество данных, которые, необходимо считывать и накапливать. Для этого экспериментальный стенд оборудован системой измерений, сбора и обработки информации. Система измерений состоит из термопар типа ХК (хромель-капель), датчиков давления ИКД 27 Дф, сигнальных линий и платы восьмидесятиканального коммутатора и аналого-цифрового преобразователя М6225. Для обработки информации использована программа, написанная в среде LabVIEW и позволяющая отображать на экране ПК показания на шкалах виртуальных приборов в реальном времени. Программа позволяет оператору визуально контролировать критические аспекты эксперимента (показания датчиков температур опор электрокомпрессора), и определять основные характеристики ЦБК (расход, степень повышения давления). Накопление и запись показаний датчиков по мере проведения эксперимента происходит автоматически в текстовый файл. В файл фиксируется текущее время, положение дроссельной заслонки, перепад давлений на сопле Вентури, давления и температуры перед соплом, до и за ступенью ЦБК, а так же температур радиальных и осевой газодинамических опор, переднего, среднего заднего корпусов электрокомпрессора.

Методика обработки эксперимента на воздухе.

Основными параметрами ступени ЦБК, которые необходимо получить, являются расход газа, степень повышения давления (напор), частота вращения рабочего колеса, подведенная работа, к.п.д. ступени.

Для определения расхода газа в контуре используется длинное сопло Вентури, которое представлено на рисунке 3. Отводы от сопла подключают к дифференциальному манометру. Расход определяется выражением [3]

$$G = \frac{C \cdot A_2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \text{del}P_c}{\rho}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}},$$

где

$$\rho = \frac{\text{del}P_0 + P_{\text{атм}}}{287 \cdot (273,15 + T_0)} \text{ — плотность газа;}$$

$\text{del}P_0$ — избыточное давление перед соплом;

$\text{del}P_c$ — перепад давлений на сопле Вентури (разница между P_2 и P_1 , то есть показания манометра);

T_0 — температура перед соплом Вентури.

Рис. 3. Схема сопла Вентури: 1- кольцевые усредняющие камеры на входном участке и на горловине, служат для выравнивания давлений; 2- входной конфузор; 3 – горловина; 4 – диффузор

Степень повышения по параметрам давления торможения ступени компрессора определяется зависимостью

$$\pi_k = \frac{P_2}{P_1},$$

где

P_1 – давление перед компрессором;

P_2 – давление за компрессором.

На рисунке 4 представлены результаты тестового эксперимента, проведенного на атмосферном воздухе (с открытым и замкнутым контуром).

Рис. 4. Результаты тестового эксперимента на воздухе, отношение степени повышения давления от приведённого расхода с предполагаемой кривой характеристики компрессора

Кривая при частоте 500 Гц была получена в ходе тестового эксперимента на воздухе, она была построена по результатам замеров (красные точки) в ходе эксперимента. Кривые при других частотах вращения компрессора были получены с помощью методики пересчёта характеристик компрессора [4].

Точность полученных величин оценена как величина предельной ошибки при косвенных измерениях. Предварительно выполнена проверка на нормальность распределения, то есть сравнение рассчитанного значения критерия соответствия χ^2 с критическим значением при доверительной вероятности $P = 0,95$ [5]:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^l \frac{(m_i - np_i)^2}{np_i},$$

здесь

l – число интервалов $(-\infty; x_1), (x_1; x_2) \dots (x_n; +\infty)$;

n – число всех результатов измерений;

$$p_i = \Phi\left(\frac{x_i - \bar{x}}{s}\right) - \Phi\left(\frac{x_{i-1} - \bar{x}}{s}\right);$$

$$s = \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2}{n}} - \text{средняя квадратичная ошибка.}$$

Полученные результаты представлены в таблице 1.

Табл. 1. Результаты проверки распределения нормальности измерений

№	Тип датчика	Количество измерений	Значение χ^2	Критическое значение критерия χ^2
1	ИКД 27Дф 0,4	176	6,721	14,07
2	Термопара Хромель-копель	176	13,219	14,07

Так как полученные значения критические, то распределения необходимо считать доверительная оценка истинного значения измеряемой

величины при неизвестной точности измерений по методике, изложенной в [5].

Методика обработки прямого многократного измерения заключается в расчёте среднего значения

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i,$$

где

n – число измерений;

x_i – значение каждого измерения.

Средняя квадратичная ошибка отдельного результата определяется по формуле

$$s = \sqrt{\frac{\sum (\bar{x} - x_i)^2}{n - 1}}$$

Она характеризует ошибку каждого отдельного измерения. При $n \rightarrow \infty$ s стремится к постоянному пределу

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} s.$$

Среднеквадратичная ошибка среднего арифметического равна

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum (\bar{x} - x_i)^2}{n \cdot (n - 1)}}.$$

Задавшись требуемым уровнем доверительной вероятности ($P=0,95$), определяем коэффициент Стьюдента $t(P, n-1)$ и модуль доверительного интервала:

$$\Delta x = s_x \cdot t(P; n - 1).$$

Результат измерения представляются в виде:

$$x = \bar{x} \pm \Delta x \quad \text{при доверительной вероятности } P = 0,95.$$

Погрешности при статической обработке данных представлены таблице 2.

Табл. 2. Погрешность при статистической обработке данных

№	Тип датчика	Доверительный интервал	Количество измерений
1	ИКД 27Дф 0,4	± 58 Па	176
2	Термопара Хромель-копель	$\pm 1,79$ К	176

Косвенные измерения вычисляются на основе формулы для накопления погрешности

$$\Delta f = \sqrt{(\Delta f_x^2 + \Delta f_y^2 + \Delta f_z^2 + \dots)} = \sqrt{((f'_x)^2 \Delta x^2 + (f'_y)^2 \Delta y^2 + (f'_z)^2 \Delta z^2 + \dots)}.$$

Погрешность измерений расхода равна

$$\Delta G = \sqrt{\left[\left(\frac{\partial \rho}{\partial T_0} \Delta T_0 \right)^2 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial \Delta \text{del} P_0} \Delta \text{del} P_0 \right)^2 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial P_{\text{атм}}} \Delta P_{\text{атм}} \right)^2 + \right. \\ \left. + \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial \text{del} P_0} \Delta \text{del} P_0 \right)^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial P_{\text{атм}}} \Delta P_{\text{атм}} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial \text{del} P_c} \Delta \text{del} P_c \right)^2 + \left(\frac{\partial D}{\partial d} \Delta d \right)^2 \right]}.$$

По результатам расчёт погрешности расхода и давления составили

$$\Delta G = 0,022;$$

$$\pi_{\kappa}^* = 0,01.$$

Заключение

Тестовые запуски стенда электрокомпрессора показали возможность использования данных методик для определения характеристик ступени центробежного компрессора, а так же правильность выбора измерительного оборудования, показавших достаточную точность определения измеряемых параметров.

В результате была получена характеристика компрессора при частоте вращения 500 Гц, для которой были определены погрешности измерений, максимальные значения которых не превысили 2,2 %.

В дальнейшей работе планируется выполнить герметизацию стенда для использования его на инертных газах. А затем произвести полный цикл испытаний компрессора на воздухе и гелиексеновой смеси. Рассчитать в программной среде ANSYS тепловые потоки в деталях ротора и статора ступени центробежного компрессора, скорректировать экспериментальные значения параметров компрессора.

Работа выполнена при финансовом содействии Министерства науки и образования РФ (государственный контракт от 25 августа 2011 года № 16.516.11.6112).

Литература

1. Участие в монтаже 1-го опытного образца ЗГТЭУ $N_e=1...3$ кВт, работающей на природном газе, в испытательном боксе ФГУП «ММПП «Салют», его сборка и отладка. Отчёт НИИЭМ МГТУ им. Н.Э. Баумана по н/и теме Т1027, 2005 г.

2. Разработка центробежного компрессора (ЦБК) блока турбогенератора-компрессора перспективной ЗГТЭУ $N_e = 1...3$ кВт, работающей на природном газе. Отчёт НИИЭМ МГТУ им. Н.Э. Баумана по н/и теме Т1028, 2005 г.

3. Гаршин П.А., Личко А.А., Королёв В.Н., Красавина С.А., Методические указания «Расход жидкостей и газов. Методика выполнения измерений с помощью специальных сужающих устройств РД 50-411-83» - М.: Издательство стандартов, 1984. – 40 с.

4. Б. Эккерт, Осевые и центробежные компрессоры. Применение, теория, расчёт. – Машгиз, 1959. – 680 с.

5. Румшинский Л.З., Математическая обработка результатов эксперимента. - Главная редакция физико-математической литературы изд-ва “Наука”, 1971. – 192 с.

6. Грановский В.А., Синая Т.Н., Методы обработки экспериментальных данных при измерениях. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. Отд-ние, 1990. – 288 с.

Experimental study of the characteristics of the small-scale centrifugal-flow compressor

08, August 2012

DOI: [10.7463/0812.0432308](https://doi.org/10.7463/0812.0432308)

Arbekov A.N., Novickii B.B.

Russia, Bauman Moscow State Technical University

novitskiybronslav@gmail.com

This work describes an experimental study of the stage of a small-scale centrifugal-flow compressor which is necessary for development and improvement of closed gas turbine trigeneration. This trigeneration implements a combination of direct and inverse Brayton cycles and can simultaneously generate electricity, heat and cold for air conditioning needs. The scheme of the stand, method of determination of key parameters and relations needed to assess the characteristics of the compressor were also described in this work. The comparison of calculated characteristics of the stage with experimental data was carried out.

Publications with keywords: [test rig](#), [CENTRIFUGAL COMPRESSOR](#), [test interpretation](#), [compressor map](#)

Publications with words: [test rig](#), [CENTRIFUGAL COMPRESSOR](#), [test interpretation](#), [compressor map](#)

References

1. *Uchastie v montazhe 1-go opytnogo obraztsa ZGTEU Ne=1...3 kVt, rabotaiushchei na prirodnom gaze, v ispytatel'nom bokse FGUP «MMPP «Saliut», ego sborka i otladka : otchet o NIP po teme T1027* [Participation in the mounting of the 1st prototype of a closed gas-turbine energy-propulsion installation (ЗГТЭУ) Ne=1...3 kW working on natural gas, in a test box of FSUE «MMPP «Salut», his build and debug: a report of research on the topic T1027]. Moscow, NIIEM Bauman MSTU, 2005. Non published.
2. *Razrabotka tsentrobezhnogo kompressora (TsBK) bloka turbogenerators-kompressora perspektivnoi ZGTEU Ne = 1...3 kVt, rabotaiushchei na prirodnom gaze: otchet o NIP po teme T1028* [Development of a centrifugal compressor (PPM) of the block of turbogenerator-compressor of promising closed gas-turbine energy-propulsion installation (ЗГТЭУ) Ne=1...3 kW working on natural gas : a report of research on the topic T1028]. Moscow, NIIEM Bauman MSTU, 2005. Non published.

3. Garshin P.A., Lichko A.A., Korolev V.N., Krasavina S.A. *Raskhod zhidkosti i gazov. Metodika vypolneniia izmerenii s pomoshch'iu spetsial'nykh suzhaiushchikh ustroystv RD 50-411-83* [Consumption of liquids and gases. The method of measurement by means of special narrowing devices of Rocket Engines 50-411-83]. Moscow, Izdatel'stvo standartov, 1984. 40 p.
4. Ekkert B. *Osevye i tsentrobezhnye kompressory. Primenenie, teoriia, raschet* [Axial and centrifugal compressors. Application, theory, calculation]. Transl. from German. Moscow, Mashgiz, 1959. 680 p.
5. Rumshinskii L.Z. *Matematicheskaya obrabotka rezul'tatov eksperimenta* [Mathematical processing of experimental results]. Moscow, Nauka, FIZMATLIT, 1971. 192 p.
6. Granovskii V.A., Siraia T.N. *Metody obrabotki eksperimental'nykh dannykh pri izmereniiakh* [Methods of experimental data processing in the measurements]. Leningrad, Energoatomizdat, 1990. 288 p.