

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ОТЛАДКИ ПАРАМЕТРОВ СЕРИЙНОГО ТРДД

© 2011 А. А. Волик¹, Х. С. Гумеров², Р. З. Хабибуллин², Р. Б. Хайруллин²¹Уфимское моторостроительное производственное объединение²Уфимский государственный авиационный технический университет

Рассматривается методика оптимальной отладки двигателей на этапе приемосдаточных испытаний. Исследуется изменение основных параметров двигателя при изменении атмосферных условий. Исследование основано на данных, полученных в серийном производстве.

Авиационный двигатель, приемосдаточные испытания, оптимизация, изменение атмосферных условий.

В рассматриваемом контексте под качеством в большей степени понимается минимальное отклонение параметров двигателя от оптимальных достижимых значений. Для двигателя, находящегося в серийном производстве, уместно полагать, что оптимуму соответствуют среднестатистические значения основных параметров. В такой постановке необходимо добиваться, чтобы сдаваемые двигатели имели по возможности одинаковые параметры в любых атмосферных условиях по давлению, температуре, влажности.

В зависимости от конкретного конструктивного исполнения и регулирования эта задача решается путем внесения различных поправок к приведенным параметрам двигателя [1]. Корректность (или некорректность) таких поправок определяет дополнительное рассеивание параметров, вдобавок к естественному рассеиванию, связанному с допусками на изготовление и сборку двигателя. На рис. 1 и 2 представлена картина рассеивания расходов воздуха и топлива одного экземпляра двигателя, проходившего ресурсные испытания в течение длительного периода времени в широком диапазоне изменения атмосферных условий. Как видно, при фиксированных значениях приведенной частоты вращения ротора низкого давления (вентилятора) оценка расходов воздуха и топлива колеблется в пределах до 3 и 6% соответственно.

Обобщение такого типа протекания всех контролируемых параметров может быть представлено в виде, приведенном на рис. 3.

Как известно, приведение частоты вращения к стандартным атмосферным условиям производится по формуле

$$n_{\text{пр}} = n_{\text{физ}} \cdot \sqrt{\frac{288,15}{T}}, \quad (1)$$

где $n_{\text{пр}}$ - приведенная частота вращения,

$n_{\text{физ}}$ - физическая частота вращения,

T - температура воздуха на входе в двигатель, при которой производилось измерение $n_{\text{физ}}$. Т. е. приведенная частота $n_{\text{пр}}$ может меняться либо из-за изменения $n_{\text{физ}}$, либо из-за изменения T .

Реальное протекание параметра (см. рис. 3) при изменении атмосферной температуры (пунктирная линия) отличается от протекания по дроссельной характеристике при постоянной температуре (сплошная жирная линия).

На двух режимах, имеющих, к примеру, отличие в настройке частоты вращения в 4% [режимы «Максимал боевой» («МБ») и «Максимал учебно-боевой» («МУБ»)], одинаковая приведенная частота $n_{\text{пр}}$ достигается при различиях в температуре $\Delta T = 24\text{K}$.

Отличие в двух линиях протекания параметров двигателя, вероятно, связано с нарушением геометрического подобия и, как следствие, изменения характеристик узлов двигателя. Для исследований была воссоздана математическая модель двигателя на основе данных, полученных в процессе стендовых испытаний. В модели учитывались реальные характеристики компрессоров низкого и высокого давления.

Для подтверждения адекватности воссозданной математической модели в табл. 1 приведены некоторые расчетные данные двигателя на режиме «МБ» в сравнении со среднестатистическими.

Далее, используя программные средства, были вычислены наиболее вероятные из-

менения характеристик узлов двигателя, которые могли бы объяснить подобные отклонения параметров при изменении температуры воздуха окружающей среды. В число таких характеристик узлов входят:

- пропускная способность компрессора низкого давления;

- КПД компрессора низкого давления;
- пропускная способность компрессора высокого давления;
- КПД компрессора высокого давления;
- пропускная способность турбины высокого давления.

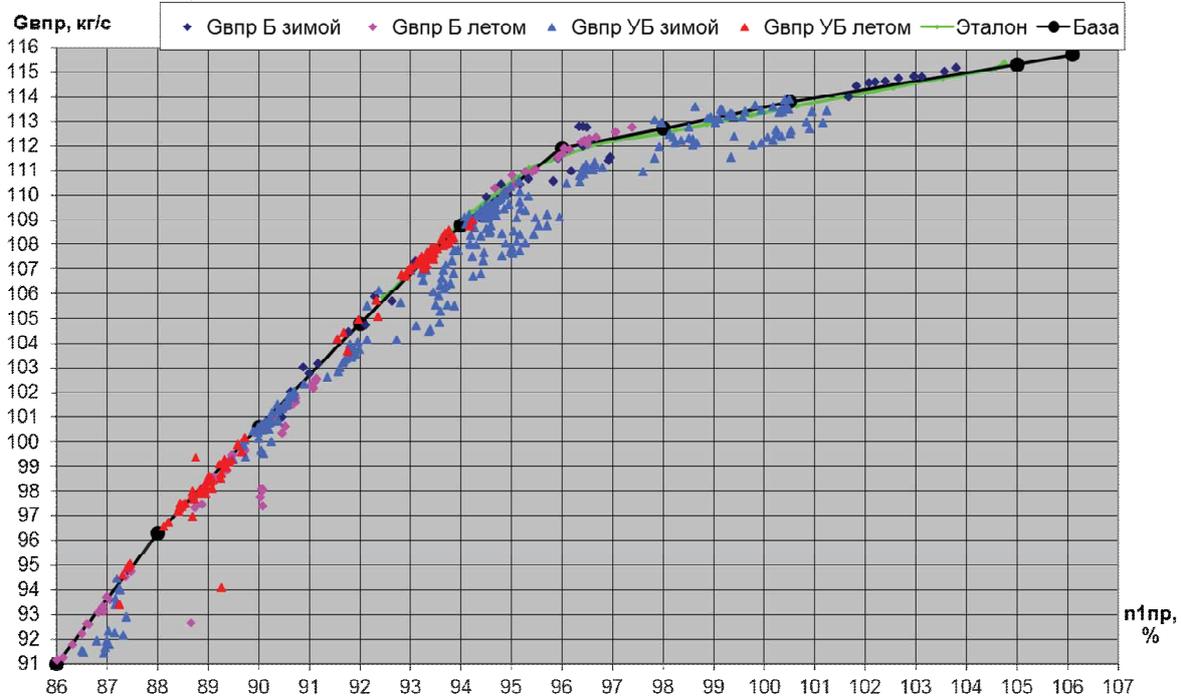


Рис. 1. Зависимость приведенного суммарного расхода воздуха через двигатель от приведенной частоты вращения ротора низкого давления $G_{в\sum пр} = f(n_{1пр})$

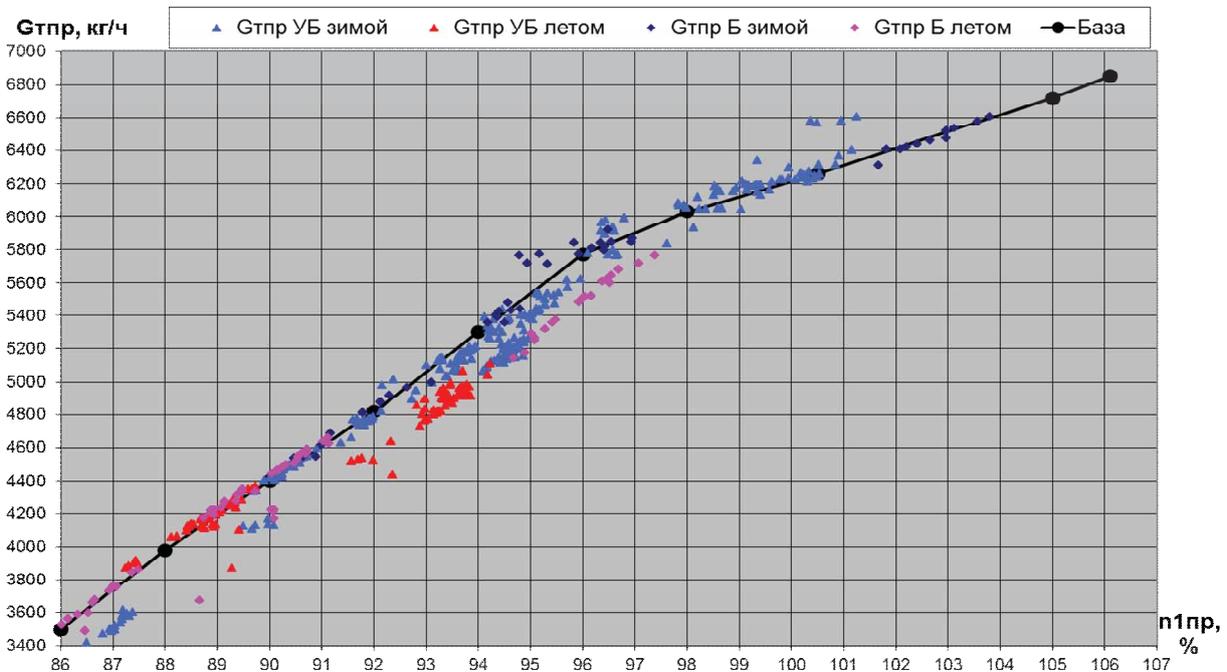


Рис. 2. Зависимость приведенного расхода топлива от приведенной частоты вращения ротора низкого давления $G_{т пр} = f(n_{1пр})$

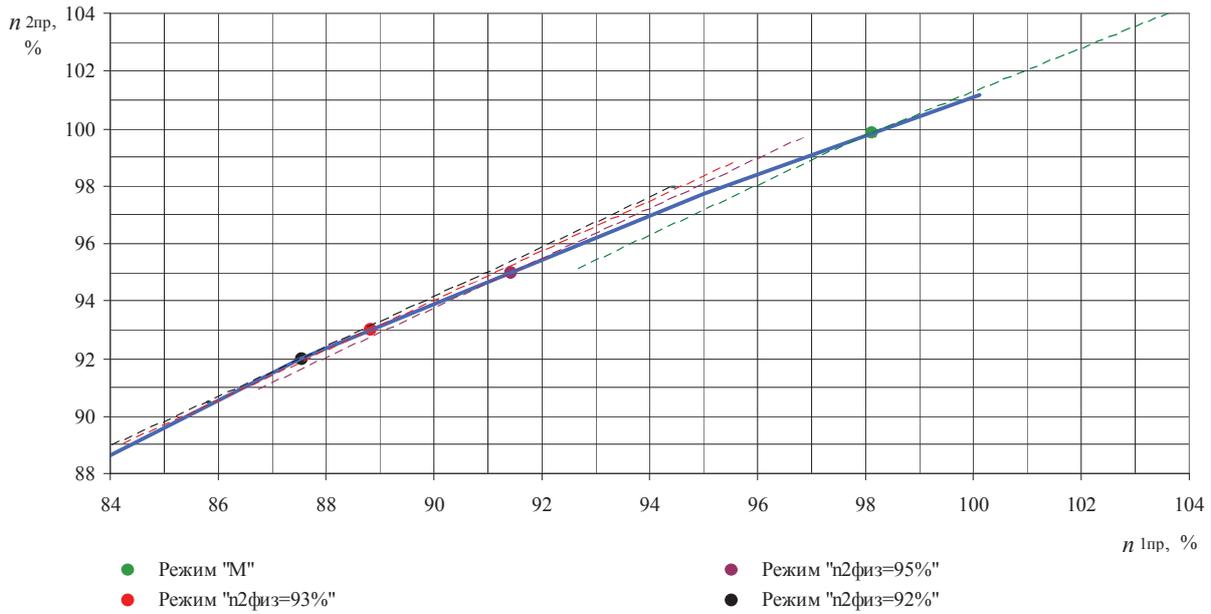


Рис. 3. Зависимость приведенной частоты вращения ротора высокого давления от приведенной частоты вращения ротора низкого давления $n_{2пр} = f(n_{1пр})$ с линиями протекания основных режимов работы в зависимости от температуры воздуха на входе в двигатель

Таблица 1. Сравнение значений параметров, полученных по математической модели со статистическими значениями

Параметр	Обозначение и единица измерения	Статистическое значение	СКО	Расчетное значение по математической модели	Погрешность δ , %
Частота вращения ротора низкого давления	n_1 , %	97,97	0,43	97,97	0
Частота вращения ротора высокого давления	n_2 , %	99,63	0,28	99,65	0,02
Тяга	R , кгс	7678	62,24	7670	0,104
Удельный расход топлива	$C_{уд}$, кг/(кгс·ч)	0,74	0,0097	0,735	0,68
Расход топлива	G_T , кг/ч	5674,6	76,12	5612	1,0
Суммарный расход воздуха	$G_{в\Sigma}$, кг/с	112,59	0,322	112,63	0,036
Степень понижения давления в турбинах	$\pi_{т\Sigma}^*$	6,99	0,097	6,99	0

На рис. 4 представлено изменение характеристик узлов при изменении температуры воздуха на входе в двигатель на 24К. В табл. 2 представлены соответствующие числовые значения отклонений характеристик узлов при таком изменении температуры воздуха на входе в двигатель.

Практически все полученные значения отклонений характеристик узлов в зависимости от изменения температуры воздуха окружающей среды имеют отрицательные значения, причем величины этих отклонений

являются достаточно схожими для узлов одного типа (компрессоров или турбин). На основе этого можно заключить, что полученные результаты являются достаточно логичными качественно и количественно.

Нарушение геометрического подобия двигателя главным образом влияет на расход воздуха, кроме того, изменяются зазоры между лопатками и корпусом, следовательно, меняется и эффективность лопаточных машин.

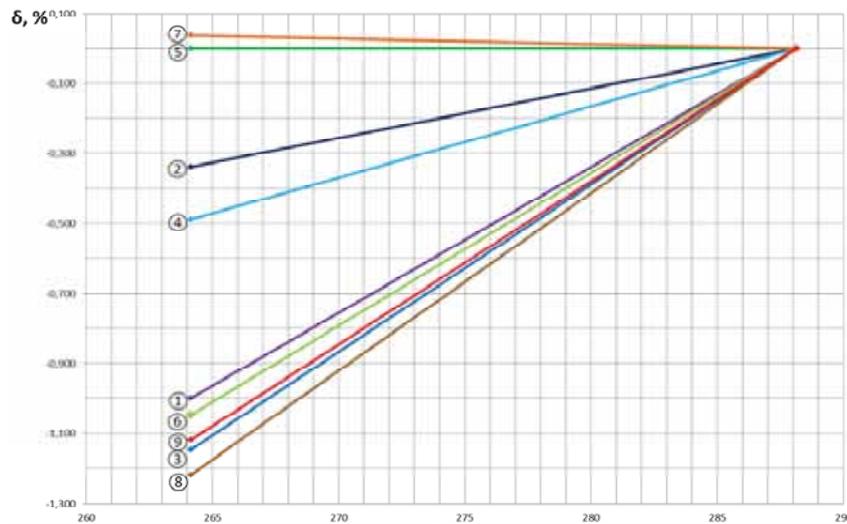


Рис. 4. Изменения характеристик узлов при изменении температуры на входе в двигатель:

- 1 — пропускная способность компрессора низкого давления,
- 2 — КПД компрессора низкого давления,
- 3 — пропускная способность компрессора высокого давления,
- 4 — КПД компрессора высокого давления,
- 5 — пропускная способность турбины высокого давления,
- 6 — КПД турбины высокого давления,
- 7 — пропускная способность турбины низкого давления,
- 8 — КПД турбины низкого давления,
- 9 — площадь критического сечения сопла

Таблица 2 – Значения отклонений характеристик узлов

№	Характеристика узла	Отклонение характеристик узлов при изменении T на $24K$
1	Пропускная способность компрессора низкого давления	-1
2	КПД компрессора низкого давления	-0,34
3	Пропускная способность компрессора высокого давления	-1,15
4	КПД компрессора высокого давления	-0,49
5	Пропускная способность турбины высокого давления	0
6	КПД турбины высокого давления	-1,05
7	Пропускная способность турбины низкого давления	0,04
8	КПД турбины низкого давления	-1,22
9	Площадь критического сечения сопла	-1,12

В случае с реактивным соплом можно допустить, что внешняя температура оказывает существенное влияние на площадь его проходного сечения, поэтому изменяется пе-

репад давления на турбине. Полученные результаты позволяют моделировать поведение параметров двигателя при изменении атмосферных условий. Повышение точности оценки параметров позволит поднять качество их отладки в процессе приемосдаточных испытаний, о чем пойдет речь далее.

Технологический процесс отладки двигателя во многом определяет технико-экономические показатели, такие как: количество топлива, сжигаемого за испытания, расходование ресурса двигателя (за счет времени и уровня отлаженной в процессе стендовых испытаний температуры газов перед турбиной). В связи с этим в серийном производстве актуальна задача поиска оптимальной методики отладки, которая позволяла бы при минимальных затратах топлива и времени получать оптимальные для конкретных условий параметры двигателя.

Рассмотрим отладку двигателей на этапе приемосдаточных испытаний с помощью двух основных факторов, используемых в серийном производстве двухвальных ТРДД с регулируемым соплом: степени понижения давления в турбинах $\pi_{T\Sigma}^*$ и частоты вращения ротора низкого давления n_1 .

На основе данных, полученных в серийном производстве, можно сделать

рис. 5 и 6. Для наглядности гистограммы распределений одноименных параметров помещены друг над другом с одинаковым масштабом. Как видим, новые значения параметров лежат в допустимых диапазонах и, кроме того, их отклонения от среднестатистических значений уменьшились для всех параметров, для которых проводилась отладка.

В соответствии с первыми двумя условиями выражения (3) регулирующие параметры остаются в существующих пределах, однако характер распределения их меняется: от близкого к нормальному, в исходном варианте, к более равномерному при оптимальной отладке (предпочтительнее отладка с более высокой частотой вращения).

На практике не все отлаживаемые параметры имеют одинаковую значимость. В связи с этим можно ввести весовые коэффициенты. Для тяги и удельного расхода эти коэффициенты, допустим, равны 1, для менее значимых, некритичных параметров они могут быть меньше 1. Такая задача в математической формулировке будет иметь вид, практически совпадающий с выражением (3), целевая функция будет изменена:

$$\sum_{i=1}^k W_i \cdot (X_{i \text{ изм}} - X_{i \text{ ср}})^2 \rightarrow \min, \quad (4)$$

где W_i - весовой коэффициент i -го параметра.

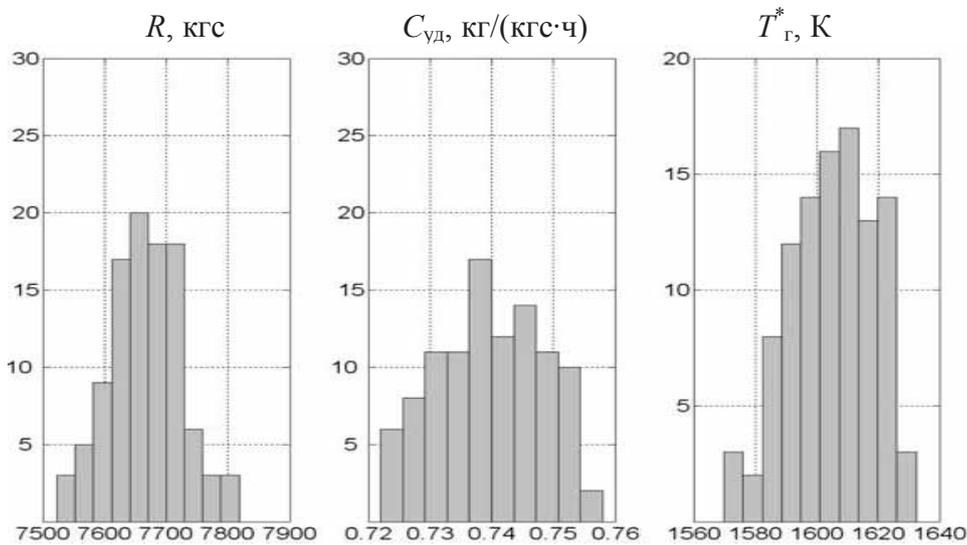


Рис. 5. Распределение регулируемых параметров до отладки

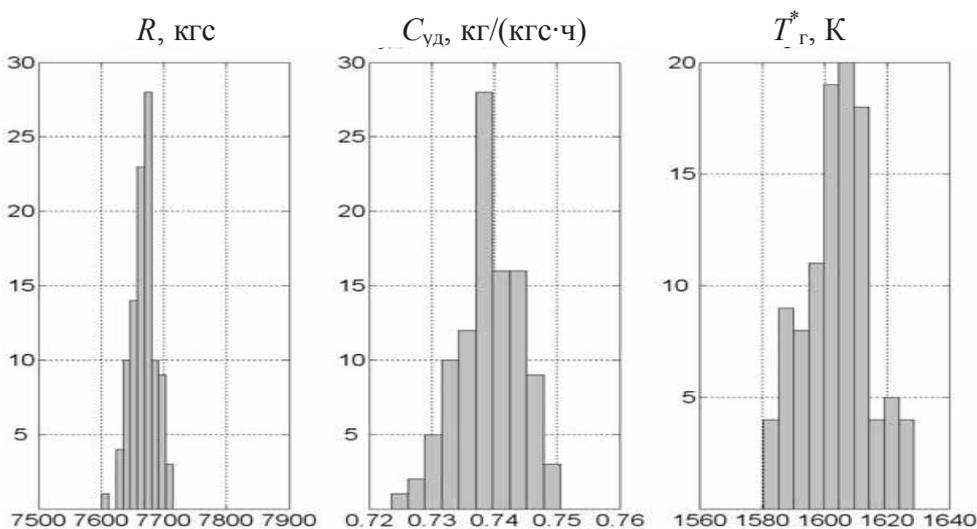


Рис. 6. Распределение регулируемых параметров после отладки

Например, уменьшив вес параметра $T_{г}^*$ до 0,1 (см. табл. 3, вариант 4), можно оста-

вить исходную величину СКО 14К, при этом СКО других параметров еще более сократятся.

Из всего вышеизложенного следует, что данная методика позволяет проводить более качественную отладку двигателей. За счет сужения диапазона рассеивания основных параметров повышаются функциональные качества двигателей и надежность. Автоматизированная программа оптимальной отладки не только не повышает, но даже сокращает трудоемкость испытаний, уменьшая число возможных регулировок.

Библиографический список

1. Волик, А.А. Контроль и нормирование параметров авиационного двигателя большого ресурса для многоцелевого самолета

[Текст]: дис. ... канд. техн. наук : 05.07.05 : защищена 15.09.09 : утв. 25.12.09 / Волик А. А. — Уфа, 2009.— 134 с.

2. Черкез, А.Я. Инженерные расчеты газотурбинных двигателей методом малых отклонений [Текст] / Черкез А. Я. — М. : Машиностроение, 1975 — 276 с.

3. Розанов, Ю.А. Теория вероятностей, случайные процессы и математическая статистика [Текст]: учебник для вузов по спец. «Математика» и «Физика»/ Ю.А. Розанов — 2-е изд., доп. — М. : Наука, 1989— 312 с.

4. Базара, М. Нелинейное программирование: Теория и алгоритмы [Текст] / М. Базара; пер. с англ. Т.Д. Березневой, В.А. Березнева; под ред. Д. Б. Юдина — М. : Мир, 1982 — 583 с.

IMPROVING THE QUALITY PARAMETERS OF SERIAL DEBUG TWO SPOOL MIXED FLOW TURBOFAN

© 2011 A. A. Volik¹, Kh. S. Gumerov², R. Z. Khabibullin², R. B. Khayrullin²

¹JSC «UMPO»

²Ufa state aviation technical university

The technique of optimal debug engines to stage the acceptance tests. Investigate the change of the basic parameters of the engine when changing atmospheric conditions. The study is based on data received in mass production.

Aircraft engine, acceptance testing, optimization, changing weather conditions.

Информация об авторах

Волик Андрей Александрович, кандидат технических наук, заместитель начальника сборочного цеха ОАО «Уфимское моторостроительное производственное объединение». Область научных интересов: проектирование и доводка авиационных двигателей.

Гумеров Хайдар Сагитович, доктор технических наук, профессор кафедры авиационных двигателей Уфимского государственного авиационного технического университета. E-mail: profgumerov@yandex.ru. Область научных интересов: проектирование и доводка авиационных двигателей.

Хабидуллин Рустем Зуфарович, студент Уфимского государственного авиационного технического университета. E-mail: rs_habibullin@mail.ru. Область научных интересов: проектирование и доводка авиационных двигателей.

Хайруллин Руслан Борисович, аспирант кафедры авиационных двигателей Уфимского государственного авиационного технического университета. E-mail: r.b.khayrullin@rambler.ru. Область научных интересов: проектирование и доводка авиационных двигателей, испытания авиационных двигателей.

Volik Andrei Aleksandrovich, Candidate of Engineering Science, deputy head of assembly shop JSC «UMPO». Area of research: design and finishing of aircraft engines.

Gumerov Khaidar Sagitovich, Doctor of Engineering Science, professor of the department aviation engines of Ufa state aviation technical university. E-mail: profgumerov@yandex.ru. Area of research: design and finishing of aircraft engines.

Khabibullin Rustem Zufarovich, student of Ufa state aviation technical university. E-mail: rs_habibullin@mail.ru. Area of research: design and finishing of aircraft engines.

Khayrullin Ruslan Borisovich, postgraduate student of the department aircraft engines of Ufa state aviation technical university. E-mail: r.b.khayrullin@rambler.ru. Area of research: design and finishing of aircraft engines, aircraft engine testing.