

Научная статья
УДК 621.43.056
URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=183594>
EDN: <https://www.elibrary.ru/MNNQAW>



Повышение надежности кольцевой камеры сгорания ГТД

Андрей Владимирович Бакланов

Казанское моторостроительное производственное объединение,
Казань, Российская Федерация
andreybaklanov@bk.ru

Аннотация. Определены основные дефекты камеры сгорания (КС) ГТД, и выполнен анализ характерных отказов. При помощи комплексного анализа оценки надежности определены основные параметры надежности камеры сгорания. На основании выполненного анализа разработаны мероприятия, направленные на повышение ресурсных показателей. Представлено семь внедренных конструктивных мероприятий. Выполнен анализ характерных отказов после внедрения мероприятий, и произведена оценка их эффективности в части улучшения ресурсных показателей. Внедренные мероприятия позволили поэтапно увеличить межремонтный ресурс двигателя до 25000 часов.

Ключевые слова: основные параметры надежности камеры сгорания, конструкция камеры сгорания, дефекты камеры сгорания, межремонтный ресурс двигателя, статистические данные об отказах камеры сгорания

Для цитирования: Бакланов А.В. Повышение надежности кольцевой камеры сгорания ГТД // Вестник Московского авиационного института. 2024. Т. 31. № 4. С. 149–158. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=183594>

Original article

Improving Reliability of the Gas Turbine Engine Annular Combustion Chamber

Andrei V. Baklanov

Kazan Motor Production Association,
Kazan, Russian Federation
andreybaklanov@bk.ru

Abstract

To increase the service life between repairs of a series-produced engine, finishing works should be performed. While combustion chamber design refinement, statistical processing of failure data is one of the primary tasks, as analysis of the processing results allows determining characteristic defects of the design under study and blueprinting its further improvement trend.

The presented article considered design features and defined the main defects of the combustion chamber of the gas-turbine engine. Analysis of characteristic faults being manifested in operation was accomplished. The author determined the key reliability parameters of the combustion chamber. Based on the performed analysis, measures aimed at the resource indicators increasing of the combustion chamber were developed. Six new implemented constructive measures are presented.

© Бакланов А.В., 2024

The first measure consists in replacing nozzles with fuel whirling on nozzles with jet-atomizing ones. The second measure is aimed at design changing of the diffuser nozzle in burner. The third measure stands for the temperature field stabilization and improvement. The Ø15 mm plugs were installed at the place of the Ø12 orifices on the flame tube casings. The fourth measure is necessary for the gases temperature reduction of near walls behind branch pipes. For this purpose, the air consumption through the cooling slits was increased. The slit height was increased from 1 to 1,4 mm. The fifth measure is aimed at falling-out preventing of the sealing package, installed between the nozzle and the swirler, by changing its structure.

The sixth measure consists in accomplishing a number of orifices in a head for its additional cooling. The seventh action is aimed at protecting the parts of the combustion chamber against the hot gases effect. The heat-shielding covering was employed for this purpose. Analysis of the characteristic faults and their efficiency assessment was re-performed after the said measures introduction. The resource indicators improvement was revealed.

The implemented measures allowed increasing the engine between-repairs resource up to 25000 hours.

Keywords: basic parameters of the combustion chamber reliability, modernization, combustion chamber design, combustion chamber defects, engine overhaul period, combustion chamber failures statistics

For citation: Baklanov A.V. Improving Reliability of the Gas Turbine Engine Annular Combustion Chamber. *Aerospace MAI Journal*, 2024, vol. 31, no. 4, pp. 149-158. (In Russ.). URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=183594>

Введение

Для увеличения межремонтного ресурса серийно выпускаемого двигателя и камеры сгорания необходимо выполнять доводочные работы. При доводке конструкции камеры сгорания (КС) статистическая обработка данных об отказах объекта исследования является одной из первоочередных задач, так как анализ результатов обработки позволяет определить характерные дефекты исследуемой конструкции и наметить направление ее дальнейшего усовершенствования [1, 2], в связи с чем представленная в данной статье работа является актуальной.

Цель исследования состоит в том, чтобы посредством анализа оценки надежности и основных параметров камеры сгорания выбрать наиболее перспективное направление ее доводки для повышения ресурсных показателей.

Рассмотрим порядок обработки статистических данных [3]:

1. Полученные исходные данные по наработке отказавших изделий $T_1, T_2, \dots, T_i, \dots, T_n$ располагаются в ряд по возрастанию их значений (строится вариационный ряд).

2. Общее время испытаний разбивается на z интервалов Δt_i с таким расчетом, чтобы в каждый интервал попало не меньше двух значений T_i , т. е. в каждом временном интервале было не менее двух отказавших изделий.

3. Для каждого интервала, общее количество которых равно z , определяются значения следующих параметров:

- Δt_i – «протяженность» временного участка;
- Δn – количество попавших в интервал отказавших изделий;

$f_i^*(t) = \frac{\Delta n_i}{N \cdot t_i}$ – плотность вероятности отказов (N – общее количество эксплуатируемых двигателей);

$\lambda_i^*(t) = \frac{\Delta n_i}{(N - n_{i-1}) \cdot \Delta t_i}$ – интенсивность отказов;

$P_i^*(t) = \frac{f_i^*(t)}{\lambda_i^*(t)}$ – вероятность безотказной работы.

4. Строятся графики-гистограммы $f_i^*(t)$, $\lambda_i^*(t)$, $P_i^*(t)$, и на основании анализа характера их протекания выдвигается предположение о соответствии статистического распределения одному из известных теоретических: экспоненциальному, Вейбула, нормальному (Гаусса).

5. На основании располагаемых статистических данных определяются параметры выбранного теоретического закона распределения:

- T – для экспоненциального;
- m и t_0 – для распределения Вейбула.

6. Определяются теоретические характеристики $f(t)$, $\lambda(t)$, $P(t)$ для всех интервалов количеством z .

7. Сравниваются статистические и теоретические распределения с помощью одного из критериев согласия (в данном случае χ^2).

8. По полученному суммарному значению χ^2 и числу степеней свободы $K = z + 1 - S$ (где S – число связей, зависящее от закона распределения), из табличных данных определяется величина P .

9. По величине $P_z = 1 - p$ оценивается соответствие статистического закона выбранному теоретическому.

10. При совпадении статистического и теоретического законов распределения прогнозируется вероятность безотказной работы (надежности) изделия при его дальнейшей эксплуатации.

По приведенной выше методике обработки статистических наблюдений сформирована статистика отказов двигателей НК-16СТ по причине выхода из строя камеры сгорания [4].

Гистограмма (рис. 1) показывает долю, приходящуюся на количество отказов, связанных с конкретной причиной, по отношению к их общему числу. Гистограмма составлена по статистическим данным досрочного снятия двигателей в связи с дефектами КС за период начала эксплуатации двигателей НК-16СТ с 1991 по 2000 г.

Из рис. 1 видно, что основная доля отказов (36%) происходит по причине действия повышенных динамических нагрузок на элементы жаровой трубы КС.

Следующая причина, обозначенная на рис. 1 ЛТ (31%), обуславливает дефекты, приводящие к съему двигателя с эксплуатации, связанные с повреждениями головной части камеры. К этим дефектам относятся прогары: элементов фронтального устройства, воспламенителей, отражателей, колец и стенок жаровой трубы в первичной зоне.

На долю повышенной неравномерности на выходе КС, приводящей к растрескиванию и повреждению сопловых и рабочих лопаток турбины, приходится 10%.

По причине повышенных остаточных напряжений, заложенных при монтаже, и повышенной температурной неравномерности на выходе КС, приводящей к растрескиванию и повреждению сопловых и рабочих лопаток турбины, происходит

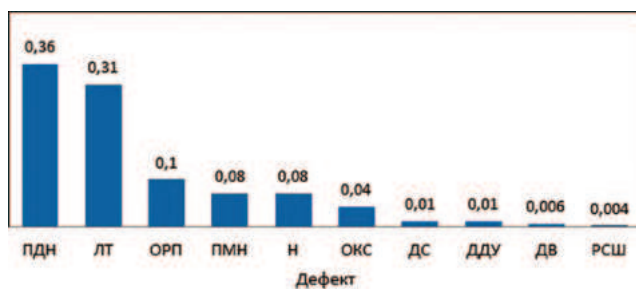


Рис. 1. Доля характерных дефектов камеры сгорания двигателя НК-16СТ:
 ПДН – действие повышенных динамических нагрузок;
 ЛТ – воздействие высоких локальных температур;
 Н – недопустимо высокая температурная неравномерность на выходе из КС;
 ПМН – повышенные остаточные напряжения, заложенные при монтаже;
 ОКС – ослабление клепочного соединения;
 ОРП – отсутствие возможности рабочего перемещения при расширении;
 ДС – дефект сборки; ДДУ – дефект другого узла двигателя, ставший причиной отказа КС;
 ДВ – дефекты воспламенителей;
 РСШ – разрушение сварочных швов

16% отказов, 4% приходится на отказы, связанные с ослаблением клепочного соединения элементов жаровой трубы. Следующие 2% отказов обусловлены дефектами сборки и выходом из строя каких-либо других узлов двигателя, повлекшим за собой поломку камеры сгорания. И менее всего отказов КС связано с дефектами воспламенителей (0,6%) и разрушением сварочных швов (0,4%).

На рис. 2 и 3 приведены λ-характеристики досрочного съема двигателей с эксплуатации по двум основным категориям дефектов: действие повышенных динамических нагрузок и воздействие высоких локальных температур. Из графиков видно, что протекание λ-характеристик для двух вышеназванных видов отказов абсолютно различное.

Если рассматривать гистограмму интенсивности отказов, связанных с действием повышенных динамических нагрузок (рис. 2), то совершенно очевидно, что в данном случае отказы происходят по мере наработки двигателя практически с одинаковой интенсивностью. Такое протекание λ-характеристик соответствует внезапным отказам, связанным с несовершенством конструкции данного узла двигателя и неучтенными факторами.

Анализируя протекание кривой интенсивности отказов на рис. 3, можно сделать вывод,

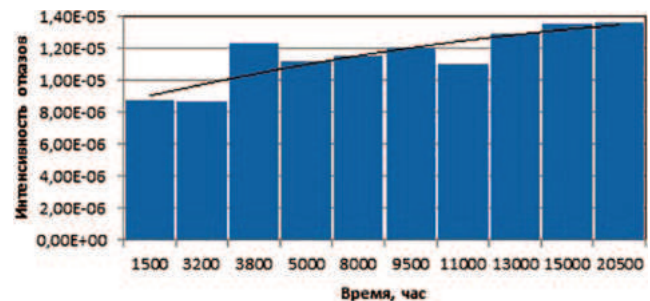


Рис. 2. Гистограмма изменения интенсивности отказов во времени из-за дефектов, обусловленных действием повышенных динамических нагрузок

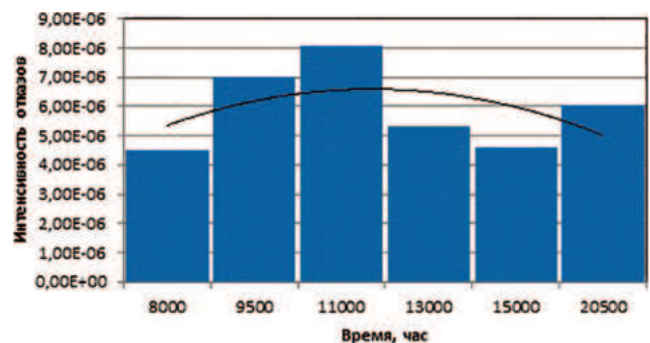


Рис. 3. Изменение интенсивности отказов во времени из-за дефектов, обусловленных воздействием высоких локальных температур

что опасность отказов, связанных с прогарам элементов головочной части жаровой трубы, резко возрастает в диапазоне наработки двигателя $t = (13000 \dots 15000)$ ч. Данное обстоятельство указывает на то, что при наработке двигателя около 13000 ч необходимо проведение регламентных работ с ремонтом и заменой износившихся элементов [5].

Из графика распределения вероятности безотказной работы по времени (рис. 4) видно, что вероятность безотказной работы резко понижается с увеличением времени наработки в диапазоне $t = (8000 \dots 10000)$ ч. Такое протекание кривой вероятности объясняется возникновением большого количества отказов, связанных, в основном, с разрушениями кожухов жаровой трубы, а затем прогаров элементов головной части камеры. Совместный анализ гистограммы интенсивности отказов (рис. 3) и кривой изменения вероятности безотказной работы (рис. 4) позволяет сделать вывод, что основной причиной низких значений вероятности безотказной работы (надежности) является большое количество отказов, обусловленных действием повышенных динамических нагрузок на элементы КС.

Следовательно, для повышения параметров надежности данного узла и двигателя в целом потребовался ряд конструктивных мероприятий, которые позволили увеличить время наработки на отказ.

Статистика по состоянию камеры сгорания после длительной наработки показала, что дефекты, связанные с изменением температурных полей потока газов в первичной зоне камеры, приводят к короблению и обгарам диффузоров горелок, короблению наружного и внутреннего кожухов до и после карманов и короблению фронтальной плиты. В результате коробления камеры сгорания имеют нестабильные температурные поля [6], чему способствуют два фактора:

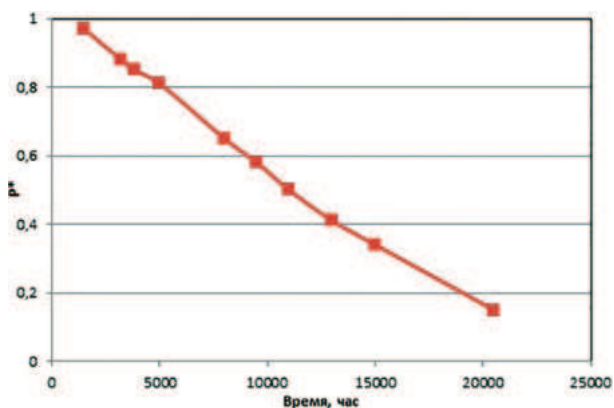


Рис. 4. Изменение вероятности безотказной работы во времени

- распыл топлива шнековой форсункой;
- подача воздуха с боковых стенок при помощи отверстий, имеющих отбортовку.

Схемы с закруткой топливного газа плохо поддаются регулировке и приводят в одних случаях к местному переобогащению зон циркуляции, а в других – к обеднению [7]. Сплошная веерная струя из центробежной газовой форсунки (ЦБГФ) устойчива к внешним воздействиям при флуктуациях воздушного потока (эффект «флаг на ветру») [8].

Для устранения описанных выше недостатков был осуществлен ряд мероприятий.

Первое мероприятие заключается в замене ЦБГФ струйными газовыми форсунками (СГФ) (рис. 5).

СГФ позволяет направить определенным образом топливные струи относительно потока воздуха и стенок диффузоров горелок. Угол в 60° , как показали экспериментальные исследования при поузловой доводке на автономном стенде, оказался оптимальным с точки зрения сочетания характеристик горения, теплового состояния стенок и температурного поля.

Второе мероприятие направлено на изменение конструкции диффузорного насадка в горелке (рис. 6). В исходном варианте горелки в сечении № 1 диффузор представлял собой окружность с переходом в усеченный конус, имеющий на кромках небольшие радиусы скругления. В измененном варианте в сечении 1 он представляет собой усеченный конус со скругленными кромками, в сечении 2 радиус скругления кромок увеличивается (рис. 7) [9].

Это позволило сформировать более широкий защитный экран, минимизирующий воздействие высоких температур на головку камеры сгорания.

Третье мероприятие направлено на стабилизацию и улучшение температурного поля, которое начинает формироваться в зоне горения. На месте отверстий $\varnothing 12$ на наружном и внутреннем кольцах

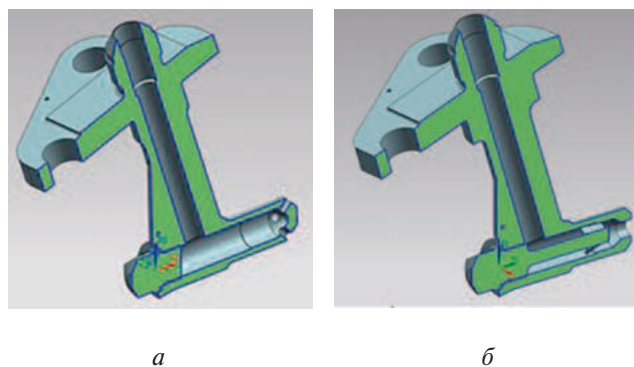


Рис. 5. Сечение: а – СГФ; б – ЦБГФ

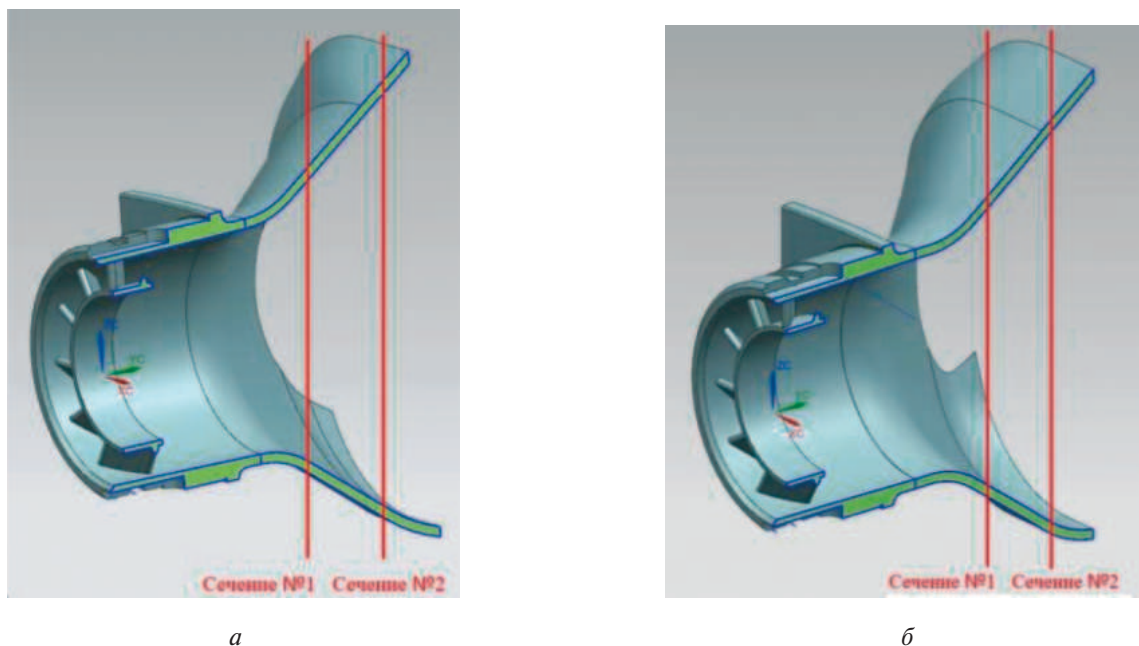


Рис. 6 Диффузорный насадок: *а* – серийный; *б* – модернизированный

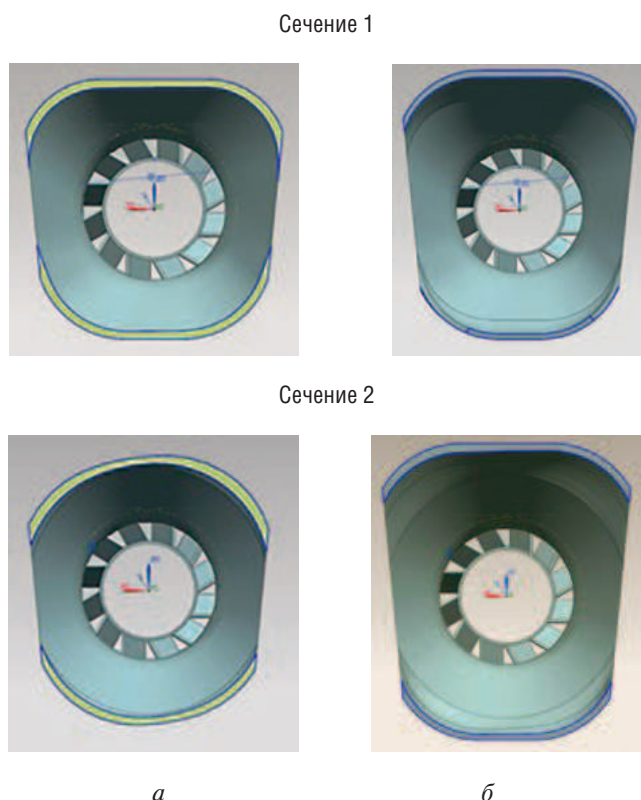


Рис. 7. Сечения диффузорного насадка:
а – серийного, *б* – модернизированного

жаровой трубы были установлены втулки Ø15 мм (рис. 8).

Наличие втулок позволило увеличить проникающую способность воздушной струи (рис. 9).

В первом случае (рис. 9,*а*) воздух проходит через отверстие, имеющее отбортовку, а во втором случае (рис. 9,*б*) воздух проходит через втулку. Увеличение проникающей способности струи позволило отодвинуть высокотемпературные области от стенки жаровой трубы [10].

Четвертое мероприятие необходимо для снижения температуры газов в пристеночном слое с внутренней стороны наружного и внутреннего



Рис. 8. Камера сгорания с втулками на жаровой трубе



а



б

Рис. 9. Картина проникновения воздушной струи в сносящий поток

кожухов за «карманами». Для этого был увеличен расход воздуха через щели охлаждения наружного и внутреннего кожухов. Высота щели была увеличена с 1 до 1,4 мм (рис. 10).

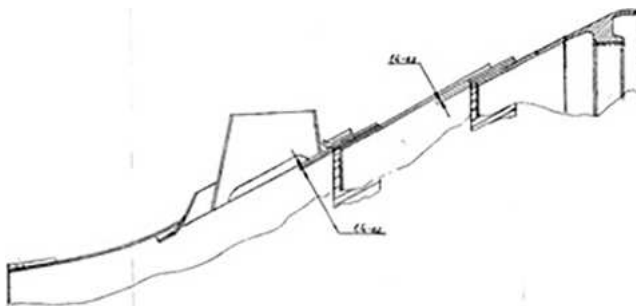
Ширина карманов наружного кожуха составляет 5 мм, а ширина «карманов» внутреннего 8 мм.

Пятое мероприятие направлено на предотвращение выпадения уплотнительного пакета, устанавливаемого между форсункой и завихрителем, путем изменения его конструкции (рис. 11).

В исходной компоновке уплотнительный пакет состоит из плавающего 2 и опорного 3 кольца. Он

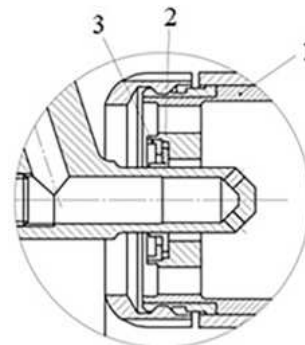


а

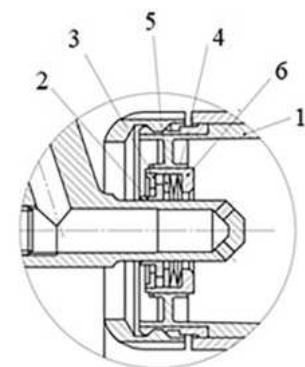


б

Рис. 10. Кожух: а – наружный; б – внутренний



а



б

Рис. 11. Уплотнительный пакет: а – до доработки; б – после доработки

закреплен в отверстии завихрителя 1 приваркой опорного кольца 3 к завихрителю 1. Доработанный уплотнительный пакет, помимо плавающего 2 и опорного 3 кольца, содержит тарельчатые пружины 4 и промежуточное кольцо 5. Данный уплотнительный пакет устанавливается в корпус завихрителя 6, который вварен в центральное отверстие завихрителя.

Шестое мероприятие заключается в выполнении ряда отверстий в головке для ее дополнительного охлаждения.

В полость между головкой кольцевой и диффузором горелки поступает дополнительная порция охлаждающего воздуха, которая снижает температуру газов возле кольцевой головки (рис. 12).

Температурное состояние кольцевой головки после образования дополнительного ряда отверстий показывает, что общее температурное воздействие на металл снизилось [11]. Были исключены локальные очаги высокой температуры, что позволило снизить температуру стенки на 143°C (рис. 13).

Внедренный комплекс перечисленных выше технических решений позволил обеспечить необходимую эпюру температурного поля, снизить температуру стенок жаровой трубы и головки кольцевой, улучшить качество подготовки топливно-воздушной смеси [12, 13] (рис. 14).

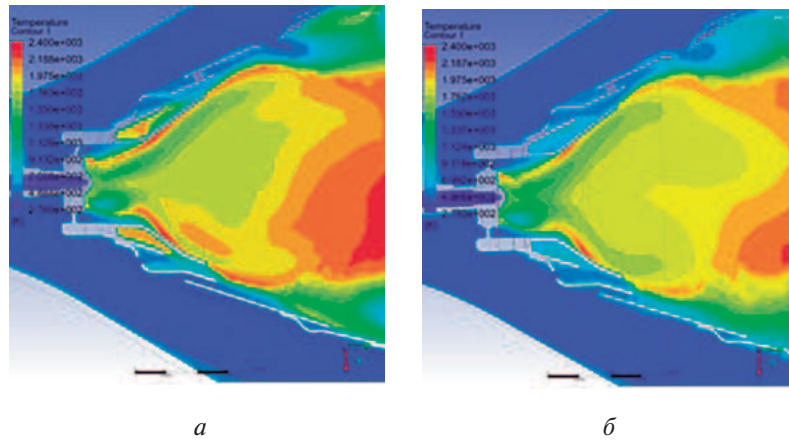


Рис. 12. Распределение температур в головной части камеры сгорания: *а* – без дополнительных отверстий; *б* – с отверстиями

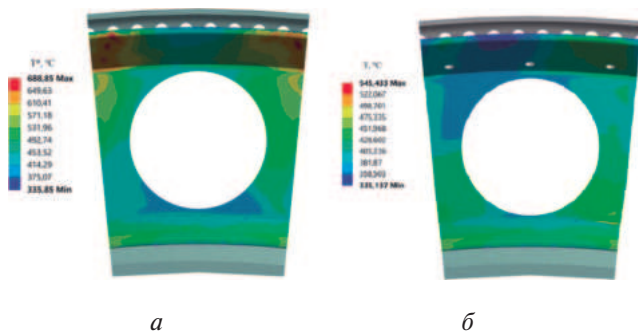


Рис. 13. Сектор головки камеры сгорания; *а* – без отверстий; *б* – с отверстиями

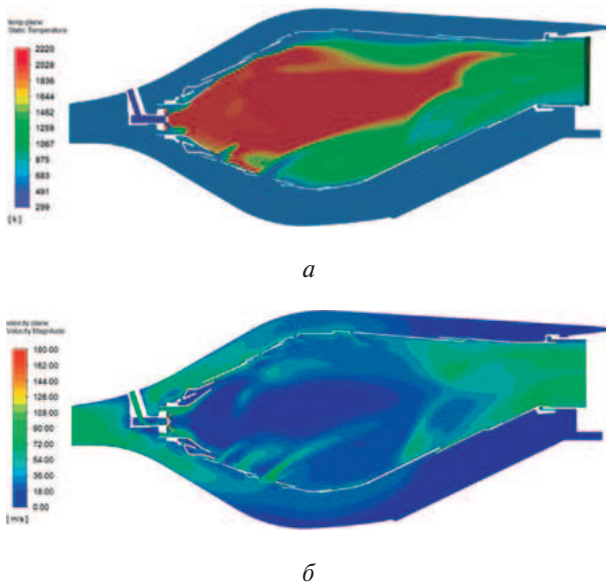


Рис. 14. Распределение температур (*а*) и давлений (*б*) в сечении камеры сгорания

Седьмое мероприятие направлено на защиту деталей камеры сгорания от воздействия горячих газов. Благодаря использованию теплозащитных покрытий (ТЗП), повышаются износостойкость,

термостойкость, жаростойкость, коррозионная устойчивость деталей [14].

Теплозащитные покрытия наносятся на диффузорные насадки горелки (рис. 15) и на кольцевую головку (рис. 16).

На кожуха камеры сгорания наносится эмаль ЭВК-103 (рис. 17). Основой высококремнеземной многоборной жаростойкой эмали ЭВК-103 является SiO_2 (55–65%). Покрытие данной эмалью поверхности металла защищает ее от окисления и газонасыщения благодаря резкому уменьшению скорости коррозионных процессов [15].

Выполнена оценка эффективности внедренных мероприятий. Рассмотрим гистограмму проявления дефектов [16–18] камеры сгорания двигателей



Рис. 15. Горелка с нанесенным ТЗП

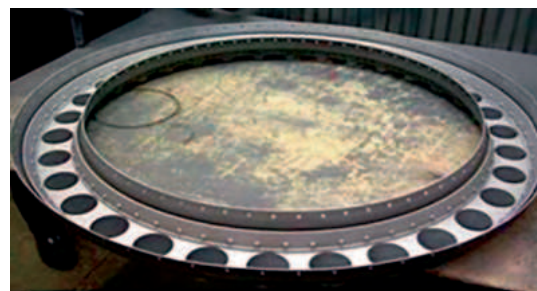


Рис. 16. Кольцевая головка с нанесенным ТЗП

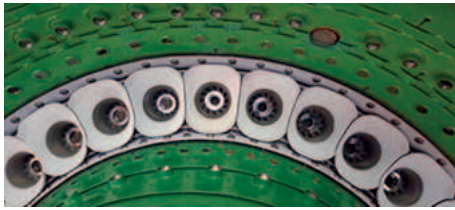


Рис. 17. Кожуха камеры сгорания с нанесенной эмалью ЭВК-103

НК-16СТ, исследованных в период с 2011 по 2020 г., после внедрения конструктивных мероприятий в сравнении с периодом 1991–2000 г.

Гистограмма (рис. 18) показывает долю, приходящую на количество отказов, проявления дефектов в 2011–2020 гг. по сравнению с 1991–2000 гг.

Из гистограммы видно, что внедренные мероприятия позволили уменьшить проявление таких дефектов, как: ПДН – действие повышенных динамических нагрузок; ЛТ – воздействие высоких локальных температур; Н – недопустимо высокая температурная неравномерность на выходе из КС.

Можно отметить, что выросла доля отказов, связанных с нарушением технологии сборки БКС, таких как ПМН – повышенные остаточные напряжения, заложенные при монтаже; ОКС – ослабление клепочного соединения; ДС – дефект сборки.

Рассмотрим статистику интенсивности отказов в период с 2011 по 2020 г. по дефекту ЛТ (воздействие высоких локальных температур), который в предыдущем периоде имел одни из максимальных показателей.

По характеру гистограммы интенсивности отказов, связанных с локальным воздействием высоких температур (рис. 19), можно видеть,

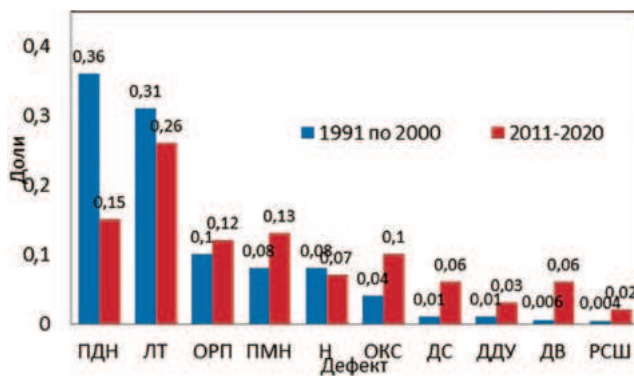


Рис. 18. Доля характерных дефектов камеры сгорания двигателя НК-16СТ в период 1991–2000 и 2011–2020 гг.

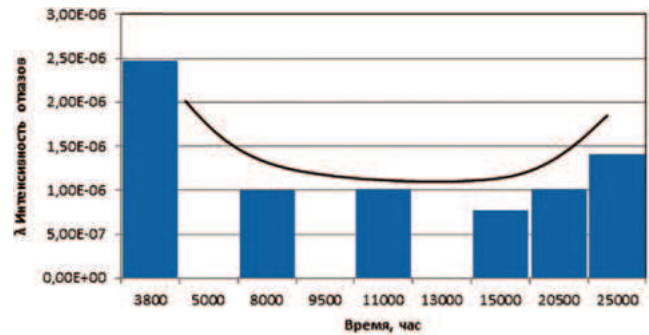


Рис. 19. Изменение интенсивности отказов по времени для дефектов ЛТ в период 2011–2020 г.

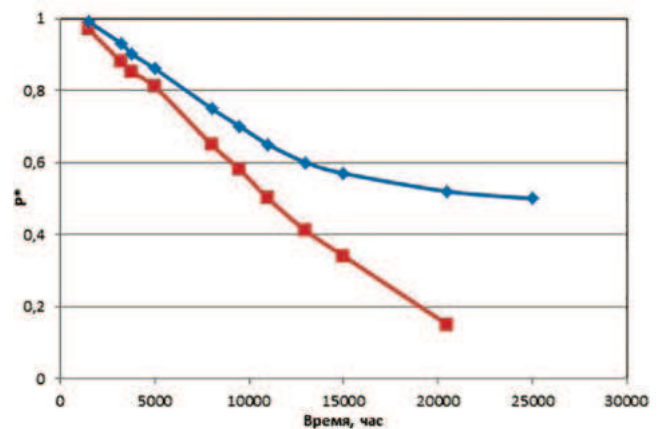


Рис. 20. Изменения вероятности безотказной работы

что период нормальной эксплуатации, когда интенсивность отказов практически не зависит от наработки изделий, т. е. $\lambda(t) = \text{const}$, составляет от 3900 до 15 000 ч, и это свидетельствует о повышении надежности изделия в целом. Интенсивность отказов начинает возрастать ближе к 25000 ч.

Рассмотрим кривые изменения вероятности безотказной работы в 1991–2000 и 2011–2020 гг. Из рис. 20 видно, что в период 1991–2000 гг. вероятность безотказной работы при 20000 ч составила $P = 0,18$, при этом в период 2011–2020 гг. наблюдается менее интенсивное снижение вероятности безотказной работы с наработкой, которая составила при 20000 ч $P = 0,58$ [19, 20].

Выводы

Анализ характерных отказов и характеристик надежности камеры сгорания позволил разработать необходимые конструктивные мероприятия для улучшения ресурсных показателей двигателя.

Благодаря внедренным мероприятиям поэтапно увеличивался межремонтный ресурс двигателя, во многом определяемый ресурсом камеры сгорания, с 15000 ч до 20000 ч в 2004 и до 25000 ч в 2010 г.

Список источников

1. Бакланов А.В. Поэтапная доводка камеры сгорания газотурбинного двигателя, работающей в условиях форсирования скорости воздуха на выходе из компрессора // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24. № 3. С. 13–22.
2. Маркушин А.Н., Бакланов А.В., Салимзянова Г.Ф. Гидравлические потери в серийной и модернизированной многофорсунной камере сгорания ГТД // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18. № 1. С. 90–94.
3. Мингазов Б.Г. Камеры сгорания газотурбинных двигателей: конструкция, моделирование процессов и расчет: Учеб. пособие. – Казань: Изд-во КГТУ, 2006. – 220 с.
4. Махутов Н.А. Прочность и безопасность: фундаментальные и прикладные исследования. – Новосибирск: Наука, 2008. – 528 с.
5. Елисеев Ю.С., Крымов В.В., Малиновский К.А., Попов В.Г. Технология эксплуатации, диагностики и ремонта газотурбинных двигателей: Учеб. пособие. – М.: Высшая школа, 2002. – 355 с.
6. Мингазов Б.Г., Бакланов А.В. Исследование стабилизации пламени в модельной камере сгорания ГТД // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2016. № 3. С. 106–110.
7. Савченко, В.П., Лавров В.Н., Маркушин А.Н., Цыбизов Ю.И. Совершенствование методологии проектирования и доводки камер сгорания // Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей: Сборник статей. Сер. «Вестник СГАУ». Выпуск 5. Самара: Изд-во СНИУ им. акад. С.П. Королёва, 2004. С. 174–178.
8. Маркушин А.Н., Меркушин В.К., Бышин В.М., Бакланов А.В. Усовершенствование конструкции камер сгорания традиционных схем в целях улучшения экологических показателей ГТД // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2010. № 1. С. 41–44.
9. Гриценко Е.А., Данильченко В.П., Лукачев С.В. и др. Конвертирование авиационных ГТД в газотурбинные установки наземного применения. – Самара, СНЦ РАН, 2004. – 266 с.
10. Сабирзянов А.Н., Явкин В.Б., Александров Ю.Б. и др. Моделирование эмиссионных характеристик камер сгорания ГТД // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2014. № 2. С. 62–70.
11. Мингазов Б.Г., Явкин В.Б., Сабирзянов А.Н., Бакланов А.В. Анализ применимости моделей горения для расчета многофорсунной камеры сгорания ГТД // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2011. № 5(29). С. 208–214
12. Lefebvre A.H., Ballal D.R. Gas Turbine Combustion: Alternative Fuels and Emissions. – 3rd Edition. – CRC Press, 2010. – 560 p.
13. Lefebvre A.H. Fuel effects on gas turbine combustion-ignition, stability, and combustion efficiency // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 1985. Vol. 107. No. 1, pp. 24–37. DOI: 10.1115/1.3239693
14. Мубояджан С.А., Лесников В.П., Кузнецов В.П. Комплексные защитные покрытия турбинных лопаток авиационных ГТД. – Екатеринбург: Квист, 2008. – 208 с.
15. Мингазов Б.Г. Внутрикамерные процессы и автоматизированная доводка камер сгорания ГТД. – Казань: Изд-во КГТУ, 2000. – 167 с.
16. Труханов В.М. Методы обеспечения надежности изделий машиностроения. – М.: Машиностроение, 1995. – 304 с.
17. Косточкин В.В. Надежность авиационных двигателей и силовых установок: Учебник. – 2-е изд., перераб и доп. – М.: Машиностроение, 1988. – 272 с.
18. Туркин И.К., Сафронов В.С. Исследование влияния коэффициента безопасности на надежность при форсированных испытаниях композиционных конструкций ЛА // Вестник Московского авиационного института. 2002. Т.9. № 2. С. 3–6. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=32626>
19. Фролов М.А. Повышение надежности информационно-измерительной управляющей системы двигательной установки // Надежность и качество сложных систем. 2015. № 2. С. 47–53.
20. Мингазов Б.Г. Процессы горения и экология камер сгорания газотурбинных двигателей. Конструкция, теория, испытание и расчет: Учеб. пособие. – Казань: Изд-во КГТУ, 2022. – 295 с.

References

1. Baklanov AV. Stepwise gas turbine engine combustion chamber development in conditions of air velocity forcing at compressor outlet. *Aerospace MAI Journal*. 2017;24(3): 13–22. (In Russ.).
2. Markushin AN, Baklanov AV, Salimzyanova GF. Hydraulic losses in the serial and upgraded multi-nozzle combustion chamber of the GTE. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*. 2016;18(1):90–94. (In Russ.).
3. Mingazov BG. *Kamery sgoraniya gazoturbinnikh dvigatelei: konstruktsiya, modelirovanie protsessov i raschet* (Combustion chambers of gas-turbine engines). Kazan: KSTU; 2006. 220 p. (In Russ.).
4. Makhutov NA. *Prochnost' i bezopasnost': fundamental'nye i prikladnye issledovaniya* (Strength and safety: fundamental and applied research). Novosibirsk: Nauka; 2008. 528 p. (In Russ.).
5. Eliseev YuS, Krymov VV, Malinovskii KA, Popov VG. *Tekhnologiya ekspluatatsii, diagnostiki i remonta gazoturbinnikh dvigatelei* (Technology of gas-turbine engine's exploitation, diagnostics and repair). Moscow: Vysshaya shkola; 2002. 355 p. (In Russ.).
6. Mingazov BG, Baklanov AV. Study of flame stabilization in a

- model gas turbine combustor. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Aviatcionnaya tekhnika*. 2016;(3):106-110. (In Russ.).
7. Savchenko VP, Lavrov VN, Markushin AN, Tsybizov YuI. Improving the methodology of designing and fine-tuning combustion chambers. In: *Protsessy goreniya, teploobmena i ekologiya teplovykh dvigatelei. Ser. Vestnik SGAU. Sbornik statei*. Samara: SNIU; 2004. Issue 5. p. 174-178. (In Russ.).
 8. Markushin AN, Merkushev VK, Byshin VM, Baklanov AV. Improvement of conventional combustion chamber structure in order to enhance GTE ecological indicators. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Aviatcionnaya tekhnika*. 2010;(1):41-44.
 9. Gritsenko EA, Danil'chenko VP, Lukachev SV. et al. *Konvertirovanie aviatcionnykh GTD v gazoturbinnye ustanovki nazemnogo primeneniya* (Converting of aviation GTD in gas-turbine installations of land application). Samara: SNTs RAN; 2004. 266 p. (In Russ.).
 10. Sabirzyanov AN, Yavkin VB, Aleksandrov YuB. et al. Modeling of the emission characteristics of the combustion chambers of a GTE. *Vestnik KGTU im. A.N. Tupoleva*. 2014;(2):62-70. (In Russ.).
 11. Mingazov BG, Yavkin VB, Sabirzyanov AN, Baklanov AV. Analysis of combustion models applicability for designing combustion chamber with a large number of nozzles. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*. 2011;(5):208-214. (In Russ.).
 12. Lefebvre AH, Ballal DR. *Gas Turbine Combustion: Alternative Fuels and Emissions*. 3rd ed. CRC Press; 2010. 560 p.
 13. Lefebvre AH. Fuel effects on gas turbine combustion-ignition, stability, and combustion efficiency. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 1985;107(1):24-37. DOI: 10.1115/1.3239693
 14. Muboyadzhan SA, Lesnikov VP, Kuznetsov VP. *Kompleksnye zashchitnye pokrytiya turbinnnykh lopatok aviatcionnykh GTD* (Complex sheetings of turbine shovels of aviation GTD). Ekaterinburg: Kvist; 2008. 208 p. (In Russ.).
 15. Mingazov BG. *Vnutrikamernye protsessy i avtomatizirovannaya dovodka kamer sgoraniya GTD* (Intra chamber processes and the automated operational development of GTD combustion chambers). Kazan: KGTU; 2000. 167 p. (In Russ.).
 16. Trukhanov VM. *Metody obespecheniya nadezhnosti izdelii mashinostroeniya* (Methods of ensuring reliability of products of mechanical engineering). Moscow: Mashinostroenie; 1995. 304 p. (In Russ.).
 17. Kostochkin VV. *Nadezhnost' aviatcionnykh dvigatelei i silovykh ustanovok* (Reliability of aviation engines and power plants: the textbook for students of aviation specialties of higher education institutions). 2nd ed. Moscow: Mashinostroenie; 1988. 272 p. (In Russ.).
 18. Turkin IK, Safronov VS. Investigation of safety factor influence on structure reliability at vehicle forced tests of composite material structures. *Aerospace MAI Journal*. 2002;9(2):3-6. (In Russ.). URL: <https://vestnikmai.ru/eng/publications.php?ID=32626>
 19. Frolov MA. Improving the reliability of the information and measurement control system of the propulsion system. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system*. 2015;(2):47-53. (In Russ.).
 20. Mingazov BG. *Protsessy goreniya i ekologiya kamer sgoraniya gazoturbinnnykh dvigatelei. Konstruktsiya, teoriya, ispytanie i raschet* (Processes of burning and ecology of combustion chambers of gas-turbine engines. Design, theory, test and calculation). Kazan: KGTU; 2022. 295 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 28.09.2024; одобрена после рецензирования 21.10.2024; принята к публикации 23.10.2024.
The article was submitted on 28.09.2024; approved after reviewing on 21.10.2024; accepted for publication on 23.10.2024.