

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МАЛОРАЗМЕРНОГО ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОМПРЕССОРА

Представлены результаты тестового исследования ступени малоразмерного центробежного компрессора автономной замкнутой газотурбинной установки, работающей на органическом топливе. Приведены описание экспериментального стенда для определения характеристик ступени центробежного компрессора, методика определения основных параметров компрессора. Сопоставлены расчетные характеристики ступени центробежного компрессора с экспериментальными результатами.

E-mail: novitskiybronislav@gmail.com

Ключевые слова: экспериментальный стенд, центробежный компрессор, обработка эксперимента, характеристики компрессора.

Создание автономных многоцелевых энергетических установок, предназначенных для электро-, тепло- и холодоснабжения автономных потребителей, является основой развития систем распределенной энергетики, которая позволяет избавиться от возникающих потерь при передаче электроэнергии на значительные расстояния, особенно в труднодоступные районы. Для решения указанной проблемы может быть использована замкнутая газотурбинная установка (ЗГТУ), работающая на органическом топливе, в которой применяют различные рабочие тела.

Автономные энергетические установки на базе ЗГТУ являются развитием космических энергосистем. 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: от его эффективности зависит КПД и мощность ЗГТУ. Исследование характеристик малоразмерного центробежного компрессора, работающего на смеси инертных газов с высокой молярной массой, представляет собой сложную научно-техническую задачу, что обусловлено сопоставимостью зазора и высоты лопатки при выходе, а также ограничениями по рабочему диапазону установки ввиду помпажа на входе в компрессор при пониженных частотах и помпажа на выходе при повышенных частотах вращения. Решение этой задачи возможно при использовании соответствующего оборудования и методики.

Стенд для исследования характеристик ступеней малоразмерных центробежных компрессоров. Определение характеристик ма-

лоразмерной ступени центробежного компрессора (ЦБК), приведенного на рис. 1, осуществляется на модернизированном стенде в НИИ ЭМ МГТУ им. Н.Э. Баумана, гидравлическая схема которого представлена на рис. 2. Рабочее тело сжимается в ступени 1 исследуемого ЦБК и подается в напорный трубопровод с электроприводной дроссельной заслонкой 4, служащей для изменения гидравлического сопротивления тракта, откуда поступает в водоохлаждаемый газоохладитель 5, а затем через сопло Вентури 6 возвращается на всас ЦБК.



Рис. 1. Рабочее колесо малорасходного центробежного компрессора

Приводом рабочего колеса компрессора служит высокооборотный электродвигатель на постоянных самарий-кобальтовых магнитах, разработанный и изготовленный ОАО “Аэроэлектромаш”.

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

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

При определении характеристик ступени компрессора требуется контролировать большое количество данных, подлежащих считыванию и накоплению. Для этого экспериментальный стенд оборудован системой измерений, сбора и обработки информации. Система

измерений состоит из термопар типа ХК (хромель-капель), датчиков давления, сигнальных линий и платы 80-канального коммутатора и аналого-цифрового преобразователя. Для обработки информации использована написанная в среде LabVIEW программа, позволяющая отображать на экране ПК показания на шкалах виртуальных приборов в режиме реального времени.

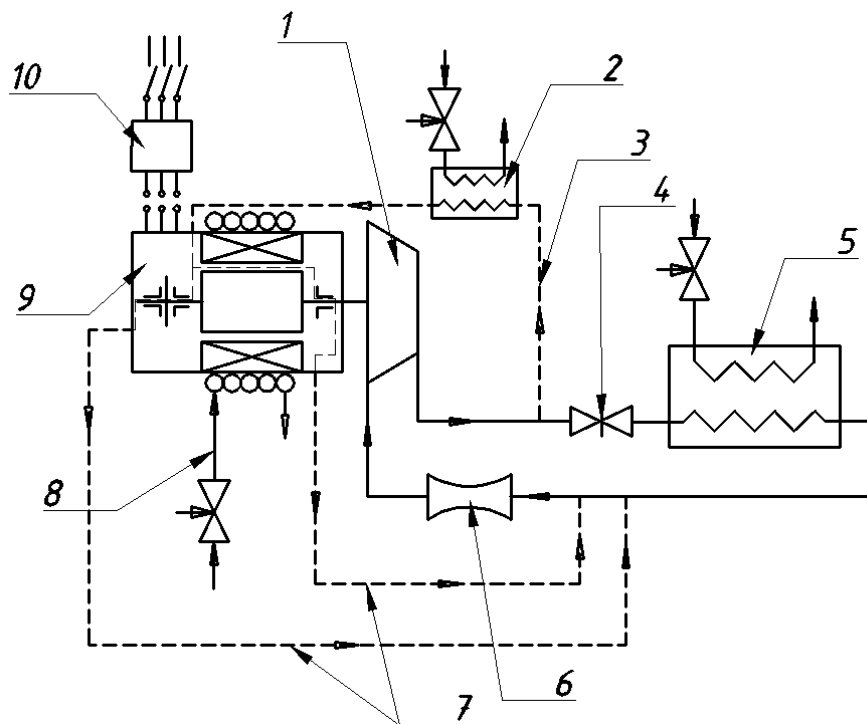


Рис. 2. Принципиальная схема стенда для экспериментального исследования ступени ЦБК:

1 — ступень центробежного компрессора; 2 — вспомогательный охладитель газа; 3, 7 — байпасные трубопроводы, системы охлаждения подшипников; 4 — дроссельная заслонка; 5 — конечный охладитель; 6 — сопло Вентури; 8 — жидкостная система охлаждения статора электродвигателя; 9 — электродвигатель; 10 — регулируемый статический частотный преобразователь

Программа с помощью интерфейса предоставляет оператору возможность визуально контролировать критические аспекты эксперимента (показания датчиков температур опор электрокомпрессора) и определять основные характеристики ЦБК (расход, степень повышения давления). Накопление и запись в текстовый файл показаний датчиков происходит автоматически по мере проведения эксперимента. В файл фиксируются текущее время, положение дроссельной заслонки, перепад давлений на сопле Вентури, давления и температуры перед соплом, до ступени ЦБК и за ней, а также температуры

радиальных и осевой газодинамических опор, переднего, среднего и заднего корпусов электрокомпрессора.

Методика обработки эксперимента. Основными параметрами ступени ЦБК, которые необходимо получить, являются расход газа, степень повышения давления (напор), частота вращения рабочего колеса, подведенная работа, КПД ступени.

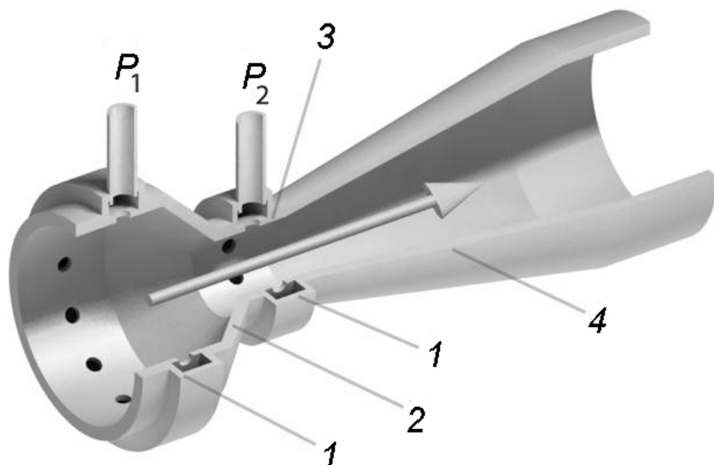


Рис. 3. Схема сопла Вентури:

1 — кольцевые усредняющие камеры на входном участке и на горловине, служат для выравнивания давлений; 2 — входной конфузор; 3 — горловина; 4 — диффузор

Для определения расхода газа в контуре используется длинное сопло Вентури (рис. 3), отводы от которого подключают к дифференциальному манометру. Расход вычисляют по приведенной в [1] формуле

$$G = \frac{CA_2 \sqrt{\frac{2 \text{del} P_c}{\rho}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}},$$

где $\rho = \frac{\text{del} P_0 + P_{\text{атм}}}{287(273,15 + T_0)}$ — плотность газа; $\text{del} P_0$ — избыточное давление перед соплом; $\text{del} P_c$ — перепад давлений на сопле Вентури (разность между показаниями манометра P_1 и P_2); T_0 — температура перед соплом Вентури.

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 рис. 4 представлены результаты тестового эксперимента, проведенного с открытым и замкнутым контурами.

После запуска электрокомпрессора и выхода на рабочую частоту вращения (500 Гц) дроссельную заслонку закрывали для имитации нагрузки на центробежное колесо: давление за компрессором увеличивалось, а расход уменьшался. Необходимо отметить, что заслонку открывали очень медленно во избежание начала помпажа. После каждого изменения положения дросселя компрессор работал на этом режиме длительное время для стабилизации показаний датчиков. Кривая с точками построена по результатам тестового эксперимента на воздухе при частоте 500 Гц. Кривые при других частотах вращения компрессора получены с помощью методики пересчета характеристик компрессора [2].

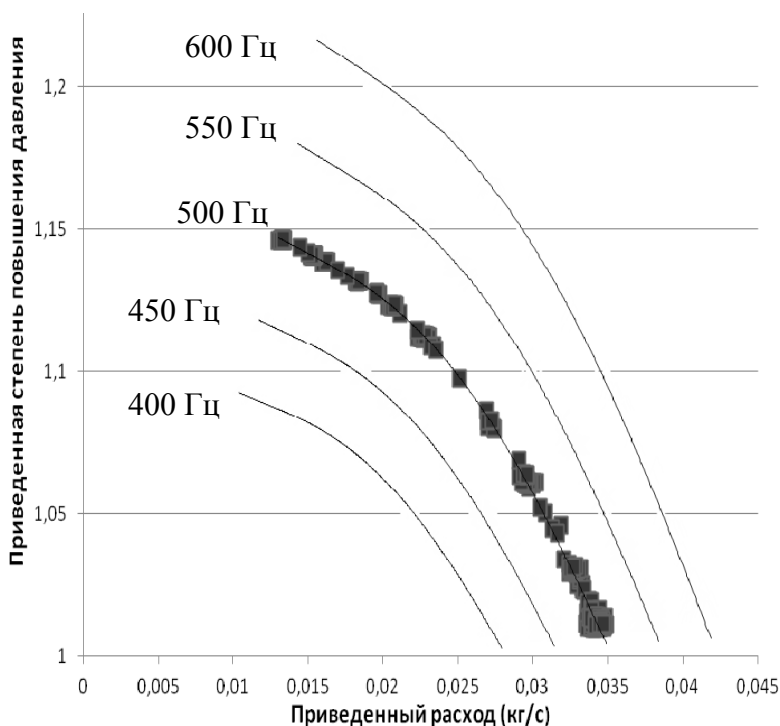


Рис. 4. Зависимость степени повышения давления от приведенного расхода с предполагаемой кривой характеристики компрессора

На рис. 5 представлены результаты тестового эксперимента на аргоне и гелий-ксеноне в качестве рабочего тела. Во время снятия характеристик ступени ЦБК на инертных газах в качестве рабочего тела дроссельная заслонка была полностью открыта, изменялись только обороты электропривода.

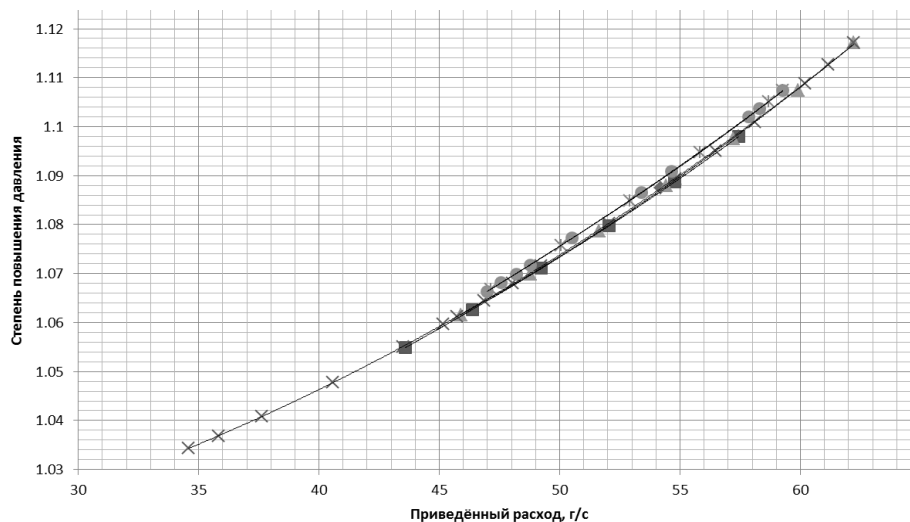


Рис. 5. Зависимость степени повышения давления от приведенного расхода аргона и гелий-ксенона

Точность полученных данных оценена как величина предельной ошибки при косвенных измерениях. Предварительно выполнена проверка нормальности распределения, при доверительной вероятности $P = 0,95$ [3] проведено сравнение рассчитанного значения критерия соответствия χ^2 с критическим значением:

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

где l — число интервалов $(-\infty; x_1), (x_1; x_2) \dots (x_n; +\infty)$; $p_i = \Phi\left(\frac{x_i - \bar{x}}{S}\right) -$

$-\Phi\left(\frac{x_{i-1} - \bar{x}}{S}\right)$; $S = \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2}{n}}$ — средняя квадратичная

ошибка; n — число всех результатов измерений.

Полученные результаты представлены в табл. 1.

Методика обработки прямого многократного измерения экспериментальных данных [3] заключается в расчете среднего значения

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

где n — число измерений; x_i — значение каждого измерения.

Результаты проверки распределения нормальности измерений

| Тип датчика | Число измерений | Критерий χ^2 | |
|--------------------------|-----------------|-------------------|----------------------|
| | | полученный | критическое значение |
| ИКД 27Дф 0,4 | 176 | 6,721 | 14,07 |
| Термопара хромель-капель | 176 | 13,219 | 14,07 |

Среднюю квадратичную ошибку отдельного результата определяем по формуле

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

Величина этой ошибки характеризует отклонение каждого отдельного измерения: S стремится к постоянному пределу $\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} S$ при $n \rightarrow \infty$.

Среднеквадратичную ошибку среднего арифметического вычисляем как

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

Задав требуемый уровень доверительной вероятности ($P = 0,95$), определяем коэффициент Стьюдента $t(P, n-1)$ и модуль доверительного интервала [4]:

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

Результат измерения представляем в виде $x = \bar{x} \pm \Delta x$ при доверительной вероятности $P = 0,95$. Погрешности при статической обработке данных представлены табл. 2.

Косвенные измерения вычисляем с помощью формулы 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

$$\Delta G = \sqrt{F + \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial \Delta P_0} \Delta \Delta P_0\right)^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial P_{\text{атм}}} \Delta P_{\text{атм}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial \Delta P_c} \Delta \Delta P_c\right)^2 + \left(\frac{\partial D}{\partial d} \Delta d\right)^2},$$

$$\text{где } F = \left(\frac{\partial \rho}{\partial T_0} \Delta T_0\right)^2 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial \Delta P_0} \Delta \Delta P_0\right)^2 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial P_{\text{атм}}} \Delta P_{\text{атм}}\right)^2.$$

Погрешность при статистической обработке данных

| Тип датчика | Доверительный интервал | Число измерений |
|--------------------------|------------------------|-----------------|
| ИКД 27Дф 0,4 | ± 58 Па | 176 |
| Термопара хромель-капель | $\pm 1,79$ К | 176 |

По результатам расчета погрешности расхода и давления газа до компрессора и за ним составили $\Delta G = 0,022$; $\pi_k = 0,01$.

В заключение отметим, что тестовые запуски стенда электрокомпрессора подтвердили возможность использования данных методик для определения характеристик ступени центробежного компрессора, а также правильность выбора измерительного оборудования, показавших достаточную точность измеряемых параметров.

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

В дальнейшей работе планируется провести полный цикл испытаний компрессора на воздухе и в гелий-ксеноновой смеси; рассчитать в программной среде ANSYS тепловые потоки в деталях ротора и статора ступени центробежного компрессора, скорректировать экспериментальные значения параметров компрессора.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ (государственный контракт от 25 августа 2011 года № 16.516.11.6112) и Научно-исследовательского и конструкторского института энерготехники им. Н.А. Доллежала (ОАО «НИКИЭТ»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Расход жидкостей и газов. Методика выполнения измерений с помощью специальных сужающих устройств РД 50-411-83: метод. указания / П.А. Гаршин, А.А. Личко, В.Н. Королев, С.А. Красавина. М.: Изд-во стандартов, 1984. 40 с.
2. Эккерт Б. Осевые и центробежные компрессоры: Применение, теория, расчет. М.: Mashgiz, 1959. 680 с.
3. Румшинский Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента. М.: Гл. ред. физ.-мат. лит.-ры изд-ва «Наука», 1971. 192 с.
4. Грановский В.А., Сирая Т.Н. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях. Л.: Энергоатомиздат, 1990. 288 с.

Статья поступила в редакцию 26.09.2012