

УДК 621.432

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОГРЕШНОСТИ ПАРАМЕТРОВ КАК ИНСТРУМЕНТ АНАЛИЗА ТЕХНОЛОГИЙ ИСПЫТАНИЯ КОМПРЕССОРОВ ТУРБОВАЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Д.В. ПЕСТОВ¹, Е.Д. ГАТАУЛЛИНА², В.Н. МАТВЕЕВ³, Ю.Д. НОВИКОВА⁴

¹pestov.dv@ssau.ru, ²helenag@mail.ru, ³valerium2008@rambler.ru, ⁴novikova@ssau.ru

¹⁻⁴ ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет
им. академика С.П. Королева»

Поступила в редакцию 06.03.2024

Аннотация. Проведён анализ применяемых технологий испытания компрессоров турбовальных двигателей стационарных энергоустановок. Разработан метод определения погрешностей параметров компрессора с учётом как систематических неисключённых, так и случайных погрешностей. Установлено, что для повышения точности замера приведённого расхода воздуха следует отказаться от расходомерного коллектора на входе в двигатель и использовать специально спроектированный q – метр, устанавливаемый в воздушный канал передней опоры двигателя. Для уменьшения погрешности степени повышения давления и КПД компрессора целесообразно перейти на систему измерения избыточного давления за компрессором повышенного класса точности. Применение предлагаемых систем измерения приведённого расхода воздуха и избыточного давления за компрессором, как показали расчётные исследования, обеспечивает уменьшение погрешности замера расхода газа с 11,4 до 3,3%.

Ключевые слова: испытание двигателя, система измерений, погрешность эксперимента, анализ систем измерений.

ВВЕДЕНИЕ

В процессе проведения испытаний компрессоров газотурбинных двигателей авиационной техники и стационарных энергетических установок осуществляется замер первичных параметров, на основании которых в дальнейшем вычисляются основные параметры компрессора для построения его характеристик.

Вместе с тем наряду с самими параметрами необходимо ещё знать и погрешности их определения. Для оценки этих погрешностей необходимы соответствующие методы, включающие в себя оценки доверительных границ погрешностей прямых и косвенных измерений. Для формирования таких методов под конкретные схемы измерений целесообразно использовать общие нормативные документы – во-первых, ГОСТ Р 8.736-2011 «Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения» [1] и, во-вторых, Рекомендации МИ 2083-90 «Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей» [2].

Методы определения погрешностей измеряемых параметров позволяют судить о точности получаемых экспериментальных результатов, целесообразности применения той или иной системы измерений и в целом всей технологии испытаний.

В связи с этим в настоящей статье на примере типовой схемы измерений стенда для испытаний турбовального двигателя (ТВаД) стационарных энергоустановок разработан соответствующий метод оценки измеряемых параметров компрессора, и выполнен анализ целесообразности рассмотренной технологии испытаний.

СХЕМА СТЕНДА И ЕГО СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Испытания ТВаД стационарных энергетических установок, в том числе на газодинамическую устойчивость (ГДУ), проводятся на стенде, типовая схема которого с указанием измеряемых первичных параметров представлена на рис. 1.

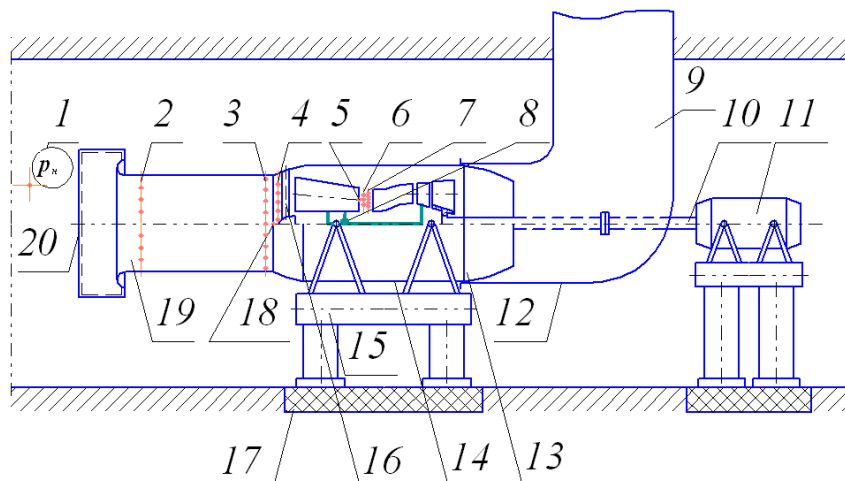


Рис. 1. Схема стенда для испытания турбовального двигателя:

1 – барометр; 2 – замер статического давления разрежения $p_{\text{коп разр}}$; 3 – замер полной температуры потока $t_{\text{вх}}^*$ °С на входе в двигатель (девять точек); 4 – замер полного давления разрежения $p_{\text{вх разр}}^*$ на входе в двигатель (пятиточечная пневмогребенка); 5 – замер избыточного статического давления $p_{\text{к изб}}$ за компрессором в одной точке; 6 – замер полной температуры потока $t_{\text{вх}}^*$ °С за компрессором (трехточечная гребенка); 7 – замер избыточного полного давления $p_{\text{к изб}}^*$ за компрессором (пятиточечная пневмогребенка); 8 – датчик частоты вращения вала газогенератора (вала компрессора) $n_{\text{ГГ}}$; 9 – шахта выхлопа; 10 – выходной вал свободной турбины двигателя; 11 – пневмотормоз; 12 – выхлопная улитка; 13 – сменное сопло; 14 – испытываемый турбовальный двигатель; 15 – станок; 16 – воздушный канал передней опоры; 17 – основание для станка; 18 – замер статического давления разрежения $p_{\text{вх разр}}$ в одной точке; 19 – стендовый расходомерный коллектор; 20 – предохранительная сетка

Испытываемый ТВаД 14 располагается на станке 15, установленном на основании 17. На входе в двигатель смонтирован расходомерный коллектор 19 с предохранительной сеткой 20. На выходе двигателя установлено съёмное сопло 13, размещённое в шахте выхлопа 9. Выходной вал 10 свободной турбины двигателя соединён с пневмотормозом 11.

При определении параметров компрессора в процессе снятия дроссельной характеристики двигателя частота вращения газогенератора $n_{\text{ГГ}}$ увеличивается от частоты вращения на режиме малого газа $n_{\text{ГГ мг}}$ до максимальной частоты вращения $n_{\text{ГГ max}}$ за счёт увеличения расхода топлива. При этом выдерживаются заданные законы регулирования угла установки лопаток регулируемого входного направляющего аппарата (ВНА) в зависимости от частоты вращения, а также открытия и закрытия клапанов перепуска воздуха (КПВ) при различных значениях $n_{\text{ГГ}}$.

На каждой фиксированной частоте вращения газогенератора, в том числе на расчётной частоте вращения $n_{\text{ГГ р}}$, соответствующей расчётной приведённой частоте вращения $n_{\text{пр ГГ р}}$, регистрируются все первичные измеряемые параметры, указанные на рис. 1.

Дроссельные характеристики двигателя определяются при различных соплах, отличающихся значениями площади среза сопла. Одно из них с расчётной величиной площади среза сопла называется расчётным соплом.

При испытаниях на газодинамическую устойчивость после запуска двигатель сначала выводится на режим малого газа, а затем на частоту вращения, соответствующую заданной приведённой частоте вращения. После этого закрываются КПВ, отключаются отборы воздуха на

обогрев ВНА и на внешние нужды. Регулируемый ВНА прикрывается на заданный угол $\alpha_{ВНА}$, и двигатель остаётся работать в таком состоянии в течение нескольких минут.

ТВаД считается прошедшим испытание на газодинамическую устойчивость при отсутствии срывных режимов или помпажа компрессора – «хлопка» в компрессоре. Многолетним опытом эксплуатации этих двигателей, прошедших такое испытание, подтверждена их газодинамическая устойчивость на протяжении всего заданного ресурса и с учётом всех имеющихся допустимых технологических отклонений.

Для определения запаса ГДУ, значение которого необходимо при формировании технических заданий на модернизацию выпускаемых и разработку новых двигателей, первоначально проводится определение параметров компрессора в процессе снятия дроссельной характеристики двигателя с расчётным соплом.

Затем осуществляется дросселирование двигателя за счёт установки сопел с меньшей площадью среза. При этом каждый раз определяются дроссельные характеристики.

Указанным способом дросселирования двигателя добиваются выхода на границу устойчивых режимов работы компрессора при некоторой граничной частоте вращения газогенератора $n_{ГГ гр}$, что сопровождается «хлопком» в компрессоре и повышенной амплитудой колебания статического давления на его выходе.

По замеренным параметрам компрессора при частоте вращения $n_{ГГ} = n_{ГГ гр}$ на границе устойчивых режимов и на дроссельной характеристике двигателя с расчётным соплом находится запас ГДУ.

Перед началом каждого испытания с помощью барометра 1 (см. рис. 1) замеряется атмосферное давление в мм рт. ст.

При проведении любых указанных выше испытаний на каждом установившемся режиме осуществляется измерение следующих первичных параметров.

На входе в двигатель замеряется полная температура потока $t_{вх}^*$ °С с помощью девяти термосопротивлений 3 (см. рис. 1), равномерно установленных по окружности в рассматриваемом сечении, статическое давление разрежения $p_{вх разр}$ в одной точке 18 и полное давление разрежения $p_{вх разр}^*$ с помощью пятиточечной пневмогребёнки 4, установленной во входном диффузоре двигателя.

На выходе из компрессора замеряется:

- полная температура потока t_k^* °С с помощью трёхточечной гребёнки 6;
- избыточное полное давление $p_{к изб}^*$ с помощью пятиточечной пневмогребёнки 7;
- избыточное статическое давление $p_{к изб}$ в одной точке 5.

Для определения приведённого расхода воздуха $G_{в пр}$ на входе в компрессор применяется расходомерный коллектор 19 с площадью поперечного сечения $F_{кол}$. При проведении испытаний в нём замеряется статическое давление разрежения $p_{кол разр}$ в шести точках 2, равномерно расположенных по окружности.

Частота вращения вала газогенератора (вала компрессора) $n_{ГГ}$ замеряется с помощью датчика типа ДЧВ-2500.

На основании первичных измерений параметров при стендовых испытаниях определяются:

- атмосферное давление p_H в Па;
- полная средняя температура потока воздуха на входе в двигатель $t_{вх ср}^*$ °С, вычисляемая по замерам в девяти точках;
- полная средняя температура потока воздуха на входе в двигатель $T_{вх ср}^*$ в градусах Кельвина;
- по температуре $T_{вх ср}^*$ с помощью данных, например, работы [1], находится полная средняя энтальпия потока воздуха на входе в двигатель $i_{вх ср}^*$ в Дж/кг;

- полное среднее давление разрежения на входе в двигатель $p_{\text{вх разр ср}}^*$ в Па, вычисляемое по замерам в пяти точках;

- абсолютное полное среднее давление на входе в двигатель в Па $p_{\text{вх абс ср}}^* = p_H - p_{\text{вх разр ср}}^*$;

- абсолютное статическое давление на входе в двигатель в Па $p_{\text{вх абс}} = p_H - p_{\text{вх разр}}^*$;

- полная средняя температура потока за компрессором $t_{\text{к ср}}^*$ °С, вычисляемая по замерам в трёх точках;

- полная средняя температура потока за компрессором $T_{\text{к ср}}^*$ в градусах Кельвина;

- по температуре $T_{\text{к ср}}^*$ с помощью данных, например, работы [1], находится полная средняя энтальпия потока воздуха за компрессором $i_{\text{к ср}}^*$ в Дж/кг и значение термодинамической функции $\pi(T_{\text{вх ср}}^*)$;

- избыточное полное среднее давление за компрессором $p_{\text{к изб ср}}^*$ в Па, вычисляемое по замерам в пяти точках;

- абсолютное полное среднее давление за компрессором в Па $p_{\text{к абс ср}}^* = p_{\text{к изб ср}}^* + p_H$;

- абсолютное статическое давление за компрессором в Па $p_{\text{к абс}} = p_{\text{к изб}} + p_H$;

- статическое среднее давление разрежения в расходомерном коллекторе $p_{\text{кол разр ср}}$ в Па, вычисляемое по замерам в шести точках;

- абсолютное статическое среднее давление в расходомерном коллекторе в Па:

$$p_{\text{кол абс ср}} = p_H - p_{\text{кол разр ср}};$$

- газодинамические функции в расходомерном коллекторе:

$$\pi(\lambda_{\text{кол}}) = \frac{p_{\text{кол абс ср}}}{p_H}, \lambda_{\text{кол}} = \sqrt{\frac{k_b + 1}{k_b - 1}} \cdot \left\{ 1 - [\pi(\lambda_{\text{кол}})]^{\frac{k_b - 1}{k_b}} \right\} \text{ и } q(\lambda_{\text{кол}}) = \lambda_{\text{кол}} \cdot [\pi(\lambda_{\text{кол}})]^{\frac{1}{k_b}} \cdot \left(\frac{k_b + 1}{2} \right)^{\frac{1}{k_b - 1}};$$

- приведённый расход воздуха на входе в компрессор:

$$G_{\text{в пр}} = G_{\text{в}} \cdot \sqrt{\frac{T_{\text{вх ср}}^*}{288}} \cdot \frac{101325}{p_{\text{вх абс ср}}^*} = m_{\text{Г}} \cdot \frac{101325}{\sqrt{288}} \cdot F_{\text{кол}} \cdot \frac{q(\lambda_{\text{кол}})}{p_{\text{вх абс ср}}^* / p_H} = m_{\text{Г}} \cdot \frac{101325}{\sqrt{288}} \cdot F_{\text{кол}} \cdot \frac{q(\lambda_{\text{кол}})}{\sigma_{\text{вх}}}$$

где $\sigma_{\text{вх}}$ – коэффициент восстановления полного давления во входном тракте стенда перед двигателем;

- по величине $G_{\text{в пр}}$ находится физический расход воздуха через компрессор $G_{\text{в}}$ в кг/с;

- приведённая частота вращения ротора газогенератора в мин^{-1} $n_{\text{ГТ пр}} = n_{\text{ГТ}} \cdot \sqrt{288 / T_{\text{вх ср}}^*}$;

- степень повышения давления воздуха в компрессоре $\pi_{\text{к}}^* = p_{\text{к абс ср}}^* / p_{\text{вх абс ср}}^*$;

- термодинамическая функция $\pi(T_{\text{к с}}^*) = \pi(T_{\text{вх ср}}^*) \cdot \pi_{\text{к}}^*$;

- полная энтальпия потока в изоэнтропическом процессе сжатия на выходе из компрессора $i_{\text{к с}}^*$, определяемая по величине $\pi(T_{\text{к с}}^*)$ с помощью термодинамических функций [3];

- КПД компрессора $\eta_{\text{к}} = (i_{\text{к с}}^* - i_{\text{вх ср}}^*) / (i_{\text{к ср}}^* - i_{\text{вх ср}}^*)$.

Кроме этих параметров, если определены при $n_{\text{ГТ пр}} = n_{\text{ГТ пр гр}}$ значения $G_{\text{в пр р}}$ и $\pi_{\text{к р}}^*$ компрессора двигателя с расчётным соплом и величины $G_{\text{в пр р}}$ и $\pi_{\text{к р}}^*$ на линии устойчивых режимов, находится ещё запас ГДУ (при указанной выше $n_{\text{ГТ пр}}$) по формуле:

$$\Delta K_{\text{у}} = \left(\frac{\pi_{\text{к гр}}^* / G_{\text{в пр гр}}}{\pi_{\text{к р}}^* / G_{\text{в пр р}}} - 1 \right) \cdot 100\%.$$

Следует отметить, что замеры статического давления на входе в двигатель $p_{\text{вх разр}}$ и на выходе из компрессора $p_{\text{к изб}}$ не участвуют в определении параметров компрессора и двигателя в

целом, а используются для анализа пульсаций статического давления в случае перехода работы компрессора двигателя на срывные режимы и помпаж.

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРЕДЕЛЬНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПАРАМЕТРОВ КОМПРЕССОРА ИСПЫТЫВАЕМОГО ДВИГАТЕЛЯ

В качестве исходных данных разработанного метода принимаются предельные погрешности прямых измерений, приведённые в табл. 1 в Международной системе единиц СИ. Здесь же для примера на расчётном режиме работы двигателя даны типовые значения параметров (компрессора ТВаД размерности НК-14СТ) и предельных погрешностей прямых измерений, используемые в дальнейшем для проведения расчётных исследований.

Таблица 1

Типовые значения параметров компрессора ТВаД размерности НК-14СТ и предельных погрешностей параметров, определяемых прямыми измерениями

Параметр	Обозначение	Размерность	Значение
Атмосферное давление	p_H	Па	101325
Средняя полная температура воздуха на входе в двигатель	$t_{вх}^*$	°С	29,2
Среднее полное давление разрежения на входе в двигатель	$p_{вх\ разр}^*$	Па	934
Среднее избыточное полное давление воздуха за компрессором	$p_{к\ изб}^*$	Па	638260
Средняя полная температура воздуха на выходе из компрессора	$t_{к\ ср}^*$	°С	304,7
Среднее статическое давление разрежения в расходомерном коллекторе	$p_{кол\ разр\ ср}$	Па	3297
Частота вращения ротора газогенератора	$n_{ГГ}$	мин ⁻¹	7273
Приведённый расход воздуха на входе в компрессор	$G_{в\ пр}$	кг/с	30,5
Коэффициент восстановления полного давления во входном тракте стенда	$\sigma_{вх}$	—	0,991
Степень повышения давления в компрессоре	π_k^*	—	7,4
КПД компрессора	η_k	%	77,4
Предельная относительная погрешность измерения атмосферного давления	$\bar{\Delta}p_H$	%	0,15
Предельная неисключённая систематическая абсолютная погрешность измерения полной температуры воздуха на входе в двигатель каждой термопарой	$\theta(t_{вх}^*)$	°С	0,5
Предельная неисключённая систематическая абсолютная погрешность измерения полного давления разрежения на входе в двигатель	$\theta(p_{вх\ разр}^*)$	Па	20
Предельная неисключённая систематическая абсолютная погрешность измерения полного избыточного давления на выходе из компрессора	$\theta(p_{к\ изб}^*)$	Па	4000
Предельная неисключённая систематическая абсолютная погрешность измерения полной температуры воздуха на выходе из компрессора каждой термопарой	$\theta(t_k^*)$	°С	1,0
Предельная относительная погрешность измерения частоты вращения ротора газогенератора	$\bar{\Delta}(n_{ГГ})$	%	0,30
Предельная неисключённая систематическая абсолютная погрешность измерения статического давления разрежения в расходомерном коллекторе	$\theta(p_{кол\ разр})$	Па	20

Примечание: Значения погрешностей приведены без учёта знака.

Надо отметить, что обычно в случае единичных измерений первичных параметров значения предельных неисключённых систематических погрешностей считаются существенно больше случайных погрешностей. Однако в случае замера первичных параметров в характерных сечениях проточной части в нескольких точках появляется возможность учесть и их случайную погрешность.

Расчёт предельных погрешностей прямых многократных измерений проводится в соответствии с рекомендациями ГОСТ Р 8.736-2011 [1]. В качестве примера ниже в п. 1 представлены формулы для определения погрешностей полного давления разрежения на входе в двигатель.

1. Погрешности измерения среднего полного давления разрежения воздуха на входе в двигатель.

1.1. Относительное среднее квадратическое отклонение среднего полного давления разрежения воздуха на входе в двигатель:

$$\bar{S}(p_{\text{вх разр ср}}^*) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n(p_{\text{вх разр}}^*)} (p_{\text{вх разр } i}^* - p_{\text{вх разр ср}}^*)^2}{n(p_{\text{вх разр}}^*) \cdot [n(p_{\text{вх разр}}^*) - 1]}} \cdot 100\% ,$$

где $n(p_{\text{вх разр}}^*) = 5$ – число точек замера давления $p_{\text{вх разр}}^*$.

1.2. Доверительные границы случайной относительной погрешности среднего полного давления разрежения воздуха на входе в двигатель:

$$\bar{\varepsilon}(p_{\text{вх разр ср}}^*) = t_q(p_{\text{вх разр}}^*) \cdot \bar{S}(p_{\text{вх разр ср}}^*) , \%$$

где $t_q(p_{\text{вх разр}}^*)$ – коэффициент Стьюдента, зависящий от доверительной вероятности и числа точек замера давления $p_{\text{вх разр}}^*$.

1.3. Предельная неисключённая систематическая относительная погрешность измерения среднего полного давления разрежения воздуха на входе в двигатель:

$$\bar{\theta}(p_{\text{вх разр ср}}^*) = [\theta(p_{\text{вх разр}}^*) / p_{\text{вх разр ср}}^*] \cdot 100\% .$$

Аналогичным образом определяются погрешности измерений $t_{\text{вх ср}}^*$, $t_{\text{к ср}}^*$, $p_{\text{к изб ср}}^*$ и $p_{\text{кол разр ср}}^*$.

Расчёт предельных погрешностей косвенных измерений проводится в соответствии с Рекомендациями МИ 2083-90 [2]. В качестве примера ниже в п. 2 представлены формулы для определения погрешностей среднего абсолютного полного давления воздуха на входе в двигатель.

2. Погрешности определения среднего абсолютного полного давления воздуха $p_{\text{вх абс ср}}^*$.

2.1. Относительное среднее квадратическое отклонение среднего абсолютного полного давления воздуха на входе в двигатель:

$$\bar{S}(p_{\text{вх абс ср}}^*) = \sqrt{\left(\frac{p_H}{p_H - p_{\text{вх разр ср}}^*}\right)^2 \cdot \bar{S}^2(p_H) + \left(\frac{p_{\text{вх разр ср}}^*}{p_H - p_{\text{вх разр ср}}^*}\right)^2 \cdot \bar{S}^2(p_{\text{вх разр ср}}^*)} , \%$$

где $\bar{S}(p_H)$ – среднее квадратическое отклонение атмосферного давления, которое можно принять равным $\bar{\Delta}p_H / \sqrt{3}$.

2.2. Доверительные границы случайной относительной погрешности среднего абсолютного полного давления воздуха на входе в двигатель:

$$\bar{\varepsilon}(p_{\text{вх абс ср}}^*) = t_q(p_{\text{вх абс}}^*) \cdot S(p_{\text{вх абс ср}}^*) , \%$$

где $t_q(p_{\text{вх абс}}^*)$ – коэффициент Стьюдента, зависящий от доверительной вероятности и числа степени свободы $f_{\text{эф}}(p_{\text{вх абс}}^*)$ [3], которое находится как

$$f_{\text{эф}}(p_{\text{вх абс}}^*) = \frac{\left[p_H^2 \cdot \bar{S}^2(p_H) + (p_{\text{вх разр ср}}^*)^2 \cdot \bar{S}^2(p_{\text{вх разр ср}}^*) \right]}{\left[\frac{p_H^4 \cdot \bar{S}^4(p_H)}{n(p_H)+1} + \frac{(p_{\text{вх разр ср}}^*)^4 \cdot \bar{S}^4(p_{\text{вх разр ср}}^*)}{n(p_{\text{вх разр}}^*)+1} \right]} - 2,$$

где $n(p_H)$ – количество замеров атмосферного давления при проведении одного испытания двигателя.

2.3. Предельная неисключённая систематическая относительная погрешность определения среднего абсолютного полного давления воздуха на входе в двигатель:

$$\bar{\theta}(p_{\text{вх абс ср}}^*) = K \sqrt{\left(\frac{p_H}{p_H - p_{\text{вх разр ср}}^*} \right)^2 \cdot \bar{\theta}^2(p_H) + \left(\frac{p_{\text{вх разр ср}}^*}{p_H - p_{\text{вх разр ср}}^*} \right)^2 \cdot \bar{\theta}^2(p_{\text{вх разр ср}}^*)}, \%$$

где $K = 1,1$ – коэффициент, соответствующий доверительной вероятности $P = 0,95$ [2], а $\bar{\theta}(p_H)$ можно принять равным $\bar{\Delta}(p_H)$.

2.4. Доверительные границы погрешности оценки определения давления $p_{\text{вх абс ср}}^*$ (предельная относительная погрешность):

$$\bar{\Delta}(p_{\text{вх абс ср}}^*) = K_{\Sigma}(p_{\text{вх абс}}^*) \cdot [\bar{\varepsilon}(p_{\text{вх абс ср}}^*) + \bar{\theta}(p_{\text{вх абс ср}}^*)], \%$$

где коэффициент $K_{\Sigma}(p_{\text{вх абс}}^*)$ зависит от доверительной вероятности и отношения $\bar{\theta}(p_{\text{вх абс ср}}^*)/\bar{S}(p_{\text{вх абс ср}}^*)$ и определяется в соответствии с таблицей на стр. 4 Рекомендаций МИ 2083-90 [2].

Аналогичным образом в соответствии с Рекомендациями МИ 2083-90 находятся предельные относительные погрешности $T_{\text{вх ср}}^*$, $T_{\text{к ср}}^*$, $P_{\text{к абс ср}}^*$, $p_{\text{кол абс ср}}^*$, $\pi(\lambda_{\text{кол}})$, $\lambda_{\text{кол}}$, $q(\lambda_{\text{кол}})$, $\sigma_{\text{вх}}$, $G_{\text{в пр}}$, $G_{\text{в}}$, $n_{\text{ГГпр}}$, $\pi_{\text{к}}^*$ и $\eta_{\text{к}}$.

Дополнительно для проведения в дальнейшем анализа системы измерений ниже даны формулы для определения погрешностей запаса ГДУ.

3. Погрешности запаса ГДУ компрессора.

3.1. Относительное среднее квадратическое отклонение запаса ГДУ компрессора:

$$\bar{S}(\Delta K_y) = \left(1 - \frac{\pi_{\text{к пр}}^*/G_{\text{в пр пр}}}{\pi_{\text{к гр}}^*/G_{\text{в пр гр}}} \right)^{-1} \cdot \sqrt{\bar{S}^2(\pi_{\text{к гр}}^*) + \bar{S}^2(G_{\text{в пр гр}}) + \bar{S}^2(\pi_{\text{к пр}}^*) + \bar{S}^2(G_{\text{в пр пр}})}, \%$$
 (отн.),

где $\bar{S}(\pi_{\text{к пр}}^*)$ и $\bar{S}(\pi_{\text{к гр}}^*)$ – относительные среднеквадратические отклонения $\pi_{\text{к пр}}^*$ и $\pi_{\text{к гр}}^*$; $\bar{S}(G_{\text{в пр пр}})$ и $\bar{S}(G_{\text{в пр гр}})$ – относительные среднеквадратические отклонения $G_{\text{в пр пр}}$ и $G_{\text{в пр гр}}$.

3.2. Доверительные границы случайной относительной погрешности запаса ГДУ компрессора:

$$\bar{\varepsilon}(\Delta K_y) = t_q(\Delta K_y) \cdot \bar{S}(\Delta K_y), \%$$
 (отн.),

где $t_q(\Delta K_y)$ – коэффициент Стьюдента, зависящий от доверительной вероятности и числа степени свободы $f_{\text{эф}}(\Delta K_y)$, которое находится как

$$f_{\text{эф}}(\Delta K_y) = \frac{\left[\bar{S}^2(\pi_{\text{к гр}}^*) + \bar{S}^2(G_{\text{в пр гр}}) + \bar{S}^2(\pi_{\text{к пр}}^*) + \bar{S}^2(G_{\text{в пр пр}}) \right]}{\left[\frac{\bar{S}^4(\pi_{\text{к гр}}^*)}{n(\pi_{\text{к гр}}^*)+1} + \frac{\bar{S}^4(G_{\text{в пр гр}})}{n(G_{\text{в пр гр}})+1} + \frac{\bar{S}^4(\pi_{\text{к пр}}^*)}{n(\pi_{\text{к пр}}^*)+1} + \frac{\bar{S}^4(G_{\text{в пр пр}})}{n(G_{\text{в пр пр}})+1} \right]} - 2,$$

где $n(\pi_{\text{к гр}}^*) = n(\pi_{\text{к пр}}^*) = 7$ и $n(G_{\text{в пр гр}}) = n(G_{\text{в пр пр}}) = 3$.

3.3. Предельная неисключённая систематическая относительная погрешность определения запаса ГДУ компрессора:

$$\bar{\theta}(\Delta K_y) = \left(1 - \frac{\pi_{\text{к пр}}^*/G_{\text{в пр пр}}}{\pi_{\text{к гр}}^*/G_{\text{в пр гр}}} \right)^{-1} \cdot \sqrt{\bar{\theta}^2(\pi_{\text{к гр}}^*) + \bar{\theta}^2(G_{\text{в пр гр}}) + \bar{\theta}^2(\pi_{\text{к пр}}^*) + \bar{\theta}^2(G_{\text{в пр пр}})}, \%$$
 (отн.),

где $\bar{\theta}(\pi_{к\text{р}}^*)$ и $\bar{\theta}(\pi_{к\text{гр}}^*)$ – предельные неисключённые систематические относительные погрешности определения $\pi_{к\text{р}}^*$ и $\pi_{к\text{гр}}^*$;

$\bar{\theta}(G_{в\text{пр}р})$ и $\bar{\theta}(G_{в\text{пр}гр})$ – предельные неисключённые систематические относительные погрешности определения $G_{в\text{пр}р}$ и $G_{в\text{пр}гр}$.

3.4. Доверительные границы погрешности оценки определения $\bar{\Delta}K_y$ (предельная относительная погрешность):

$$\bar{\Delta}(\Delta K_y) = K_\Sigma(\Delta K_y) \cdot [\bar{\varepsilon}(\Delta K_y) + \bar{\theta}(\Delta K_y)], \% \text{ (отн.)},$$

где коэффициент $K_\Sigma(\Delta K_y)$ зависит от доверительной вероятности и отношения $\bar{\theta}(\Delta K_y)/\bar{S}(\Delta K_y)$ и определяется в соответствии с таблицей на стр. 4 Рекомендаций МИ 2083-90 [2].

3.5. Предельная абсолютная погрешность определения запаса ГДУ компрессора:

$$\Delta(\Delta K_y) = (\Delta K_y) \cdot \bar{\Delta}(\Delta K_y) / 100\%.$$

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПАРАМЕТРОВ КОМПРЕССОРА ИСПЫТЫВАЕМОГО ДВИГАТЕЛЯ

Результаты определения погрешностей параметров компрессора испытываемого двигателя в соответствии с исходными данными табл. 1 представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты определения погрешностей параметров компрессора

Погрешность	Обозначение	Размерность	Значение*
Предельная относительная погрешность определения приведённой частоты вращения ротора газогенератора	$\bar{\Delta}(n_{ГТ\text{пр}})$	%	0,7
Предельная относительная погрешность определения приведённого расхода воздуха на входе в компрессор	$\bar{\Delta}(G_{в\text{пр}})$	%	5,4
Предельная относительная погрешность определения степени повышения давления в компрессоре	$\bar{\Delta}(\pi_k^*)$	%	0,67
Предельная абсолютная погрешность определения степени повышения давления в компрессоре	$\Delta(\pi_k^*)$	–	0,05
Предельная относительная погрешность определения КПД компрессора	$\bar{\Delta}(\eta_k)$	% (отн.)	2,7
Предельная абсолютная погрешность определения КПД компрессора	$\Delta(\eta_k)$	% (абс.)	2,1
Предельная относительная погрешность определения запаса ГДУ компрессора	$\bar{\Delta}(\Delta K_y)$	% (отн.)	63,0**
Предельная абсолютная погрешность определения запаса ГДУ компрессора	$\Delta(\Delta K_y)$	% (абс.)	11,4**

Примечание: * – Значения погрешностей приведены без учёта знака;

** – значения соответствуют $\Delta K_y = 18\%$ при $n_{ГТ\text{пр}} = 7100 \text{ мин}^{-1}$.

Анализ результатов расчёта табл. 2 свидетельствует о довольно больших погрешностях определения приведённого расхода воздуха $G_{в\text{пр}}$, степени повышения давления π_k^* , КПД η_k и особенно – запаса ГДУ ΔK_y .

Повышенное значение $\bar{\Delta}(G_{в\text{пр}})$ обусловлено большими погрешностями определения приведённой скорости потока в расходомерном коллекторе:

$$\bar{S}(\lambda_{\text{кол}}) = \frac{\frac{k_b - 1}{2 \cdot k_b} \cdot [\pi(\lambda_{\text{кол}})]^{\frac{k_b - 1}{k_b}}}{1 - [\pi(\lambda_{\text{кол}})]^{\frac{k_b - 1}{k_b}}} \cdot \bar{S}[\pi(\lambda_{\text{кол}})] = 1,8\% \text{ и } \bar{\theta}(\lambda_{\text{кол}}) = \frac{\frac{k_b - 1}{2 \cdot k_b} \cdot [\pi(\lambda_{\text{кол}})]^{\frac{k_b - 1}{k_b}}}{1 - [\pi(\lambda_{\text{кол}})]^{\frac{k_b - 1}{k_b}}} \cdot \bar{\theta}[\pi(\lambda_{\text{кол}})] = 3,0\%$$

из-за малой величины знаменателей в представленных выше формулах вследствие близости значения $\pi(\lambda_{\text{кол}})$ к единице. Для уменьшения значения газодинамической функции $\pi(\lambda_{\text{кол}})$ в процессе испытаний необходимо приёмники статического давления поместить в зоне проточной части с повышенной скоростью потока. Это требует применения иного способа замера $G_{\text{в пр}}$.

Известно, что на входе в компрессор зона проточной части с повышенной скоростью потока находится в воздушном канале передней опоры 8 (см. рис. 1) двигателя, а статическое давление разрежения $p_{\text{в разр}}$ в этом месте можно измерить с помощью приёмника специальной формы – q – метра (рис. 2). В дальнейшем по тарировочной зависимости $G_{\text{в пр}} = f(p_{\text{в разр}} / p_H)$ этого прибора находится расход $G_{\text{в пр}}$.

Метрологические исследования q – метра свидетельствуют о том, что предельная относительная погрешность измерения с его помощью $G_{\text{в пр}}$ не превышает 1,5%.

Целесообразно отметить, что величина коэффициента восстановления полного давления $\sigma_{\text{вх}}$ практически не изменяется в процессе испытаний. Это позволяет отказаться от измерения давления разрежения $p_{\text{вх разр}}^*$ с помощью пневмогребёнки и практически без увеличения погрешности $\bar{\Delta} p_{\text{вх абс}}^*$ определять полное абсолютное давление на входе в двигатель по формуле:

$$p_{\text{вх абс}}^* = \sigma_{\text{вх}} \cdot p_H \cdot$$

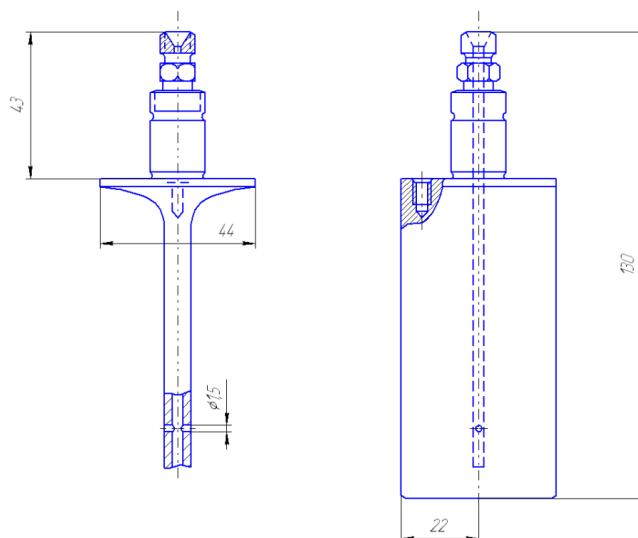


Рис. 2. Конфигурация специально спрофилированного q – метра

Некоторого снижения погрешности определения степени повышения давления в компрессоре π_k^* и КПД η_k можно добиться, увеличивая точность измерения избыточного давления на выходе из компрессора $p_{\text{к изб}}^*$ за счёт использования более точной измерительной системы с абсолютной погрешностью $\theta(p_{\text{к изб}}^*)$, не превышающей 2500 Па. Это позволяет снизить $\bar{\Delta}(\pi_k^*)$ с 0,67 до 0,50%, а $\bar{\Delta}(\eta_k)$ – с 2,7 до 2,3% (отн.).

В табл. 3 представлены результаты расчёта запаса ГДУ, его относительных и абсолютных погрешностей при $n_{\text{ГД пр}} = 7100 \text{ мин}^{-1}$ в случаях применения для определения $G_{\text{в пр}}$ расходомерного коллектора и q – метра, полученные с использованием в качестве исходных данных по расчётному режиму величин параметров p_H , $t_{\text{вх ср р}}^*$, $t_{\text{к ср р}}^*$, $t_{\text{к ср р}}^*$ и $p_{\text{к изб ср р}}^*$ из табл. 1.

Из табл. 3 видно, что применение q – метра вместо расходомерного коллектора позволяет обеспечить снижение погрешности определения запаса ГДУ с 63 до 18% (отн.) или с 11,4 до 3,3% (абс.).

Результаты определения запаса ГДУ и его погрешностей

Параметр	Обозначение	Размерность	Значение
Степень повышения давления в компрессоре при расчётном значении площади среза сопла	$\pi_{кр}^*$	–	7,4
Приведённый расход воздуха на входе в компрессор при расчётном значении площади среза сопла	$G_{в пр}$	кг/с	30,5
Степень повышения давления в компрессоре на границе устойчивых режимов работы	$\pi_{к гр}^*$	–	8,3
Приведённый расход воздуха на входе в компрессор на границе устойчивых режимов работы	$G_{в пр гр}$	кг/с	29,2
Запас газодинамической устойчивости компрессора	ΔK_y	%	18
Предельная относительная погрешность определения запаса ГДУ компрессора при определении $G_{в пр}$ с помощью расходомерного коллектора	$\bar{\Delta}(\Delta K_y)_{кол}$	% (отн.)	63
Предельная абсолютная погрешность определения запаса ГДУ компрессора при определении $G_{в пр}$ с помощью расходомерного коллектора	$\Delta(\Delta K_y)_{кол}$	% (абс.)	11,4
Предельная относительная погрешность определения запаса ГДУ компрессора при определении $G_{в пр}$ с помощью q – метра	$\bar{\Delta}(\Delta K_y)_q$	% (отн.)	18
Предельная абсолютная погрешность определения запаса ГДУ компрессора при определении $G_{в пр}$ с помощью q – метра	$\Delta(\Delta K_y)_q$	% (абс.)	3,3

Примечание: Значения погрешностей приведены без учёта знака

Следовательно, минимальная граница $\Delta(\Delta K_y)_{кол min}$ в случае определения $G_{в пр}$ с помощью расходомерного коллектора находится на уровне 6,6%, и двигатели, имеющие $\Delta K_{y min} \geq 6,6\%$, работают устойчиво с газодинамической точки зрения. Значит, используя более точный способ измерения $G_{в пр}$ с помощью q – метра, можно обеспечить $\Delta K_{y min} \geq 6,6\%$ при $\Delta K_y \geq 9,9\%$. Таким образом, появляется возможность снизить запас ГДУ с 18% практически до 10% для вновь изготавливаемых и проектируемых ТВаД стационарных энергетических установок.

В завершение стоит отметить, что разработанный метод определения погрешностей параметров компрессора можно использовать для усовершенствования технологии испытания отдельно взятого компрессора, а при определении ΔK_y для сокращения времени проведения испытаний целесообразно вместо сменных сопел использовать регулируемое сопло.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для проведения анализа применяемых технологий испытания компрессоров ТВаД стационарных энергоустановок разработан метод определения предельных погрешностей параметров с учётом систематических неисключённых и случайных погрешностей.

Расчёты погрешностей с помощью этого метода показали, что для повышения точности замера приведённого расхода воздуха на входе в компрессор необходимо вместо расходомерного коллектора на входе в двигатель использовать специально спроектированный q – метр. Его применение позволяет в несколько раз снизить погрешность определения приведённого расхода воздуха и довести её до уровня 1,5%.

Уменьшение погрешности π_k^* и КПД возможно за счёт применения системы измерения избыточного давления за компрессором повышенного класса точности. В частности, уменьшение систематической неисключённой погрешности $\bar{\theta}(p_{к изб}^*)$ с 4,0 кПа до 2,5 кПа даёт возможность сузить границы погрешности оценки π_k^* с 0,67 до 0,50%, а КПД – с 2,7 до 2,3% (отн.).

В совокупности доступное уменьшение погрешности измерения $G_{в пр}$ и π_k^* позволяет снизить абсолютную погрешность определения запаса ГДУ почти в 3,5 раза до уровня 3,3%. Это даёт возможность устанавливать запас ГДУ для компрессоров выпускаемых и проектируемых ТВаД стационарных энергоустановок на уровне 10% вместо 18%.

Исследование было выполнено в рамках работы по гранту «Изучение закономерностей рабочих процессов нагнетательных машин на базе сопряжённых математических моделей (FSSS-2024-0015)».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **ГОСТ Р 8.736 – 2011** Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения: дата введения 13.12.2011г./ Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. Изд. официальное. М.: Стандартинформ, 2013. 27 с. [GOST R 8.736 – 2011 State system for ensuring the uniformity of measurements. Multiple direct measurements. Methods of measurement results processing. Main positions: adoption date 13.12.2011, (in Russian). Moscow: Standartinform, 2013. 27 p.]
2. **МИ 2083-90 Рекомендация.** Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей: дата введения 1992-01-01/ Комитет стандартизации и метрологии СССР. Изд. официальное. М.: Изд-во стандартов, 1991. 10 с. [MI 2083-90 Recommendation. State system for ensuring the uniformity of measurements. Indirect measurements. Finding the results of measurements and evaluating their errors: adoption date 01.01.1992, (in Russian). Moscow: Izdatelstvo Standartov, 1991. 10 p.]
3. **Дорофеев В.М.** Термогазодинамический расчет газотурбинных силовых установок [Текст]/ В.М. Дорофеев [и др.]. М.: Машиностроение, 1973. 144 с. [Dorofeev V.M. Thermogasdynamic calculation of gas-turbine power plants, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1973. 144 p.]

ОБ АВТОРАХ

ПЕСТОВ Денис Вячеславович, асп. каф. ТДЛА. Дипл. инженер воздушного транспорта (СГАУ, 2012). Готовит дис. по газодинамической устойчивости серийных газотурбинных двигателей.

ГАТАУЛЛИНА Елена Дмитриевна, дипл. бакалавр (Самарский университет, 2022) по направлению «Проектирование авиационных двигателей и энергетических установок». Обучается на втором курсе магистратуры Самарского университета по направлению «Двигатели летательных аппаратов».

МАТВЕЕВ Валерий Николаевич, проф. каф. ТДЛА. Дипл. инженер-механик (КуАИ, 1977). Д-р техн. наук по рабочему процессу микротурбин (СГАУ, 2000). Иссл. в обл. авиационных лопаточных машин.

НОВИКОВА Юлия Дмитриевна, старший преп. каф. ТДЛА. Дипл. магистр (СГАУ, 2014). Готовит дис. по авиационным лопаточным машинам.

METADATA

Title: Method for determining the error in parameters as a tool for analyzing the technologies of testing of turboshaft engine compressors

Authors: Pestov D.V.¹, Gataullina E.D.², Matveev V.N.³, Novikova Yu.D.⁴

Affiliation: ¹⁻⁴Samara National Research University, Samara, Russia

Email: ¹pestov.dv@ssau.ru, ²helena_g@mail.ru, ³valeriy2008@rambler.ru, ⁴novikova@ssau.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa University of Science and Technology), vol. 28, no. 1(103), pp. 109-119, 2024. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Annotation: The analysis of applied technologies for testing compressors of turboshaft engines of stationary power plants was carried out. A method was developed for determining errors in the compressor parameters, taking into account both systematic non-excluded and random errors. It was found that in order to increase the accuracy of measuring the reduced air flow, it is necessary to abandon the flow collector at the engine inlet and use a specially designed q - meter installed in the air channel of the front engine support. To reduce the error in the degree of pressure increase and compressor efficiency, it is advisable to switch to an overpressure measurement system behind a compressor of an increased accuracy class. The use of the proposed systems for measuring the reduced air flow and overpressure behind the compressor, as shown by computational studies, reduces the determination of the error of the gas dynamic stability margin from 11.4 to 3.3%.

Key words: engine testing, measurement system, experimental error, analysis of measurement systems

About authors:

PESTOV Denis Vyacheslavovich, postgrad. student at the Department of the Theory of Aircraft Engines. Air transport engineer's diploma (SSAU, 2012). He is preparing a thesis on the gasdynamic stability of serial gas-turbine engines.

GATAULLINA Elena Dmitrievna, Bachelor's degree (Samara University, 2022) in the field of the design of aircraft engines and power plants. She is a second-year master's student at Samara University specializing in aircraft engines.

MATVEEV Valeriy Nikolaevich, Prof. at the Department of the Theory of Aircraft Engines. Mechanical engineer's diploma (KuAU, 1977). Dr. of Tech. Sci. in the field of the operating processes of microturbines (SSAU, 2000). Studies in the field of aircraft impeller machines.

NOVIKOVA Yulia Dmitrievna, Senior Lecturer at the Department of the Theory of Aircraft Engines. Master's degree (SSAU, 2014). She is preparing a thesis on aircraft impeller machines.