

УДК 621.452.3

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТРДДФ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

А. И. НАДЫРШИН<sup>1</sup>, И. М. ГОРЮНОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>nad.azatykh94@yandex.ru, <sup>2</sup>gorjunov@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 16.07.2019

**Аннотация.** Выполнен анализ методов и средств диагностирования двигателей. Приведено описание эксплуатации двигателя по техническому состоянию и его контроль в течение эксплуатации. Выполнен краткий обзор турбореактивного двухконтурного двигателя с форсажной камерой АЛ-31Ф. Представлены данные стендовых испытаний авиационного двигателя. По полученным данным построены графики изменения параметров двигателя относительно эксплуатационной наработки для трех двигателей в течение их жизненного цикла от производства до капитального ремонта. Выполнен анализ изменения полученных данных по построенным графикам.

**Ключевые слова:** параметрическая диагностика; авиационный двигатель; стендовые испытания; эксплуатация АТ; методы диагностики; термогазодинамические параметры; ГТД; режим двигателя; межресурсный ремонт; капитальный ремонт; эксплуатационная наработка.

### ВВЕДЕНИЕ

Возрастание ресурса авиационного двигателя, переход на эксплуатацию по техническому состоянию, дальнейшее повышение надежности обуславливают разносторонние исследования средств и методов диагностирования авиационных двигателей.

Одно из перспективных направлений таких исследований связано с использованием диагностической информации, носителями которой являются измеряемые термогазодинамические параметры двигателя.

В качестве контролируемых параметров ТРДДФ АЛ-31Ф на истребителе замеряются следующие параметры: частоты вращения роторов низкого и высокого давления, температура газа за турбиной низкого давления.

По этим параметрам невозможно оценить в процессе летной эксплуатации изменение таких существенных параметров двигателя, как тяга, удельный расход топлива и ряд других параметров. Поэтому выполнен анализ изменения параметров двигателя

в процессе эксплуатации до и после ремонтов по данным стендовых испытаний.

### ЭКСПЛУАТАЦИЯ ПО НАРАБОТКЕ

Перечень и периодичность выполнения работ по двигателю при его эксплуатации по наработке определяются значением наработки двигателя с начала эксплуатации либо после капитального ремонта.

Объем разборки двигателя, а также дефектация его составных частей назначается для однотипных изделий исходя из наработки с начала эксплуатации или после капитального ремонта, а перечень операций по восстановлению определяется с учетом результатов дефектации составных частей изделия [5].

Метод обслуживания двигателей и авиационной техники по наработке широко применялся и применяется в авиации, поскольку только сравнительно недавно начали появляться технические возможности надежного контроля фактического состояния агрегатов и систем самолета в процессе эксплуатации.

### ЭКСПЛУАТАЦИЯ ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ СОСТОЯНИЮ

В настоящее время в практику эксплуатации ГТД внедряется прогрессивный и экономически эффективный способ эксплуатации по фактическому техническому состоянию. В этом случае ремонту, переборке или замене подвергаются лишь те детали, узлы и агрегаты, которые неисправны или не соответствуют техническим требованиям [6].

Перед эксплуатацией планируется некоторый момент контроля  $t_{к1}$  технического состояния изделия. По анализам результатов контроля принимается заключение о состоянии объекта и требуется принять одно из трех возможных решений:

1) продолжить эксплуатацию объекта до следующего момента контроля  $t_{к2}$ , при условии, что изделие исправно (значение параметров находится в пределах допуска), и проведенное прогнозирование показало, что до момента следующего контроля данные параметры не выйдут из поля допуска;

2) выполнить профилактические работы в момент времени  $t_{пл}$ , если в результате прогнозирования в текущий момент времени значения параметров могут оказаться в области предотказного состояния, таким образом предупреждается отказ изделия в полете;

3) выполнить восстановление работоспособности изделия, если к моменту текущего контроля его параметр вышел за пределы поля допуска.

Широкое распространение и значительное развитие получили методы и средства диагностирования, которые основаны на разных физических принципах, позволяющих контролем оценить самые ответственные узлы и системы авиационного двигателя [7]. Методы диагностирования авиационного газотурбинного двигателя (рис. 1) можно разделить на методы измерения прямых структурных диагностических параметров, которые описывают текущее техническое состояние двигателя, и методы оперативной диагностики по косвенным параметрам. Косвенные параметры – это параметры, которые содержат информацию об изменении структурных ха-

рактеристик состояния двигателя при диагностировании [1].

Для более глубокого контроля двигателя требуется сочетание разных методов, однако это часто требует специальных условий и продолжительного времени.

### ДИАГНОСТИКА ГТД ПО ТЕРМОГАЗОДИНАМИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ

Термогазодинамические параметры двигателя (температура, давление и др.) в различных сечениях газозвдушного тракта, а также выходные параметры двигателя, зависящие от термогазодинамических параметров (тяга, удельный расход топлива, расход воздуха и др.), являются носителями информации о состоянии газозвдушного тракта двигателя. Поэтому они могут быть использованы для распознавания определенного класса состояний двигателя – класса, объединяющего дефекты газозвдушного тракта двигателя [3].

Принятие решения о состоянии производится путем сравнения определенных параметров двигателя с нормами на допускаемые их отклонения. Если значения параметров находятся в пределах технических норм, состояние относится к категории годных, иначе состояние относится к категории дефектных.

Такой подход к оценке состояния при наличии достоверных технических норм является достаточно простым и широко используется как на этапе серийных испытаний двигателя, так и в эксплуатации [4].

При серийных статочно-контрольных испытаниях авиационного двигателя он является основным способом оценки состояния двигателя, критерием для приема его к эксплуатации. Как метод диагностирования двигателя в эксплуатации, он также является приемлемым и широко используется в практике. Такой подход известен, например, как метод диагностической обработки и анализа характера изменения термогазодинамических параметров в процессе наработки.

Причем здесь оценка годности двигателя может быть не только по величине технических норм, но и по темпу (скорости) изменения параметров в пределах этих норм по времени [2].

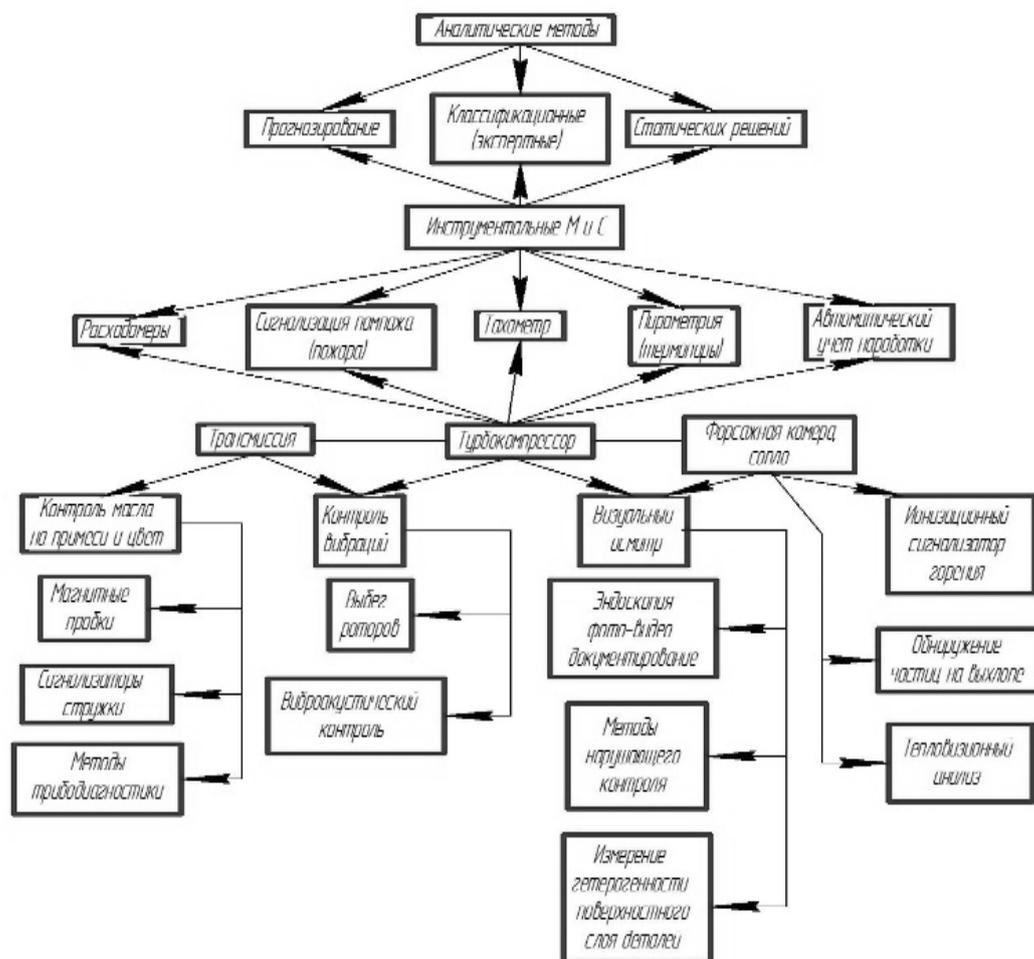


Рис. 1. Методы и средства диагностики ГТД

Необходимо отметить, что способ оценки состояния двигателя путем сопоставления его выходных параметров (тяги, удельного расхода топлива, температуры газа перед турбиной и др.) с техническими нормами (диагностика первого уровня), с использованием информации о темпах изменения параметров в пределах технических норм проще других способов использовать для решения вопросов эксплуатации по состоянию.

#### ИССЛЕДУЕМЫЙ ДВИГАТЕЛЬ – ТРДДФ АЛ-31Ф

Двигатель АЛ-31Ф (рис. 2) является современным двигателем, который предназначен для многоцелевых самолетов Су-27, Су-30 и его модификаций, и по условной классификации принадлежит к двигателям четвертого поколения. Разработан под руководством А. М. Люльки в НПО «Сатурн». Двигатели АЛ-31Ф производятся

на УМПО (г. Уфа) и АО «НПЦ газотурбостроения «Салют» (г. Москва). Двигатель двухконтурный, двухвальный, со смешением потоков за турбиной внутреннего и наружного контуров, с общей форсажной камерой и регулируемым сверхзвуковым всережимным реактивным соплом. Двигатель имеет модульную конструкцию, обеспечивающую высокую технологичность сборки и позволяющую проводить замену модулей при минимальном объеме регулировок и проверок.

В число модулей входят: компрессор низкого давления (КНД), компрессор высокого давления (КВД), основная камера сгорания (ОКС), воздушно-воздушный теплообменник, турбины высокого (ТВД) и низкого давления (ТНД), смеситель, фронтное устройство форсажной камеры сгорания (ФК), реактивное сопло (РС) с корпусом форсажной камеры сгорания, коробка приводов двигательных агрегатов с агрегатами.

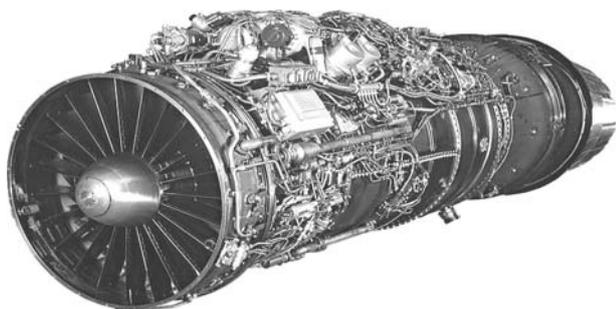


Рис. 2. Авиационный двигатель АЛ-31Ф

### АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИГАТЕЛЯ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПО ДАННЫМ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ

Испытания серийных двигателей подразделяются на: предъявительские (предназначены для обкатки деталей и частичной отладки автоматики), приемосдаточные (проводят после переборки, осмотра и контроля наиболее ответственных узлов и деталей).

После проведения испытания двигателя на конкретном режиме работы, полученные параметры двигателя преобразовываются с помощью измерительно-вычислительных комплексов и сопоставляются с требованиями технических условий на двигатель.

В табл. 1 приведены основные измеряемые параметры двигателя при стендовых испытаниях.

Таблица 1

#### Измеряемые (приведенные) параметры двигателя при стендовых испытаниях

Наименование	Обозначение
Частота вращения РНД	$n_{1пр}$
Частота вращения РВД	$n_{2пр}$
Тяга двигателя	$R_{пр}$
Расход воздуха через двигатель	$G_{впр}$
Удельный расход топлива	$C_{Rпр}$
Заторможенная температура газа за ТНД	$T_4^*_{пр}$
Часовой расход топлива	$G_{тпр}$
Заторможенная температура воздуха за КНД	$T_6^*_{пр}$
Заторможенная температура воздуха на входе в КС	$T_{300}^*_{пр}$
Полное давление воздуха на входе в КС	$P_{300}^*_{пр}$
Полное давление газа за ТНД	$P_4^*_{пр}$

Анализ изменения параметров АЛ-31Ф выполним на основании данных приемо-

сдаточных испытаний и поверочных запусков перед ремонтами на режимах: «максимал», «крейсерский», « $n_{1пр.}=92\%$ », «минимальный форсаж», «полный форсаж».

Анализ изменения параметров в процессе эксплуатации приводится для трех двигателей. На рис. 3–10 показаны изменения относительных приведенных замеряемых параметров 3 двигателей в зависимости от эксплуатационной наработки на режиме «полный форсаж». Аналогичные графики построены и для остальных режимов.

Жизненный цикл первого двигателя состоит из двух межресурсных и одного капитального ремонтов, а у второго и третьего двигателей был один межресурсный и капитальный ремонт. Все данные приведены к САУ.

Анализ графиков, показывает, что при эксплуатации первого двигателя до первого межресурсного ремонта (0–300 часов эксплуатации, ч.э.) обороты РНД и РВД увеличились на 0,25 и 0,009 % соответственно. Тяга двигателя упала на 2,11 %. Расход воздуха уменьшился на 1,3 %. Температура газов за камерой сгорания увеличилась на 0,72 %. Удельный расход топлива увеличился на 1,08 %. Температура за ТНД поднялась на 1,02 %. Расход топлива при этом увеличился на 1,51 %. После проведенного межресурсного ремонта обороты РНД и РВД уменьшились на 1,07 % и 0,81 % соответственно. Тяга двигателя возросла на 0,96 %. Расход воздуха поднялся на 0,57 %. Температура за камерой сгорания снизилась на 0,57 %. Удельный расход уменьшился на 1,18 %. Температура газов за ТНД снизилась на 1,14 %. Физический расход топлива уменьшился на 2,83 %. Дальнейшая эксплуатация первого двигателя до второго межресурсного ремонта (300–600 ч.э.) показывает, что обороты РНД и РВД увеличились на 0,24 и 0,54 % соответственно. Тяга двигателя упала на 2,61 %. Расход воздуха уменьшился на 0,85 %. Температура газов за камерой сгорания увеличилась на 0,63 %. Удельный расход топлива увеличился на 1,28 %.

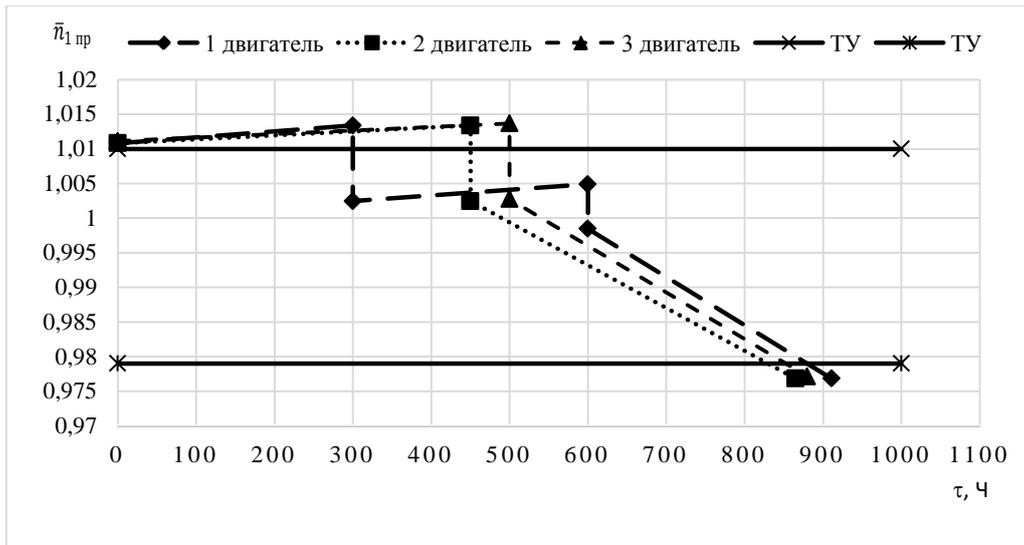


Рис. 3. Изменение оборотов РНД в зависимости от наработки

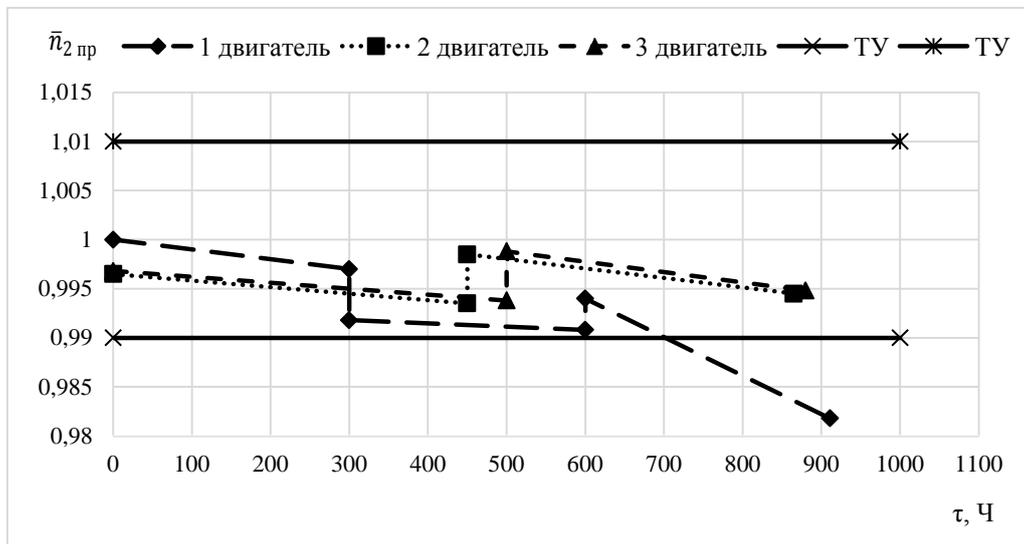


Рис. 4. Изменение оборотов РВД в зависимости от наработки

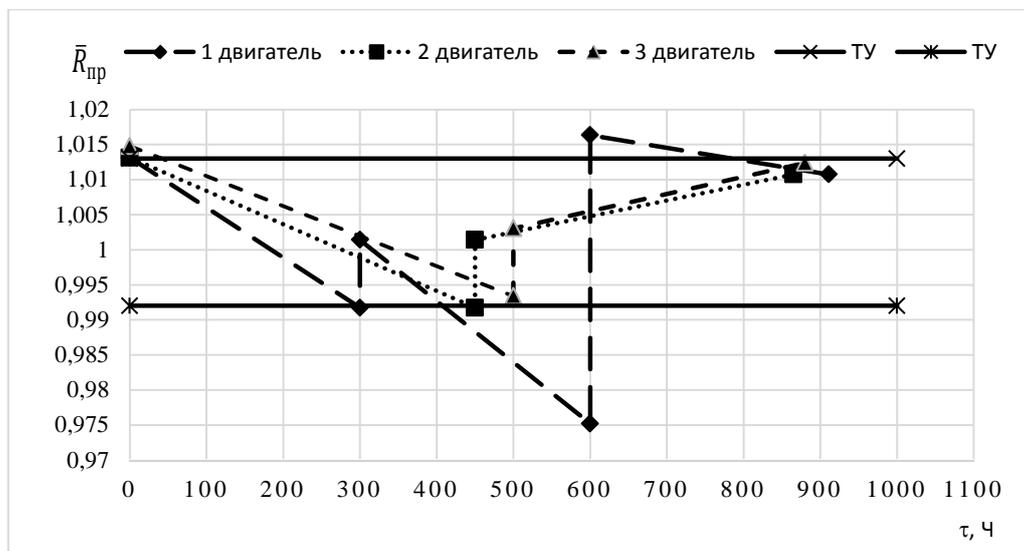


Рис. 5. Изменение тяги изделия в зависимости от наработки

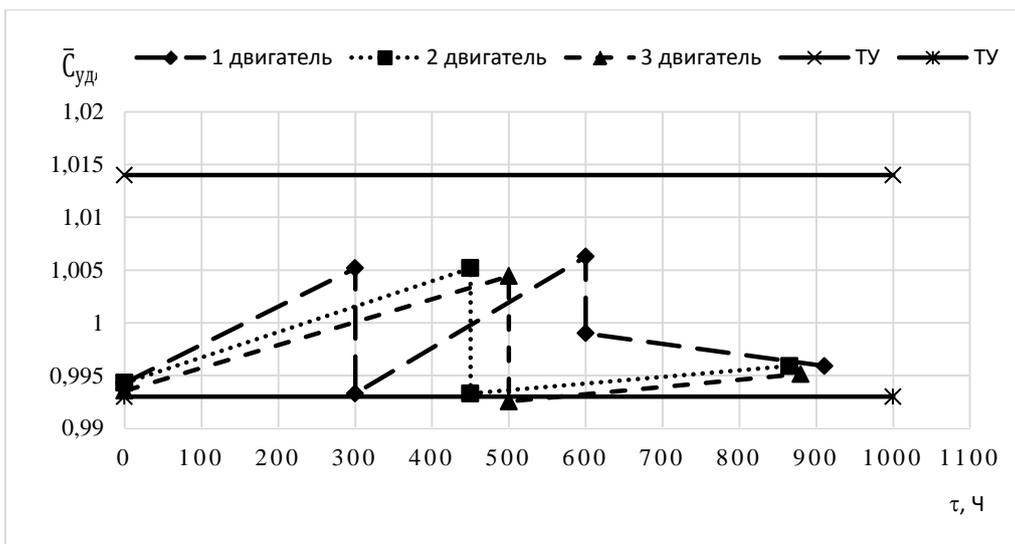


Рис. 6. Изменение удельного расхода топлива в зависимости от наработки

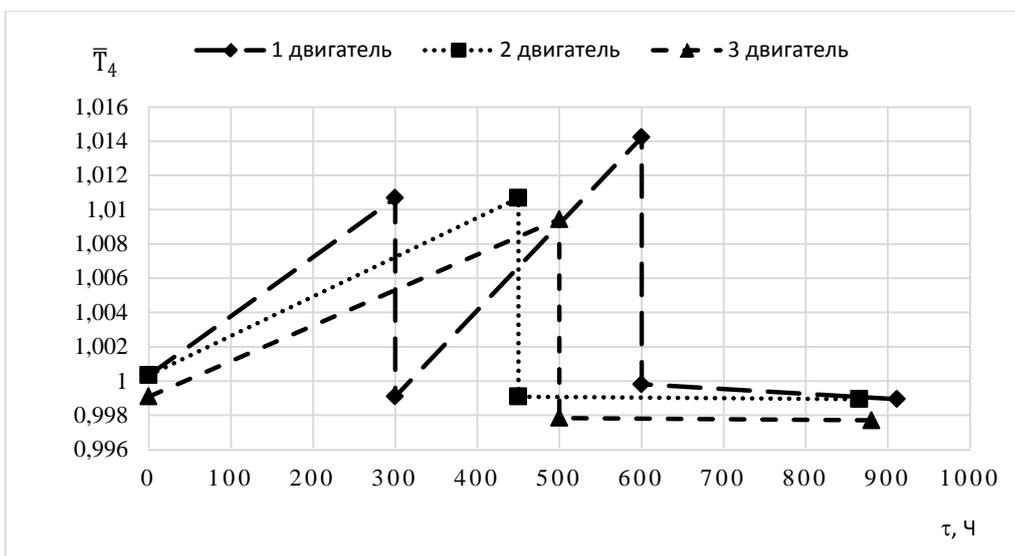


Рис. 7. Изменение температуры за ТНД в зависимости от наработки

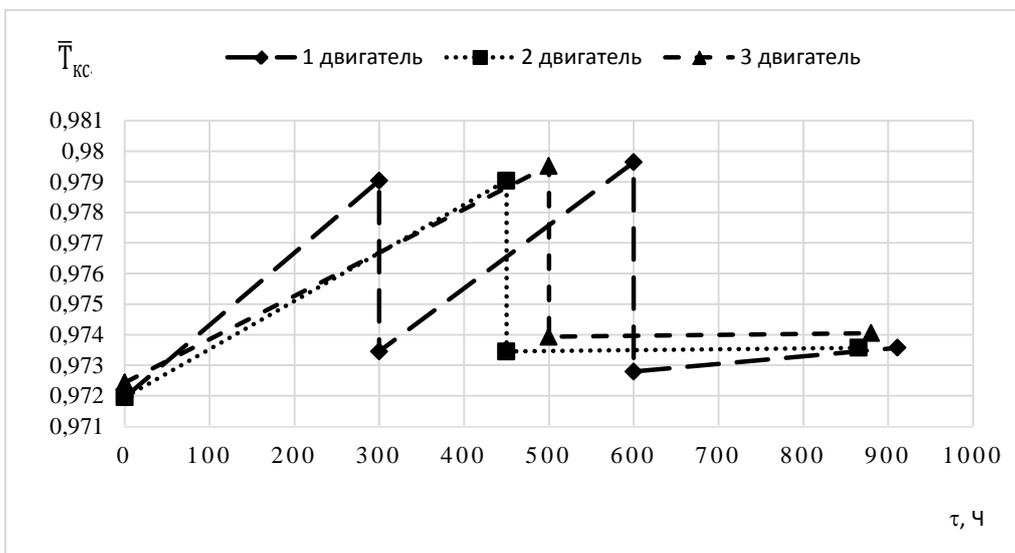


Рис. 8. Изменение температуры после КС в зависимости от наработки

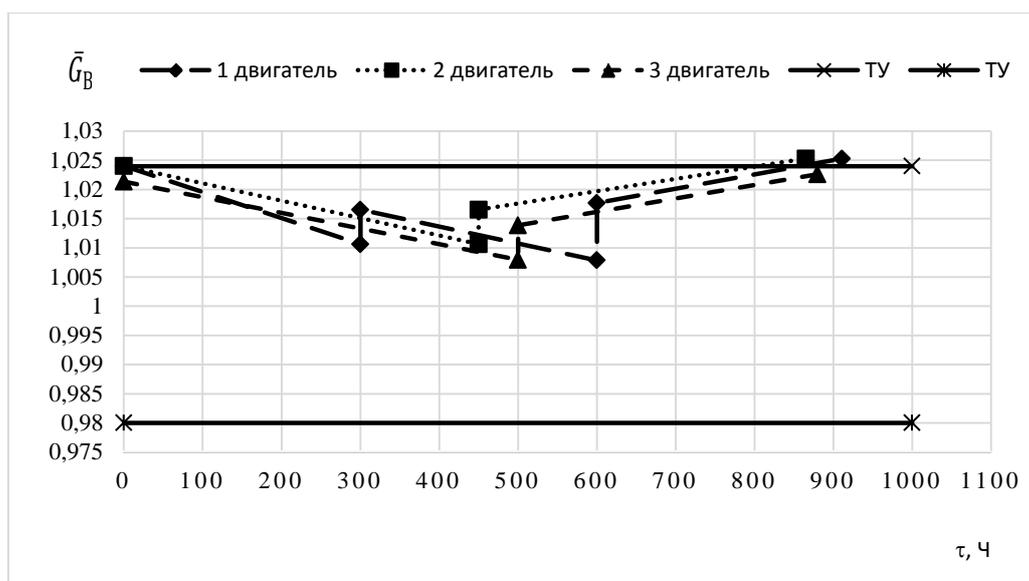


Рис. 9. Изменение расхода воздуха в зависимости от наработки

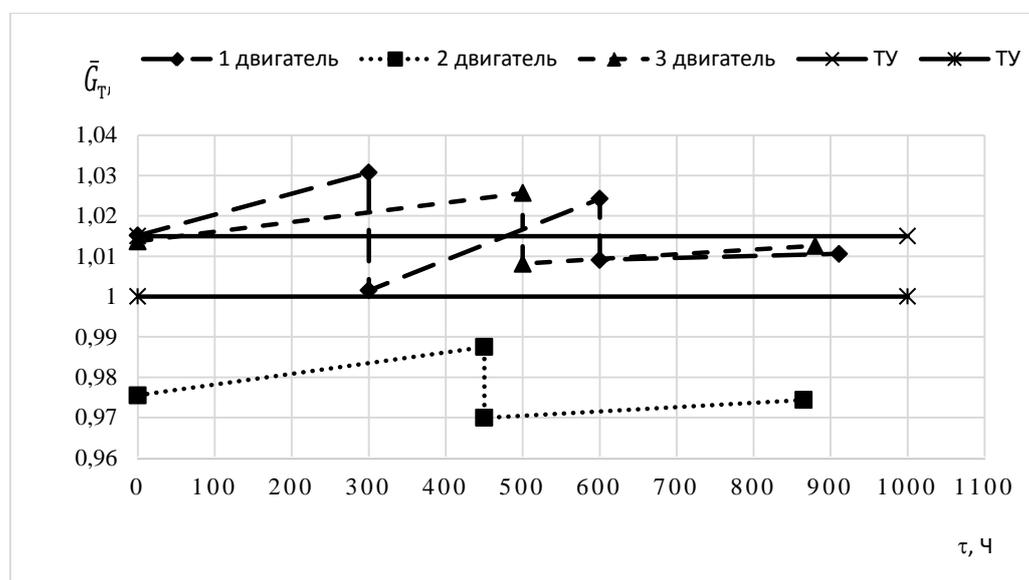


Рис. 10. Изменение расхода топлива в зависимости от наработки

Температура газов за камерой сгорания увеличилась на 0,63 %. Удельный расход топлива увеличился на 1,28 %. Температура за ТНД поднялась на 1,49 %. Расход топлива при этом увеличился на 2,21 %. После проведенного второго межресурсного ремонта обороты РНД и РВД уменьшились на 0,64 и 0,28 % соответственно. Тяга двигателя возросла на 4,04 %. Расход воздуха поднялся на 0,96 %. Температура за камерой сгорания снизилась на 0,69 %. Удельный расход уменьшился на 0,72 %. Температура газов за ТНД снизилась на 1,42 %. Физический расход топлива уменьшился на 1,47 %.

При эксплуатации второго двигателя до межресурсного ремонта (0–450 ч.э.) обороты РНД и РВД увеличились на 0,25 и 0,009 % соответственно. Тяга двигателя упала на 2,11 %. Расход воздуха уменьшился на 1,3 %. Температура газов за камерой сгорания увеличилась на 0,72 %. Удельный расход топлива увеличился на 1,08 %. Температура за ТНД поднялась на 1,02 %. Расход топлива при этом увеличился на 1,51 %. После проведенного межресурсного ремонта обороты РНД и РВД уменьшились на 1,07 и 0,8 % соответственно. Тяга двигателя возросла на 0,96 %. Расход воздуха поднялся на 0,57 %. Температура за камерой

сгорания снизилась на 0,57 %. Удельный расход уменьшился на 1,18 %. Температура газов за ТНД снизилась на 1,14 %. Физический расход топлива уменьшился на 2,83 %.

При эксплуатации третьего двигателя до межресурсного ремонта (0–500 ч.э.) обороты РНД и РВД увеличились на 0,25 % и 0,009 % соответственно. Тяга двигателя упала на 2,11 %. Расход воздуха уменьшился на 1,31 %. Температура газов за камерой сгорания увеличилась на 0,72 %. Удельный расход топлива увеличился на 1,08 %. Температура за ТНД поднялась на 1,02 %. Расход топлива при этом увеличился на 1,51 %. После проведенного межресурсного ремонта обороты РНД и РВД уменьшились на 0,97 и 0,81 % соответственно. Тяга двигателя возросла на 0,96 %. Расход воздуха поднялся на 0,58 %. Температура за камерой сгорания снизилась на 0,57 %. Удельный расход уменьшился на 1,18 %. Температура газов за ТНД снизилась на 1,14 %. Физический расход топлива уменьшился на 2,83 %.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье рассмотрены виды эксплуатации газотурбинных двигателей. Так, современные тенденции направлены на переход с эксплуатации по наработке на эксплуатацию по техническому состоянию, это требует высокотехнологических и высокоскоростных средств и методов для диагностики двигателей в процессе эксплуатации. Одним из наиболее перспективных методов диагностики является диагностика по термогазодинамическим параметрам. Данный метод позволяет оценить состояние проточной части двигателя и заранее предупредить возможные повреждения. Однако диагностика авиационного двигателя только одним методом не даст полную оценку его технического состояния, и поэтому для определения полного технического состояния двигателя применяется комплексная диагностика. Представлены графики изменения относительных приведенных замеряемых параметров в зависимости от эксплуатационной наработки до и после межресурсных и капитального ремонтов трех двигателей на режиме «полный форсаж». Выполнен анализ графиков, в ходе которого выявлена за-

кономерность: до межресурсного ремонта замеренные параметры двигателя снижаются на практически идентичные значения, после проведенных ремонтов, значения различаются.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jaeger C. C. Some aspects of the technical exploitation of aviation equipment [Электронный ресурс] URL: [http://oat.mai.ru/book/glava17/17\\_2/17\\_2.html](http://oat.mai.ru/book/glava17/17_2/17_2.html) (дата обращения 21.04.2018 г.) [C. C. Jaeger, (2018, Apr. 21), *Some aspects of the technical exploitation of aviation equipment* [Online]. Available: [http://oat.mai.ru/book/glava17/17\\_2/17\\_2.html](http://oat.mai.ru/book/glava17/17_2/17_2.html) ]
2. Korobeynikova E. A. The concept and methods of the basics of diagnosis [Электронный ресурс]. URL: <http://www.turbine.ru/683-koncepciya-i-metody-osnov-dagnostiki.html> (дата обращения 25.04.2018). [E. A. Korobeynikova, (2018, Apr. 25), *The concept and methods of the basics of diagnosis* [Online]. Available: <http://www.turbine.ru/683-koncepciya-i-metody-osnov-dagnostiki.html>. ]
3. Балицкий Ф. Я. Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов. М.: Наука, 1984. 120 с. [F. Y. Balitsky, *Vibroacoustic diagnostics of emerging defects*, (in Russian). Moscow: Nauka, 1984. ]
4. Ахмедзянов А. М., Дубравский Н. Г., Тунаков А. П. Диагностика состояния ВРД по термогазодинамическим параметрам. М.: Машиностроение, 1983. 206 с. [M. A. Ahmedzanov, N. G. Dubravskiy, A. P. Tunakov, *Diagnostics of thermogasdynamic parameters*, (in Russian). Moscow: Mashinostroeniye, 1983. ]
5. Лозовский В. Н. Диагностика авиационных двигателей. М.: Машиностроение, 1988. 324 с. [V. N. Lozovsky, *Diagnostics of aircraft engines*, (in Russian). М.: Mashinostroeniye, 2011. ]
6. Кеба И. В. Диагностика авиационных газотурбинных двигателей. М.: Транспорт, 1980. 246 с. [I. V. Keba, *Diagnostics of aviation gas turbine engines*, (in Russian). М.: Transport, 1980. ]
7. Пархоменко П. П. Основы технической диагностики М.: Энергия, 1976. 462 с. [P. P. Parkhomenko, *Basics of technical diagnostics*, (in Russian). Moscow: Energiya, 1976. ]

#### ОБ АВТОРАХ

**НАДЫРШИН Азат Ильгизович**, асп. каф. АД. Диплом магистра (УГАТУ, 2018). Готовит дис. о параметрической диагностике ТРДДФ по термогазодинамическим параметрам.

**ГОРЮНОВ Иван Михайлович**, проф. каф. АД. Дипл. инженер-механик (УАИ, 1974). Д-р техн. наук (2007). Иссл. в обл. автоматизации проектно-конструкторских работ в авиа- и двигателестроении.

#### METADATA

**Title:** Parametric diagnostics of TRDDF according to bench tests.

**Authors:** A. I. Nadyrshin<sup>1</sup>, I. M. Gorunov<sup>2</sup>

**Affiliation:**

<sup>1</sup> Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** <sup>1</sup> nad.azatykh94@yandex.ru, <sup>2</sup> gorjunov@mail.ru,

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 23, no. 3 (85), pp. 79-87, 2019. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** Realization of the Web OLAP providing formation of hypercubes "on the fly" from situation-oriented database (SODB) is discussed. The architecture of an OLAP-application on the basis of SODB is considered. The database ER-model as a basis of the conceptual multidimensional model which is setting a set of potential hypercubes is used. Design of hypercubes dimensions and measures are discussed. The approach is illustrated on an example of multidimensional activity model for dissertational councils of scholar institution.

**Key words:** Parametrical Diagnostics,

**About authors:**

**NADYRSHIN, Azat Ilgizovich**, Postgrad. (PhD) Student, Dept. of Aircraft Engine. Master of Aircraft Engine (USATU, 2018).

**GORUNOV, Ivan Mikhailovich**, Prof., Dept. of Aircraft Engine. Dipl. mechanical engineer (Ufa Aviation University., 1974). Dr. of Tech. Sci. (2007)