

УДК 621.438

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МАЛОРАСХОДНОГО ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОМПРЕССОРА ЗАМКНУТОЙ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ

© 2014 А.Н. Арбеков, Б.Б. Новицкий

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Представлено экспериментальное определение характеристик малоразмерного центробежного компрессора блока турбогенератор-компрессора опытной замкнутой газотурбинной установки, работающей на смесях инертных газов. Для определения характеристик была проведена модернизация стендового оборудования (замена датчиков давления и системы сбора и обработки сигналов), что позволило полностью контролировать проведение исследований. В работе представлено описание экспериментального стенда, использованного оборудования и методика исследований характеристик. Проведены тестовые запуски компрессора на воздухе с прикрытием дроссельной заслонки до начала помпажа. Представлено сравнение с расчётной точкой, пересчитанной на частоту вращения проведения экспериментов (30 000 об/мин). Оценено влияние физических свойств рабочего тела на характеристики центробежного компрессора при расчётной степени повышения давления (1,75). Представлены экспериментальные исследования на геликсеноновой смеси (с молярной массой аргона) и аргоне при полностью открытой дроссельной заслонке и варьировании частот вращения от 23700 до 30300 оборотов в минуту. Проведённые исследования показали, что из-за большей вязкости геликсеноновой смеси степень повышения давления и коэффициент полезного действия на аргоне несколько выше.

*Геликсеноновая смесь, замкнутая газотурбинная установка, коэффициент напора, коэффициент расхода, центробежный компрессор, высокоскоростной электропривод.*

### Введение

В настоящее время системы распределённой энергетики являются наиболее перспективным направлением для снижения издержек при передаче тепло- и электроэнергии, что особенно актуально при передаче электрической энергии на значительные расстояния в труднодоступные районы. Для решения указанной проблемы может быть использована замкнутая газотурбинная энергетическая установка (ЗГТЭУ), работающая на органическом топливе. Одним из критических элементов ЗГТЭУ является центробежное колесо компрессора (ЦБК). Исследование характеристик малоразмерного центробежного компрессора, работающего на смеси инертных газов с высокой молярной массой, представляет собой сложную научно-техническую задачу из-за сопоставимости зазора и высоты лопатки при выходе. Данная работа является продолжением работы [1].

### Стенд определения характеристик ступеней центробежных колёс

Определение характеристик центробежного компрессора (рис. 1) невозможно

без использования соответствующего оборудования, поэтому была проведена модернизация стенда, созданного в рамках работы [2]. В ходе проведения экспериментов [1] выяснился нагрев ротора и подшипниковых узлов, что вело к удлинению ротора и уменьшению меридионального зазора. Чтобы не допустить задевания рабочим колесом ЦБК меридионального обвода, была модернизирована система охлаждения ротора (рис. 2) и газодинамических подшипников.



Рис. 1. Исследуемое центробежное колесо компрессора диаметром 90 мм



Рис. 2. Ротор электрокомпрессора на постоянных магнитах без рабочего колеса центробежного компрессора



Рис. 4. Дифференциальный датчик давления модели MPX4250DP фирмы "Freescale semiconductor"

Определение характеристик ступени компрессора требует контроля и записи большого количества данных, которые необходимо сохранить. Для этого экспериментальный стенд оборудован системой измерений, сбора и обработки информации. Система измерений состоит из термопар типа ХК (хромель-капель), датчиков давления типа МРХ фирмы "Freescale semiconductor" (рис. 3, 4), (которые заменили ИКД 27ДФ 0,4, имеющие гистерезис), сигнальных линий и платы восьмидесятиканального коммутатора и аналого-цифрового преобразователя М6225 (рис. 5).



Рис. 5. Плата системы сбора и обработки информации М6225 фирмы National Instruments (США) и пульт управления частотным преобразователем

При обработке экспериментальных данных использована программа, написанная в среде LabVIEW и позволяющая отображать на экране персонального компьютера показания на шкалах виртуальных приборов в реальном времени (рис. 6).

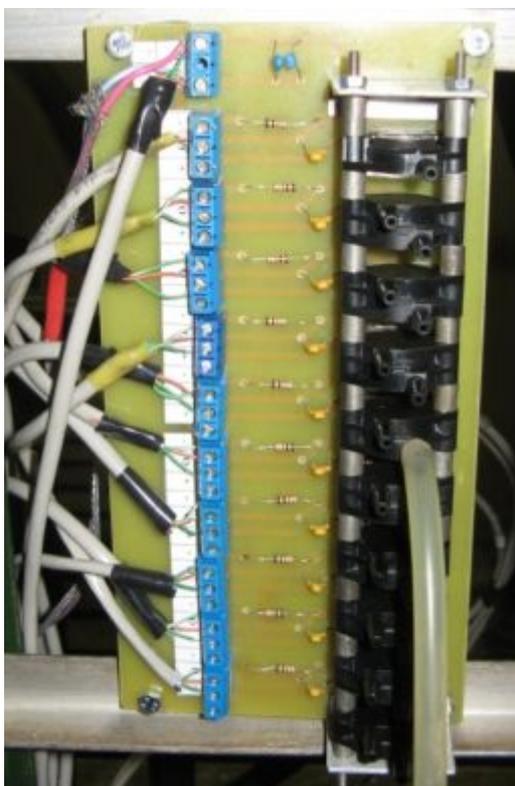


Рис. 3. Комплект датчиков преобразователей давления типа МРХ фирмы «Freescale», установленный на экспериментальном стенде

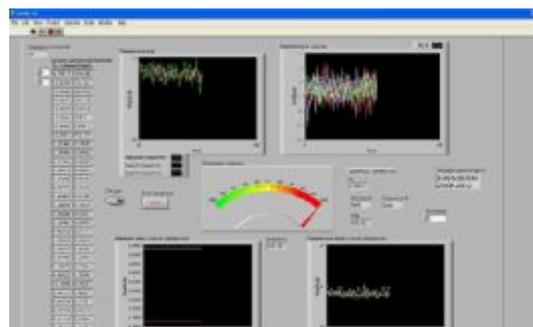


Рис. 6. Вид интерфейса панели приборов для испытаний электрокомпрессора

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, где фиксируется текущее время, положение дроссельной заслонки, частота вращения компрессора, перепад давлений на сопле Вентури, давления и температуры перед соплом, перед и за ступенью ЦБК, температуры газодинамических опор. Общий вид стенда электрокомпрессора после второй модернизации представлен на рис. 7. Также установлена система видеонаблюдения, с помощью которой оператору на экран выводятся дублирующие аналоговые приборы и электропривод (рис. 8).



Рис. 7. Общий вид модернизированного стенда электрокомпрессора



Рис. 8. Общий вид места оператора

### Результаты экспериментальных исследований

Работоспособность стендового оборудования проверялась на открытом контуре с воздухом в качестве рабочего тела. Электрокомпрессор выводился на частоту вращения 500 Гц, после чего прикрыва-

лась дроссельная заслонка. Следует отметить, что при изменении положения заслонки компрессор работал некоторое время для выхода ступени на установившийся режим работы. Это вызвано инерционностью прогрева улитки компрессора, так как она может снижать температуру рабочего тела, повышая к.п.д. Крайняя левая точка на рис. 9 соответствует началу помпажа, после достижения которого электропривод был отключён во избежание поломок.

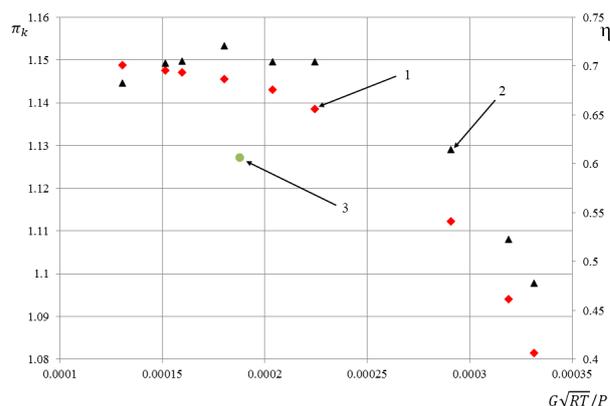


Рис. 9. Характеристики ступени электрокомпрессора при работе на воздухе: 1 – степень повышения давления; 2 – КПД; 3 – расчётная рабочая точка

Низкие значения степени повышения давления (рис. 9) объясняются низкой частотой вращения рабочего колеса компрессора. В табл. 1 представлены рассчитанные по методике, изложенной в [3], характеристики ступени ЦБК в зависимости от физических свойств рабочего тела [4,5].

Цифрой 3 на рис. 9 обозначена расчётная точка, пересчитанная по известным зависимостям.

Адиабатический напор при частоте вращения, к которой приводятся характеристики

$$H_{ad} = H_{ad0} \cdot \left(\frac{n}{n_0}\right)^2,$$

где  $H_{ad0}$  - напор при номинальной частоте вращения;

$n$  - частота вращения, к которой приводятся характеристики;

$n_0$  - расчётная частота вращения РК.

Таблица 1 – Характеристики ЦБК в зависимости от рабочего тела

Параметр	Размерность	Рабочее тело		
		Криптон (смесь HeXe)	Аргон (смесь HeXe)	Воздух
Молярная масса	кг/кмоль	83,8	39,948	28,98
Газовая постоянная	Дж/(кг*К)	99,21	208,13	286,90
Показатель адиабаты	-	5/3	5/3	7/5
Удельная теплоёмкость	Дж/(кг*К)	248,04	520,33	1004,16
Вязкость при н.у. (273 К)	1*10 <sup>-5</sup> Па*с	2,51 (2,38)	2,22 (2,60)	1,71
Температура при входе в компрессор	К	313		
Окружная скорость	м/с	188,5	273,0	315,3
Давление при входе в ЦБК	Па	133000		
Степень повышения давления	-	1,75		
Частота вращения РК	1/мин	40000	57934	66906
Расход рабочего тела	кг/с	0,322	0,222	0,186
Требуемая мощность электропривода	кВт	7,84	11,35	12,68

Степень повышения давления, при частоте вращения, к которой приводятся характеристики

$$\pi_k = \left[ \frac{H_{ad}}{C_p \cdot T_0} + 1 \right]^{\frac{k}{k-1}},$$

где  $C_p$  - удельная теплоёмкость при постоянном давлении;

$T_0$  - температура при входе в компрессор

$k$  - показатель адиабаты.

Расход рабочего тела определяется как:

$$G = G_0 \cdot \frac{n}{n_0},$$

где  $G_0$  - расход рабочего тела при номинальных параметрах.

Далее были проведены экспериментальные исследования на геликсеноновой смеси (с молярной массой аргона) и аргоне. Результаты представлены на рис. 10.

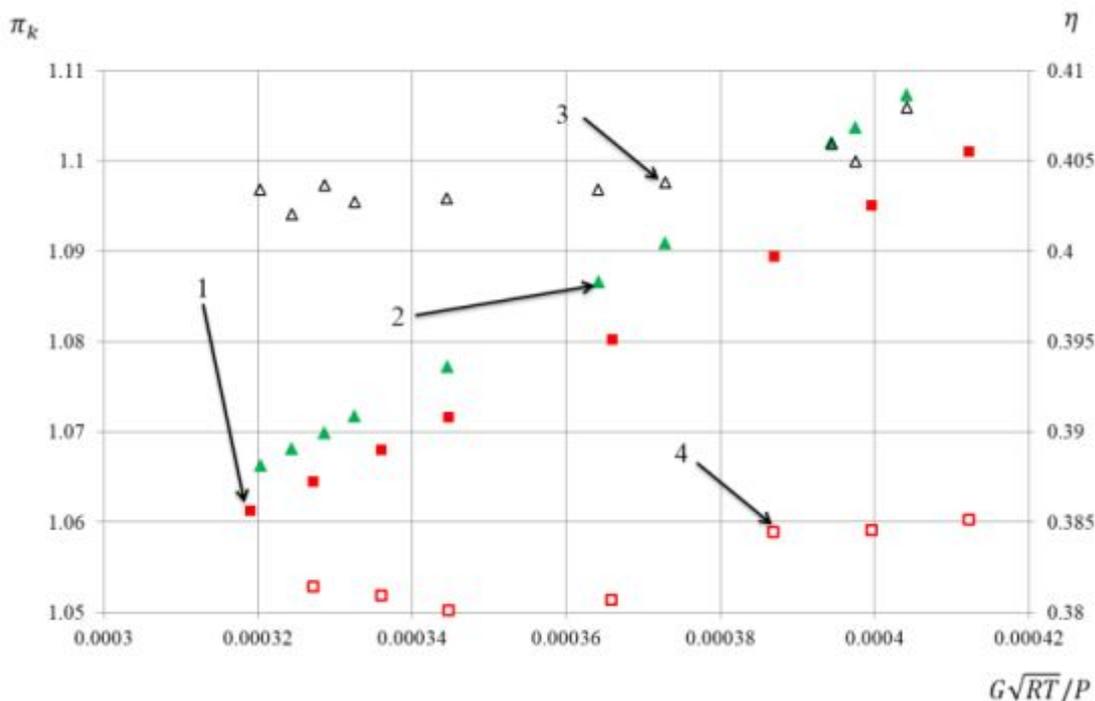


Рис. 10. Характеристики ЦБК на аргоне и геликсеноновой смеси (с молярной массой аргона) при варьировании частоты вращения от 23700 до 30300 1/мин:

1 – зависимость повышения давления от расхода геликсеноновой смеси, 2 – зависимость повышения давления от расхода аргона; 3 – к.п.д. ступени на аргоне; 4 – к.п.д. ступени на геликсеноне

Из рис. 10 видно, что характеристики и к.п.д. ступени ЦБК на аргоне лежат выше, нежели характеристики геликсеноновой смеси. Это объясняется более высокими значениями вязкости у геликсеноновых смесей (табл. 1).

### **Заключение**

Выполненные экспериментальные исследования позволяют сделать следующие выводы:

- созданный стенд позволяет исследовать характеристики малоразмерных центробежных компрессоров на различных газовых смесях,

- в малоразмерных лопаточных машинах на режимах частичной мощности на к.п.д. оказывает влияние вязкость рабочего тела.

Экспериментально получены характеристики ЦБК на различных рабочих телах (с молярной массой аргона) при полностью открытой дроссельной заслонке на модернизированном стенде при варьировании частоты вращения от 18 000 до 33 000 1/мин. Степень повышения давления составила 1,15 и к.п.д. 0,41.

Работа выполнена при частичной поддержке Минобрнауки РФ (госзадание № 2014/104, код проекта 2092).

### **Библиографический список**

1. Арбеков А.Н., Новицкий Б.Б. Экспериментальное исследование характеристик ступени малоразмерного центробежного компрессора // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2012. № 8. С. 29.

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

3. Шерстюк А.Н. Насосы, вентиляторы и компрессоры. М.: Высшая школа, 1972. 344 с.

4. Ваграфтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. 720 с.

5. Paul K. Johnson. A method for Calculating Viscosity and Thermal Conductivity of a Helium-Xenon Gas Mixture // NASA/CR-2006-214394, 2006. 20 p.

### **Информация об авторах**

**Арбеков Александр Николаевич**, кандидат технических наук, заведующий отделом Научно-исследовательского института Энергомашиностроения, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана. Область научных интересов: исследование характеристик малоразмерного центробежного компрессора.

**Новицкий Бронислав Брониславович**, младший научный сотрудник Научно-исследовательского института Энергомашиностроения, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана. E-mail: [novitskiybronislav@yandex.ru](mailto:novitskiybronislav@yandex.ru). Область научных интересов: исследование характеристик малоразмерного центробежного компрессора.

## **EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF A SMALL-SIZED CENTRIFUGAL COMPRESSOR FOR A CLOSED-BRAYTON CYCLE GAS TURBINE POWER SYSTEM**

© 2014 A.N. Arbekov, B.B. Novitskiy

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

An experimental characterization of small-size centrifugal compressor for turbine-driven generator - compressor unit of a closed-Brayton Cycle gas turbine power plant is presented. Operating fluid is a mixture of inert gases. Bench equipment (replacement of pressure sensors and systems for collecting and processing signals) was upgraded for characterization to complete control of research. The paper describes the test facility, the equipment used and the method of research performance. Test runs were carried out in air compressor, with a cover of the throttle before the surge. Comparison with the calculated point restated at the speed of the experiments (30 000 rev / min) is presented. The influence of the physical properties of the working fluid on the performance of a centrifugal compressor at the calculated pressure ratio (1.75) is evaluated. Experimental research on Xenon and helium mixture (molar mass of argon) and argon at full throttle and varying speeds from 23700 to 30300 rpm is presented.

*Xenon and helium mixture, multiloop closed-Brayton cycle gas turbine power plant, flow coefficient, a centrifugal compressor, high-speed actuator.*

### **References**

1. Arbekov A.N., Novitskiy B.B. Experimental study of the characteristics of the small-scale centrifugal-flow compressor // Science and education. Electronic scientific and tech. journal. 2012. No. 8. P. 29. (In Russ.)
2. Development of a centrifugal compressor (CC) turbogenerator unit compressor promising ZGTEU Ne = 1 ... 3 kW, running on natural gas. Report NIIEM BMSTU. Topic T1028, 2005. (In Russ.)
3. Sherstuk A.N. Nasosy, ventilyatory i kompressory [Pumps, fans and compressors]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1972. 344p.
4. Vagraftik N.B. Spravochnik po teplofizicheskim svoystvam gazov i zhidkostey [Handbook of thermophysical properties of gases and liquids]. Moscow: Nauka Publ., 1972. 720 p.
5. Paul K. Johnson. A method for Calculating Viscosity and Thermal Conductivity of a Helium-Xenon Gas Mixture // NASA/CR-2006-214394, 2006. 20 p.

### **About the authors**

**Arbekov Alexander Nikolaevich**, Candidate of Science (Engineering), Bauman Moscow State Technical University. Area of Research: the characteristics of a small-sized stage centrifugal compressor.

**Novitskiy Bronislav Bronislavovich**, Bauman Moscow State Technical University. E-mail: [novitskiybronislav@yandex.ru](mailto:novitskiybronislav@yandex.ru). Area of Research: the characteristics of a small-sized stage centrifugal compressor.