

М. Б. Рафиков, К. А. Щербаков,  
*Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия*

## ОПЫТ СОЗДАНИЯ СТЕНДА НИЗКОСКОРОСТНОГО ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА

The paper presents an experimental stand for conducting studies of fluid flow in the model stages of axial compressors (OC) of gas turbine units (GTP), which solves the problem of significant financial and time costs for the development of OC. This development allows students to test theoretical calculations in practice, and enterprises to speed up the development process and increase its efficiency.

В текущее время в России заметно отставание в техническом процессе турбостроения по сравнению с зарубежными компаниями. Как известно, процесс разработки газотурбинных установок (ГТУ) занимает 5–8 лет с большими финансовыми затратами. Связано это с отсутствием испытательных полигонов и, как следствие, проверка новых технических решений возможна только на опытных образцах, на создание которых может тратиться до 50 тонн дорогостоящих материалов. Благодаря испытательному стенду появляется возможность проектирования осевых компрессоров (ОК) из перерабатываемых материалов с намного меньшим бюджетом и уменьшением временных издержек.

### I. Стенд низкоскоростного одноступенчатого компрессора

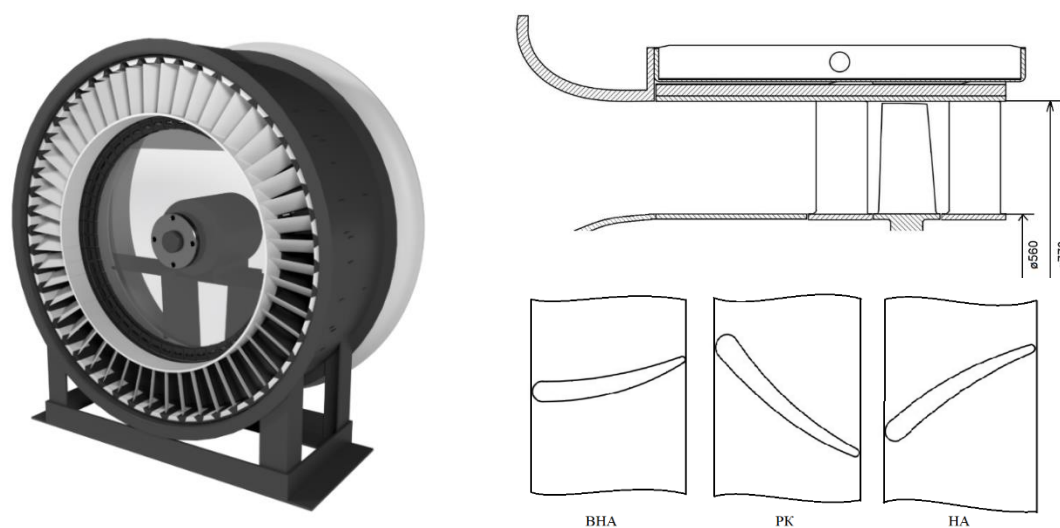


Рис. 1. Стенд низкоскоростного осевого компрессора для модельных ступеней; проточная часть в меридиональном и цилиндрическом сечениях.

Данный стенд представляет собой одноступенчатый осевой компрессор с периферийным диаметром  $D_{\text{п}} = 770$  мм. Принимая в расчет этот размер и максимальное возможное втулочное отношение для стационарного компрессоростроения ( $\bar{d} = 0,5 \dots 0,7$  для первых ступеней) [1], было спроектировано и изготовлено рабочее колесо с диаметром  $D_{\text{к}} = 560$  мм.

Приводом данного ОК является электродвигатель мощностью 3 кВт. Регулирование оборотов осуществляется и поддерживается частотным преобразователем. Т. к. не точное определение частоты вращения может привести к рассогласованию параметров при верификации, точность регулирования преобразователя была подтверждена стробоскопом. Данный процесс подробно представлен в работе [2]. Конструкция стенда унифицирована и позволяет в кратчайшие сроки менять и исследовать модельные ступени ОК. В качестве способа изготовления проточной части (ПЧ) был сделан выбор в пользу аддитивных технологий. Преимущества данного способа: более низкие финансовые затраты по сравнению с другими технологиями, быстрый процесс изготовления деталей, высокая точность позиционирования, минимальные размерные отклонения от САД модели.

## **II. Измерение газодинамических параметров потока**

Первоочередной задачей измерений является замер расходно-напорной характеристики на максимальной частоте вращения. Для расчета расхода необходимо измерить полные и статические параметры. По зависимости возможно рассчитать скорость потока и далее массовый расход:

$$\begin{cases} P^* = P_{\text{st}} + \frac{\rho w^2}{2} \\ G = \rho w F \end{cases}$$

где  $P^*$  – полное давление;  $P_{\text{st}}$  – статическое давление;  $G$  – массовый расход рабочего тела;  $\rho$  – плотность рабочего тела;  $w$  – скорость движения потока;  $F$  – площадь проходного сечения.

Поэтому, для получения необходимых параметров потока на выходе из ОК создается переменное сопротивление с помощью дроссельной заслонки. Помимо расчета расходно-напорной характеристики, не менее важной составляющей в

исследовании модельных ступеней является получение радиальных профилей давления в межлопаточном канале. Проводя их анализ, можно оценить уровень загромождения, величину пограничных слоев и другие явления.

При разработке современных ОК все больше времени уделяется применению расчетных методов, как правило, построенных на решении осреднённых по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса. Однако, это требует еще более детальной верификации, потому что, как правило, доводка компрессора ведется в трехмерной постановке. В связи с этим требуется измерение параметров по всей высоте канала.

Для оценки уровня торцевого пограничного слоя необходимо провести траверсирование ПЧ. Суть данного метода заключается в погружении измерительного насадка в межлопаточный канал и измерения им профиля полного давления, скорости и угла потока. Соответственно, чем выше разрешение сервомотора,двигающего насадок, тем более подробна будет картина изменения параметров по высоте ПЧ. На рисунке 3 изображены непосредственно само устройство и измерительный насадок.

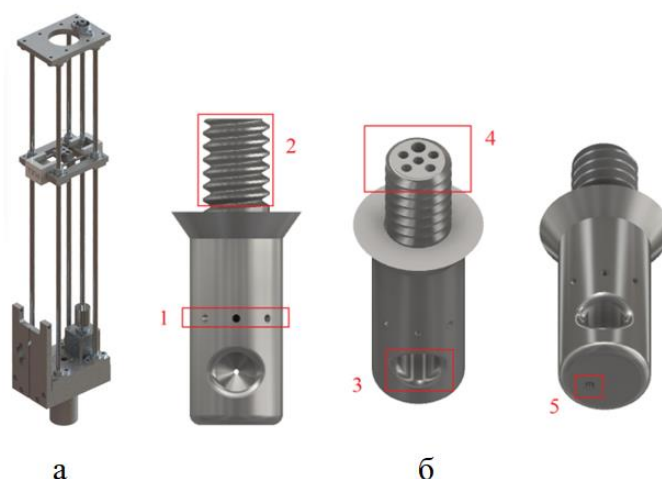


Рис. 3. Траверсирующее устройство (а), измерительный насадок (б).

1 – отверстия для измерения статического давления и угла потока; 2 – резьба для установки в несущий стержень; 3 – камера торможения для измерения полной температуры; 4 – отверстия для установки трубок, термопары и никелевой нити; 5 – отверстие для вывода никелевой нити.

Данное измерительное устройство состоит из двух основных узлов: насадки зонда и перемещающейся платформы. Платформа перемещает зонд в

радиальном направлении при помощи шагового электродвигателя, что дает возможность получить параметры в 200 точках по высоте ПЧ. Используемый насадок аэродинамически обтекаем, имеет три отверстия для отбора статического давления и специальную камеру торможения для измерения температуры. Также в камере предусмотрено дополнительное измерение давления. Выполнено это с целью дублирования показаний и своевременного определения возможных искажений (например, из-за засорения канала). На торцевой поверхности насадка выполнен вывод никелевой нити, которая в случае контакта с ПЧ замыкает электрическую цепь и включает подъем насадка в исходное положение.

### **Заключение**

В результате работы спроектирован и изготовлен экспериментальный стенд низкоскоростного осевого компрессора для модельных ступеней. Использование данной установки позволит проводить изучение аэродинамики проточной части методом траверсирования между компрессорными лопаточными венцами с количеством точек замеров параметров по высоте до 200 в одном сечении. Данная разработка позволит предприятиям ускорить процесс разработки и сэкономит значительное количество дорогостоящих материалов.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Ревзин, Б. С., Компрессоры ГТУ / Б. С. Ревзин, В. А. Седунин. – Екатеринбург : УрФУ, 2014. – 89 с.
2. Серков, С. А. Разработка экспериментального стенда для изучения нестационарных газодинамических явлений в ступени осевого вентилятора / С. А. Серков, Ю. Г. Марченко, С. В. Богданец, И. А. Калинин, В. А. Седунин // Сборник тезисов «Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации». – Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2018.
3. Ревзин, Б. С. Газоперекачивающие агрегаты с газотурбинным приводом / Б. С. Ревзин. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2002. – 269 с.

4. Седунин, В. А. Моделирование физических процессов в турбомашинах / В. А. Седунин, В. Л. Блинов, Я. П. Шепелина; под общ. ред. В. А. Седунина. – Екатеринбург: УрФУ, 2016. – 123 с.

5. Калинин, И. А. Разработка методики проектирования специализированного измерительного зонда для проведения траверсирования осевых компрессоров ГТУ / И. А. Калинин, Ю. Г. Марченко, В. А. Седунин, В. Л. Блинов, О. В. Комаров, А. В. Скороходов, Ю. М. Бродов, С. И. Шкрылев. – Екатеринбург: УрФУ, 2020. – 245 с.

6. Калинин, И. А. Аэродинамическая оптимизация насадка зонда измерительной траверсы / И. А. Калинин, В. А. Седунин // Сборник тезисов Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых и специалистов «Авиационные двигатели и силовые установки». – М.: ЦИАМ, 2019. – С. 258–260.

Murat M. Rafikov, Kirill A. Shcherbakov,  
*Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia*

#### **EXPERIENCE IN CREATING A LOW-SPEED AXIAL COMPRESSOR STAND**