

УДК 533.6.07

Разработка экспериментального стенда для исследования аэродинамических характеристик высоконапорных вентиляторов

Волков Максим Александрович ¹	maks-volkov-2004@yandex.ru
Краснов Андрей Витальевич ¹	andreykrasnow@icloud.com
Репещук Никита Сергеевич ¹	petp0160@yandex.ru
Терентьев Сергей Алексеевич ¹	s.terentev.klg@gmail.com
Шевелев Денис Владимирович ¹	denis.v.shevelev@bmstu.ru SPIN-код: 2076-0373
Афанасов Ян Валерьевич ²	y.afanasov@kadvi.ru SPIN-код: 1949-4471

¹ КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

² ПАО «Калужский двигатель», Калуга, Россия

Аннотация. Представлены результаты разработки экспериментального стенда для исследования аэродинамических характеристик высоконапорных вентиляторов силами студентов-стажеров Студенческого научно-технического центра ПАО «Калужский двигатель» — КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Описано назначение и устройство экспериментального стенда, опыт его разработки. Успешная реализация представленного проекта позволит выполнить стендовую отработку вентилятора системы охлаждения газотурбинного двигателя ГТД-1250.

Ключевые слова: экспериментальный стенд, вентилятор, аэродинамические характеристики, газотурбинный двигатель, энергетическое машиностроение

Development of an experimental stand for studying the aerodynamic characteristics of high-pressure fans

Volkov Maksim Aleksandrovich ¹	maks-volkov-2004@yandex.ru
Krasnov Andrey Vitalievich ¹	andreykrasnow@icloud.com
Repeshuk Nikita Sergeevich ¹	petp0160@yandex.ru
Terentyev Sergey Alekseevich ¹	s.terentev.klg@gmail.com
Shevelev Denis Vladimirovich ¹	denis.v.shevelev@bmstu.ru SPIN-code: 2076-0373
Afanasov Yan Valerievich ²	y.afanasov@kadvi.ru SPIN-code: 1949-4471

¹ Kaluga Branch BMSTU, Kaluga, Russia

² Kaluga Engine PJSC, Kaluga, Russia

Abstract. The results of the development of an experimental stand for the study of the aerodynamic characteristics of high-pressure fans by the student trainees of the Student Scientific and Technical Center of PJSC Kaluga Engine — KB Bauman Moscow State Technical University are presented. The purpose and principal design of the experimental stand and the experience of it's development are described. The successful implementation of the pre-

sented project will make it possible to perform bench testing of the cooling fan of the GTD-1250 gas turbine engine.

Keywords: *experimental stand, fan, aerodynamic characteristics, gas turbine engine, energy engineering*

Введение. Стендовая отработка как компрессоров, так и вентиляторов является необходимым звеном в их разработке. Во-первых, это связано со сложностью газодинамических расчетов течения потока в данном типе лопаточных машин. Аналитические методики позволяют достаточно точно проводить расчеты номинальных режимов работы компрессоров/вентиляторов только в случае наличия опоры на большой массив экспериментальных данных. Во-вторых, исследование характеристик лопаточных машин непосредственно в объектовых условиях (например, в составе ГТД) предельно затруднено из-за компоновочных ограничений, ограниченностью возможных точек замера параметров, непригодностью систем ГТД для снятия характеристики компрессора во всем диапазоне режимов его работы и др. В-третьих, несмотря на то, что методики численного моделирования обладают большим потенциалом для анализа и расчета характеристик как компрессоров, так и вентиляторов, они требуют обязательной экспериментальной верификации решаемых задач хотя бы в модельных условиях для получения достоверных результатов как качественно, так и количественно.

ПАО «Калужский двигатель» [1] применяет в своей продукции центробежные компрессоры и вентиляторы, которые были спроектированы и исследованы преимущественно во времена СССР, часто в сотрудничестве с ведущими авиационными институтами с использованием их испытательной базы. На данный момент на предприятии существует потребность в модернизации проточной части существующих изделий, а также разработки новых изделий, обладающих конкурентными преимуществами.

Для достижения поставленных выше целей и с учетом отсутствия подобных стендов на предприятии и кадровыми проблемами, было решено создать совместный с кафедрой тепловых двигателей и гидромашин Калужского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана [2] Студенческий научно-технический центр (Студ-НТЦ) с пилотной темой «Создание автоматизированного стенда для снятия аэродинамических характеристик высоконапорных вентиляторов».

Материалы и методы. Объектом исследования проектируемого стенда является центробежный высоконапорный вентилятор из состава маршевого танкового газотурбинного двигателя ГТД-1250. Он обеспечивает охлаждение вспомогательных навесных агрегатов и наддув первой опоры двигателя. Благодаря его работе, агрегаты и узлы ГТД способны работать в любых климатических условиях, несмотря на плотную компоновку и высокое тепловыделение моторного отсека из-за близости вспомогательных агрегатов к корпусу камеры сгорания. Планируемое форсирование ГТД-1250 повлечет за собой замену штатного вентилятора на более производительный, что потребует, как его расчета и проектирования, так и определения аэродинамических характеристик.

Определены и регламентированы [3, 4] параметры, характеризующие работу вентилятора: полное p_v [Па] и статическое давление p_{sv} [Па], объемная производительность Q [м³/с], потребляемая мощность N_e , полный и статический КПД.

Ориентируясь на параметры штатного вентилятора двигателя ГТД-1250, можно предположить, что требуемый для форсированного двигателя вентилятор должен обладать характеристиками $p_v = 16\text{--}20$ кПа, $Q = 0,4\text{--}0,6$ кг/с, $N_e = 10\text{--}15$ кВт и работать на нагнетание.

Определение номинальных аэродинамических характеристик вентиляторов осуществляется путем проведения натурных экспериментальных исследований, проведение и обработка результатов которых осуществляется по регламентированным методикам [5].

Конечной целью экспериментального исследования вентилятора является получение его аэродинамических характеристик, приведенных к нормальным атмосферным условиям в табличной и (или) графической форме.

При разработке стенда за основу была взята аэродинамическая схема типа «В» [5]. Особенностью схемы является то, что она имитирует условия работы вентилятора со свободным входом и нагнетательным трубопроводом на выходе.

Так как габаритные требования, предъявляемые к вентилятору ГТД-1250, предельно жесткие, то для достижения его требуемых аэродинамических характеристик, необходима высокая частота вращения рабочего колеса ($n > 25\,000$ об/мин). Поэтому даже при использовании высокооборотного электродвигателя в качестве привода, в состав экспериментального стенда требуется включение мультипликатора оборудованного циркуляционной системой смазки и охлаждения. Для контроля работы экспериментального стенда и регистрации параметров воздушного потока его тракту, стенд должен быть оборудован контрольно-измерительным оборудованием — датчиками температуры, давления, вибрации, объединенными в контрольно-измерительную систему.

Результаты. Реализация проекта создания экспериментального стенда для исследования аэродинамических характеристик высоконапорных вентиляторов силами студентов-стажеров Студ-НТЦ была начата в феврале 2025 года. В течение предусмотренной учебным планом профилирующей практики, на протяжении четырех недель было разработано, согласовано и утверждено техническое задание на разработку экспериментального стенда. Оно включает в себя требования, предъявляемые к стенду, обоснование его типа и компоновки, перечень измеряемых параметров, номенклатуру покупных изделий. Это потребовало изучения особенностей ГТД-1250 и его вспомогательных узлов, знакомства с коллективом конструкторского и технологического отделов ПАО «Калужский двигатель» и производственными возможностями предприятия, с правилами оформления конструкторской документации, проведения переговоров и консультаций с поставщиками покупных узлов и приборов.

Далее, весной 2025 года, был разработан эскизный проект экспериментального стенда с конструкторской проработкой его важнейших узлов — мультипликатора и дросселирующего устройства. На рис. 1 представлена 3D-модель спроектированного стенда.

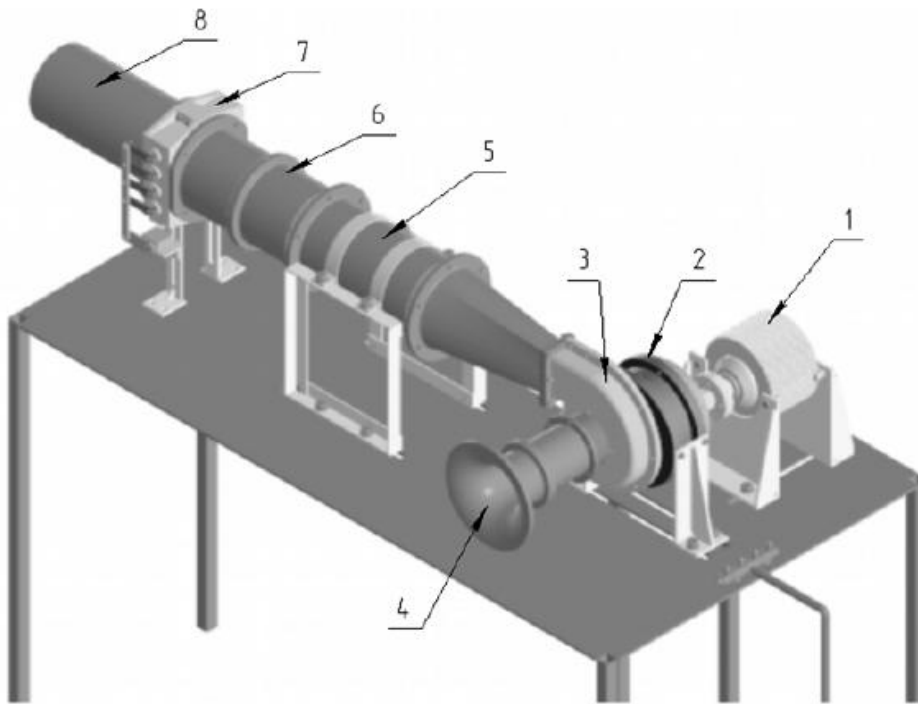


Рис. 1. Схема экспериментального стенда для исследования аэродинамических характеристик высоконапорных вентиляторов:

1 — электродвигатель; 2 — мультипликатор; 3 — корпус исследуемого вентилятора; 4 — входное расходомерное устройство; 5 — струевыпрямитель; 6 — выходной измерительный трубопровод; 7 — дросселирующее устройство; 8 — выходной трубопровод

Летом 2025 года, в рамках предусмотренной учебным планом технологической практики, осуществлена разработка конструкторской рабочей документации для всех узлов и деталей стенда, проработаны вопросы технологии их производства. Полный комплект рабочей конструкторской документации на экспериментальный стенд включает в себя 40 рабочих чертежей деталей и 23 сборочных единицы, оформленных в соответствии с требованиями ЕСКД в САД системе КОМПАС-3D. Документация охватывает все ключевые узлы стенда: улитку вентилятора, мультипликатор, дросселирующее устройство, систему измерений и раму.

Наиболее сложные узлы стенда — мультипликатор и автоматизированное дросселирующее устройство были проработаны в рамках курсового проектирования по дисциплине «Детали машин». На рис. 2 представлена 3D-модель мультипликатора. Мультипликатор состоит из круглого алюминиевого корпуса 1 и крышки 2. Вращение вала электродвигателя передается через фланцевую муфту вала-шестерне 3. Посредством зубчатого зацепления вращение передается на быстроходный вал 5.

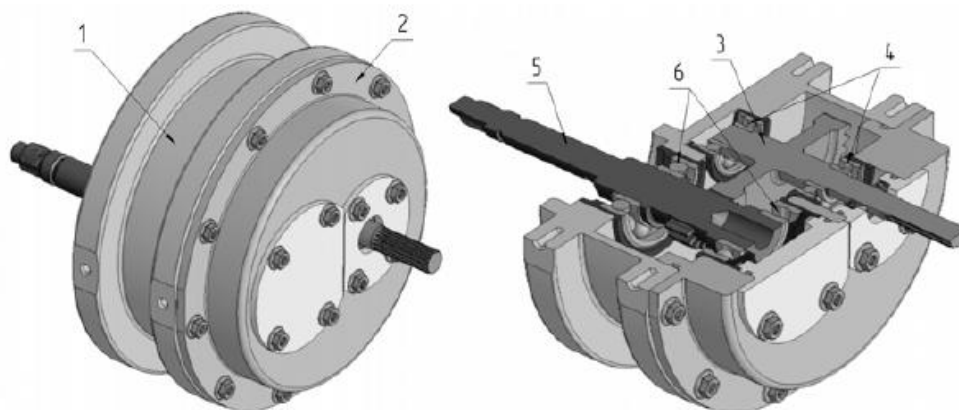


Рис. 2. Мультипликатор

Мультипликатор обладает следующими номинальными характеристиками:

- одна прямозубая ступень передачи крутящего момента, передаточное отношение $U = 0,4$;
- передаваемая мощность на тихоходном валу: $N = 25$ кВт;
- номинальный рабочий диапазон частот вращения 10 000–14 000 об/мин и 25 000–35 000 об/мин на тихоходном и быстроходном валах соответственно;
- КПД мультипликатора: $\eta = 0,95$.

Дросселирующее устройство предназначено для снятия расходной характеристики вентилятора. На рис. 3 представлена 3D-модель дросселирующего устройства.

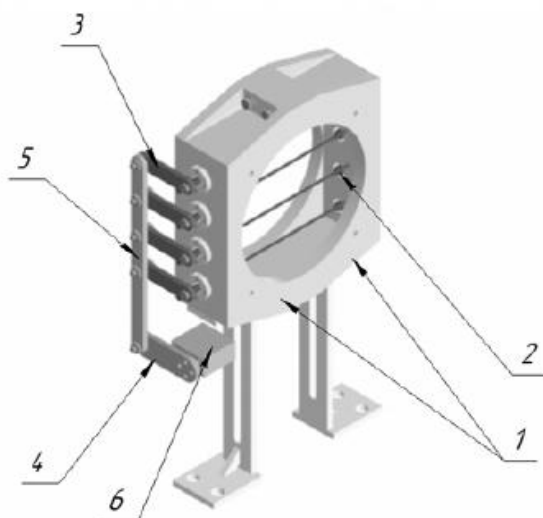


Рис. 3. Дросселирующее устройство

Дросселирующее устройство состоит из двух половинок-корпусов 1, поворотных заслонок-ламель 2, ведомых тяг 3, ведущей тяги 4, синхронизатора 5 и сервопривода 6. К ведущей тяге присоединяется сервопривод и приводит ее во вращательное движение, при помощи синхронизатора это движение передается на ведомые тяги, которые связаны с ламелями, что и приводит их

во вращение, тем самым изменяя площадь канала, через который проходит воздух. Максимальное проходное сечение от номинального диаметра трубопровода — 95 %, минимальное — 2 %.

Для обеспечения точного измерения параметров воздушного потока и безопасного функционирования экспериментального стенда была разработана контрольно-измерительная система на основе оборудования фирмы ОВЕН [6], схема которой представлена на рис. 4.

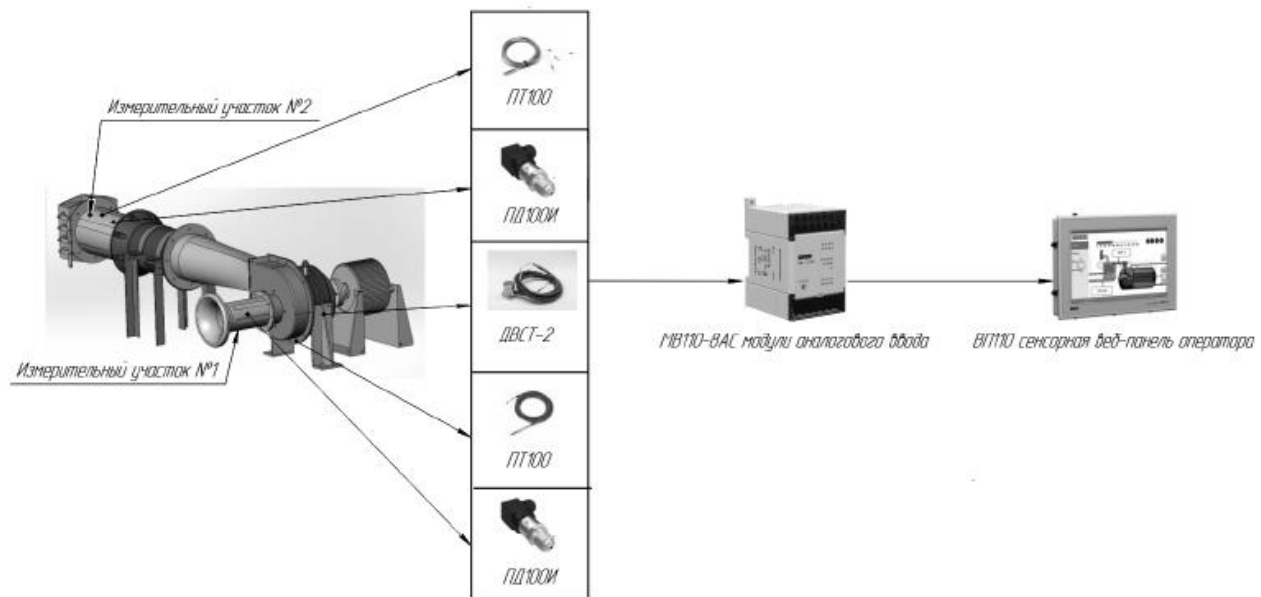


Рис. 4. Схема измерений

Система предназначена как для проведения измерений необходимых для экспериментального определения характеристик вентилятора (датчики давления ПД100, ПД100И, термопреобразователь Pt100), так и для контроля состояния стенда (температура масла и вибрации мультипликатора). Все измерительные сигналы поступают в модуль аналогового ввода MB110-8AC, который обеспечивает их оцифровку, первичную обработку и передачу в сенсорную панель оператора ВП110. Это позволяет в реальном времени регистрировать параметры, и контролировать работу стенда.

Заключение. В ходе реализации первого этапа проекта создания экспериментального стенда для исследования аэродинамических характеристик высоконапорных вентиляторов студентами-стажерами Студ-НТЦ ПАО «Калужский двигатель» — КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана:

- разработано техническое задание на экспериментальный стенд;
- составлен перечень покупных изделий;
- разработана рабочая конструкторская документация для всех деталей и узлов стенда.

Можно надеяться, что в итоге дальнейшей успешной реализации проекта будет создан экспериментальный стенд, на котором можно будет не только

снять аэродинамические характеристики как штатного, так и перспективного вентилятора двигателя ГТД-1250, но и после дальнейшей доработки осуществлять верификацию математических моделей вентиляторов, исследовать их динамические характеристики и нерасчетные режимы, использовать стенд для выполнения лабораторных работ студентами направления подготовки 13.03.03 «Энергетическое машиностроение».

Список источников

- [1] *Официальный сайт ПАО «Калужский двигатель»*. URL: <https://kadvi.ru/?ysclid=mdcr4ay3q6483138297> (дата обращения 22.07.2025).
- [2] *Официальная страница кафедры тепловых двигателей и гидромашин на сайте КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана*. URL: <https://kf.bmstu.ru/edu/kf/mk/mk3> (дата обращения 22.07.2025).
- [3] ГОСТ 34002–2016. *Вентиляторы. Термины и классификация*. Москва, Стандартинформ, 2017, 43 с.
- [4] ГОСТ 10616–2015. *Вентиляторы радиальные и осевые. Размеры и параметры*. Москва, Стандартинформ, 2016, 27 с.
- [5] ГОСТ 10921–2017. *Вентиляторы радиальные и осевые. Методы аэродинамических испытаний*. Москва, Стандартинформ, 2018, 49 с.
- [6] *Официальная страница фирмы ОВЕН*. URL: <https://owen-russia.ru/> (дата обращения 22.07.2025).