

АЭРОДИНАМИЧЕСКИЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ МОДЕЛЬНЫХ СТУПЕНЕЙ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ КОМПРЕССОРОВ

А. В. Смирнов, канд. техн. наук;

А. М. Бороденко, А. А. Обухов, М. Н. Удод,

ПАО «Сумское НПО им. М. В. Фрунзе», г. Сумы, Украина

В статье приведены результаты модернизации аэродинамического стенда АД-400 в ПАО «Сумское НПО им. М. В. Фрунзе», который применяется для экспериментального исследования модельных ступеней центробежных компрессоров.

Ключевые слова: *аэродинамический стенд, модельная ступень, газодинамические характеристики, контрольные сечения, абсолютные и относительные погрешности.*

У статті наведені результати модернізації аеродинамічного стенда АД-400 в ПАО «Сумське НВО ім. М.В. Фрунзе», який застосовується для експериментального дослідження модельних ступенів відцентрових компресорів.

Ключові слова: *аеродинамічний стенд, модельний ступінь, газодинамічні характеристики, контрольний перетин, абсолютна та відносна похибки.*

Течение газа в элементах проточной части центробежной ступени имеет пространственный характер, что значительно усложняет использование теоретических методов исследования. В случаях, когда необходимо учитывать изменение термодинамических свойств газа в рассматриваемых элементах ступени точное определение параметров потока теоретическими методами в настоящее время вызывает ряд затруднений, а именно необходимость верификации метода решения (требований к геометрии, задания граничных условий, определения интервала физического решения) с уже известными экспериментальными данными. Поэтому экспериментальные методы исследования вязкого трехмерного течения газа в элементах центробежной ступени являются актуальными и необходимыми.

Описание методики проведения интегрального и поэлементного экспериментального исследования центробежной ступени приведено в работах [1, 2, 3].

Стремительно развивающиеся разработки новых и уже существующих газовых месторождений требует расширения номенклатурного ряда компрессорного парка, удовлетворяющего всем современным потребностям газодобывающей отрасли. Для обеспечения возможности расширения имеющейся базы модельных ступеней на ПАО «Сумское НПО им. М. В. Фрунзе» (далее ПАО) был реконструирован аэродинамический стенд АД-400, позволяющий проводить экспериментальные интегральные и поэлементные исследования модельных центробежных ступеней с целью определения путей повышения их эффективности.

Аэродинамический стенд АД-400 научно-исследовательского комплекса ПАО предназначен для исследований модельных центробежных ступеней в широком диапазоне изменения условного коэффициента расхода от 0,01 до 0,15. Конструкция силового корпуса позволяет испытывать модельные ступени с максимальным значением диаметра периферийной поверхности поворотного колена до $D=800$ мм.

АД-400 размещен в цеховом помещении и занимает площадь 100 м². Аэродинамический стенд работает по открытой схеме циркуляции рабочей среды. Схема и фотография стенда представлены на рис. 1 и 2. В

его состав входят: всасывающий трубопровод 1, диафрагма 2, трубопровод 3, осевой канал 4, центробежный компрессор 5, в котором установлена исследуемая ступень, электродвигатель 7, мультипликатор 6, нагнетательный трубопровод 8 и дроссельная заслонка 9.

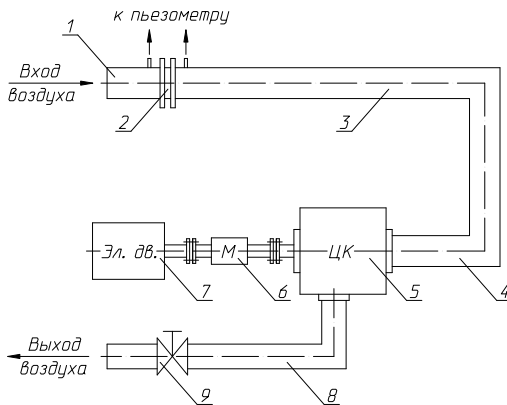


Рисунок 1 – Принципиальная схема аэродинамического стенда АД-400



Рисунок 2 – Аэродинамический стенд

Через всасывающий трубопровод 1, оборудованный расходомерной диафрагмой 2, воздух через вспомогательные трубопроводы 3 поступает в осевой канал 4, предназначенный для стабилизации воздушного потока перед его попаданием в центробежный компрессор 5. Центробежный компрессор состоит из унифицированных частей и проточной части. К унифицированным относятся: силовой корпус, торцевая крышка, подшипники, гидродинамическое уплотнение, «длинный» или «короткий» вал. Данная конструкция стенда предоставляет возможность испытывать варианты как промежуточных, так и концевых проточных частей модельных ступеней. Консольный ротор характерен для большинства экспериментальных моделей. Это позволяет упростить его конструкцию, так как осевая сборка позволяет исключить горизонтальный разъем. Кроме того данная конструкция обеспечивает осесимметричный подвод воздуха к рабочему колесу модели, что сложно сделать при расположении ротора между опорами. Ротор приводится во вращение электродвигателем постоянного тока 7, мощностью 400 кВт и максимальной частотой вращения 3000 об/мин. Повышение частоты вращения ротора производится с помощью мультипликатора 6 с передаточным числом 5,46. На пульте управления стендом расположен реостат для регулировки частоты вращения ротора центробежного компрессора, что позволяет корректировать частоту вращения, во время эксперимента обеспечивая условия $M_{u2} = \text{const}$. Изменение режима работы модельной ступени производится с помощью дроссельной заслонки 9, размещенной в нагнетательном трубопроводе 8. Изменение положения регулировочной заслонки производится дистанционно из пультуевой.

Система воздухопроводов в летнее время обеспечивает всасывание и выхлоп вне помещения, а в зимнее с помощью системы переключателей забор воздуха производится из цехового помещения. Это позволяет снизить время выхода исследуемой модели на необходимый режим.

Перечень изготовленных и испытанных на аэродинамическом стенде модельных центробежных ступеней представлен в табл. 1.

Таблица 1 – Перечень испытанных ступеней на АД-400

Тип ступени	D_2 , мм	Тип диффузора	Мах диаметр ПЧ, мм
Промежуточная	460	ЛД	732
Промежуточная	400	БЛД	793,9
Концевая	400	БЛД	910

Измерения полных, статических давлений и температур выполнялись в контрольных сечениях модельной ступени, рис. 3.

- сечение 0-0 - вход в колесо;
- сечение 2-2 выход из рабочего колеса;
- сечение 3-3 вход в диффузор;
- сечение 4-4 выход из диффузора;
- сечение 5-5 вход в ОНА;
- сечение 6-6 выход из ОНА;
- сечение 0-0 - вход в рабочее колесо следующей ступени.

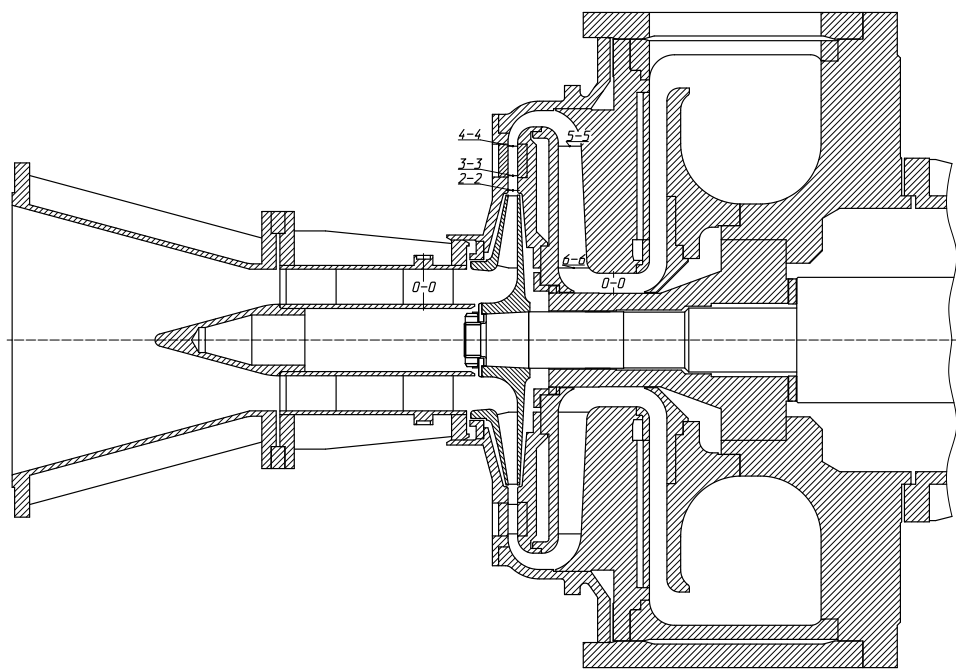


Рисунок 3 - Типовая промежуточная центробежная ступень

Измерение статических параметров потока осуществляется согласно рекомендаций [1]. Измерение статического давления производится в контрольных сечениях 0-0 и 6-6 проточной части через отверстия диаметром 0,8 - 1 мм., рис. 4.

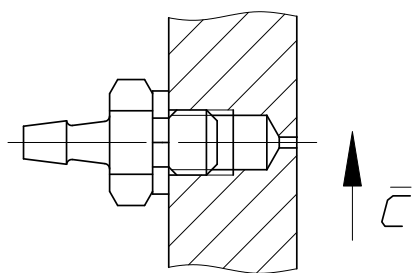


Рисунок 4 – Эскиз отверстия для измерения статического давления



Рисунок 5 – Измерение полного давления в сечении 0-0

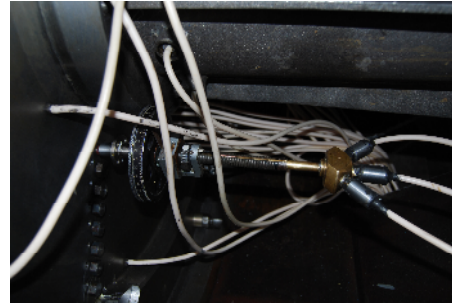


Рисунок 6 – Измерение полного давления в БЛД 3-канальным зондом

Полное давление исследуемого воздушного потока измеряется с помощью трубок полного давления (ТПД) и 3-канального зонда, рис. 5, 6

На входе в ступень производилось измерение полного давления в ядре потока, по которому дублируется определение массового расхода. На этапе предварительных экспериментов осевой канал, расположенный перед рабочим колесом, тщательно тарировался траверсированием поля полных давлений в контрольном сечении 0-0. Эпюры распределения скоростей перед рабочим колесом представлены на рис. 7.

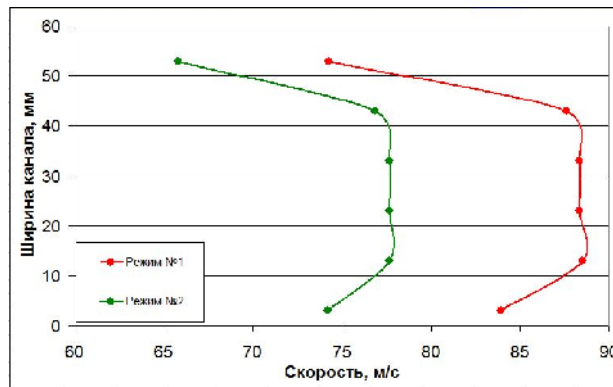


Рисунок 7 – Эпюры скоростей перед рабочим колесом



Рисунок 8 – Пьезометрические щиты

Приемники статического давления, ТПД и 3-канальный зонд соединены импульсными трубками с U-образными манометрами, объединенными в пьезометрические щиты, рис. 8.

Перечень дополнительных средств измерений с соответствующими абсолютными погрешностями представлен в табл. 2.

Совершенствование элементов прочной части центробежной ступени и расширение представлений о характере процессов, происходящих в них, невозможно без экспериментальных исследований с высокой точностью. Это накладывает определенные требования к точности измерительной и регистрирующей аппаратуры, и способам обработки экспериментальных данных.

Таблица 2 - Абсолютная погрешность средств измерений

Наименование	Предел измерения	Абсолютная приборная погрешность
Термопреобразователь сопротивления ТСП-1088	250° С	± 0,1° С
Термометр сопротивления рt100	150° С	± 0,1° С
Термопара с открытым спаем	100° С	± 0,1° С
Дифманометр «Сапфир»	100 кПа	± 0,25 кПа
Термометр ртутный ТЛ-4	50° С	± 0,1° С
Пьезометр водяной	4000 Па	± 10 Па
Тахометр	20000 об/с	±10 об/с

При определении абсолютных и относительных погрешностей параметров течения газа в центробежной ступени (давления, плотности, скорости, расхода, коэффициента потерь) использовались аналитические зависимости, представленные в [3].

Абсолютная предельная погрешность определения искомой величины находится из соотношения

$$\Delta y = \left| \frac{\partial y}{\partial x_1} \right| \Delta x_1 + \left| \frac{\partial y}{\partial x_2} \right| \Delta x_2 + \left| \frac{\partial y}{\partial x_3} \right| \Delta x_3 + \dots + \left| \frac{\partial y}{\partial x_n} \right| \Delta x_n. \quad (1)$$

Относительная предельная погрешность определения величины находится по формуле

$$\delta(y) = \frac{\Delta y}{y}. \quad (2)$$

Абсолютные погрешности непосредственно измеряемых величин определены на основании классов точности применявшихся измерительных приборов и имеющихся литературных данных [1, 2] и представлены в табл. 3.

Таблица 3 - Погрешности вычисляемых величин

Вычисляемый параметр, размерность	Диапазон изменений значения параметра	Абсолютная предельная погрешность	Относительная предельная погрешность определяемой величины, %
Плотность ρ , кг/м ³	1,144 – 1,186	0,0021 – 0,0023	0,18 – 0,19
Массовый расход \dot{m} , кг/с	0,823 – 2,085	0,010 – 0,011	0,5 – 1,2
Объемный расход \bar{V}_0 , м ³ /с	0,699 – 1,738	0,010 – 0,011	0,7 – 1,4
Степень повышения давления П	1,105 – 1,196	0,00044	0,04
Условный расход коэф. Φ_0	0,0314 – 0,0821	$5 \cdot 10^{-4}$ – $6,3 \cdot 10^{-4}$	0,8 – 1,6
Коэф. политропного напора ψ_n	0,2737 – 0,5	0,0015 – 0,0018	0,4 – 0,5
Политропный КПД η_n	0,737 – 0,86	0,009 – 0,0241	1,1 – 3,3

ВЫВОДЫ

1. Конструкция аэродинамического стенда позволяет экспериментальным путем определять пути газодинамического совершенствования проточной части центробежной ступени.
2. Стенд обеспечивает возможность испытаний модельных ступеней как промежуточного, так и концевого типа.
3. По результатам экспериментального исследования модельной ступени представляется возможным определять как интегральные характеристики ступени, так и отдельных ее элементов, таких как рабочее колесо, диффузор.
4. Значения погрешностей критериев эффективности ступени позволяет проводить на данном стенде экспериментально исследовательские работы в области центробежных компрессоров.

SUMMARY

AIRDYNAMICAL RIG FOR INVESTIGATION OF THE CENTRIFUGAL COMPRESSOR MODEL STAGES

Smirnov A. V., Borodenko O. M., Obukhov O. A., Udod M. N., PJSC Sumy Frunze NPO, Sumy, Ukraine

The results of the AD-400 airdynamical rig enhancement are presented in the paper. The rig is applied by PJSC Sumy Frunze NPO for the experimental investigation of the centrifugal compressor model stages in the wide range of the conditional flow rate coefficient.

Key words: *airdynamical rig, model stage, gasdynamic characteristic, control section, absolute and relative errors.*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галеркин Ю. Б. Методы исследования центробежных компрессорных машин / Ю. Б. Галеркин, Ф. С. Рекстин. – Л.: Машиностроение, 1969. – 304 с.
2. Повх И.Л. Аэродинамический эксперимент в машиностроении. – М. - Л.: Машгиз, 1965. - 480 с.
3. Калинкевич Н. В. Теория турбокомпрессоров: учебное пособие / Н. В. Калинкевич, А. Г. Гусак. – Сумы: Сумский государственный университет, 2011. - 221 с.

Поступила в редакцию 21 февраля 2012 г.