

А. В. Зырянов, Н. С. Сенюшкин, В. Ф. Харитонов

## РАЗРАБОТКА МЕТОДА ДИАГНОСТИКИ КАМЕР СГОРАНИЯ ГТД НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ИХ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА

Приведен анализ основных видов повреждений камер сгорания. Рассмотрены вопросы применения методов математического моделирования процессов в основных и форсажных камерах для диагностирования их технического состояния. Предложен метод диагностики камер сгорания на основе численного моделирования их газодинамики и теплового состояния. *Авиационные газотурбинные двигатели; камеры сгорания; повреждения камер сгорания; моделирование основных и форсажных камер*

Камера сгорания является одним из основных узлов газотурбинного двигателя (ГТД) и в значительной мере влияет на экономичность, надежность, долговечность двигателя в целом, а также определяет степень его воздействия на окружающую среду.

По сравнению с другими узлами ГТД камера сгорания отличается многообразием и сложностью рабочего процесса.

Камера сгорания является наряду с турбиной одним из ресурсоограничивающих элементов ГТД, в связи с этим разработка методов диагностики, позволяющих на основе моделирования по замеренным параметрам оценить состояние элементов основной и форсажных камер сгорания, а также спрогнозировать возможный дефект и его развитие, является актуальной задачей.

### 1. ВИДЫ ПОВРЕЖДЕНИЙ КАМЕР СГОРАНИЯ

Среди эксплуатационных факторов, вызывающих дефекты камеры сгорания и ее элементов, следует выделить следующие:

1. Высокая температура основных деталей (вследствие экстремально высоких температур в зоне горения, для керосина приблизительно 2100...2200 К, и значительных по величине тепловых потоков к стенкам и другим элементам камеры).

2. Существенная неравномерность нагрева основных элементов камеры (вследствие неравномерности распределения охлаждающего воздуха из-за технологических отклонений, неодинакового расхода топлива через форсунки, не-

одинакового состава топливо-воздушной смеси в различных точках зоны горения, отклонений размеров отдельных элементов и других причин).

3. Коррозионное воздействие газовой среды.
4. Вибрации корпусов двигателя, передающиеся на элементы камер сгорания.
5. Вибрационный режим горения.
6. Осевые газодинамические силы, перепады давления на стенках жаровых труб.
7. Различия в температурах нагрева элементов корпуса, жаровой трубы, и деталей топливной системы (форсунок, коллекторов) вследствие протекания более холодного топлива.
8. Колебания давления в топливной магистрали.

Дефекты деталей камеры сгорания могут быть также вызваны причинами технологического характера (сварочные трещины и поры, остаточные напряжения в материале, изменение структуры при термической обработке).

Все эксплуатационные дефекты элементов камер сгорания могут быть разделены на следующие группы.

1. Срыв пламени и прекращение горения топливо-воздушной смеси, например, вследствие резкого уменьшения расхода воздуха при помпаже компрессора или резкого уменьшения расхода топлива при падении давления топливоподдачи ниже допустимого значения.

2. Повреждения корпусов [1]. Наблюдаются, в основном, усталостные повреждения. Усталостные трещины чаще всего образуются в зонах сварных швов, фланцев для отбора воздуха, бобышек для крепления агрегатов. Усталостные повреждения возникают от действия вибраций при повышенных монтажных стати-

ческих нагрузках, изменяющих расчетный характер нагружения при работе двигателя. Встречаются случаи повреждения корпусов из-за их перегрева вследствие заброса горячих газов из жаровой трубы в кольцевой канал при отрицательном перепаде давления на стенках жаровой трубы.

При разрушении корпуса основной камеры сгорания происходит резкое повышение давления в мотогондоле или фюзеляже ЛА, деформация и локальный перегрев конструкции.

Факторами, способствующими разрушению корпусов камер сгорания, являются: остаточные напряжения в материале; повышение общей или локальной температуры в камере сгорания, снижающей прочность материала корпуса; наличие сварочных трещин и пор.

Если повреждения и разрушения корпуса происходят в процессе эксплуатации вследствие повышенных вибрационных нагрузок, то они характеризуются следующими признаками:

- многоочаговый характер разрушения корпуса;
- массовые случаи усталостного разрушения трубопроводов подвода топлива к клапану запуска, пусковым блокам;
- разрушение фланца заднего корпуса компрессора, газосборника, внутренней обечайки камеры сгорания, элементов крепления корпуса камеры сгорания к сопловому аппарату турбины.

3. Повреждения жаровых труб [1, 2]. Проявляются в виде:

- трещин и деформаций термического происхождения;
- трещин усталостного характера между отверстиями для прохождения воздуха;
- трещин по сварным швам (в том числе, в местах соединения секций жаровой трубы);
- короблений стенок жаровой трубы;
- прогаров стенок (рис. 1, 2).

Возникновение и развитие повреждений жаровых труб при циклических изменениях температуры в значительной степени зависит от физико-механических характеристик используемых материалов: коэффициента теплопроводности, коэффициента термического расширения, предела длительной прочности.

Возникновению повреждений жаровых труб способствует нагарообразование на стенках, особенно в области первичной зоны жаровой трубы и на форсунках.



Рис. 1. Разрушение головки жаровой трубы

Нагарообразование является следствием неполного сгорания топлива, определяется конструктивными особенностями жаровой трубы и отклонениями значений газодинамических параметров в отдельных областях зоны горения от расчетных. В результате неполного сгорания частицы углерода осаждаются на поверхности газозвдушного тракта, что приводит к изменению условий охлаждения отдельных участков камеры, их перегреву и прогару.



Рис. 2. Прогар жаровой трубы

Повреждение жаровой трубы может также возникнуть из-за неравномерного нагрева стенок вследствие нарушения характера распыла топлива отдельными форсунками.

Жаровая труба может служить источником вторичных разрушений. Даже при незначительных первичных разрушениях выпавшие кусочки жаровой трубы могут повредить лопатки и диск турбины, вызвать повышенные вибрации элементов конструкции ротора.

4. Повреждения трубопроводов подвода топлива.

Наиболее часто повреждения трубопроводов, размещенных на корпусе двигателя, происходят в виде усталостного разрушения и в виде разгерметизации соединений трубопроводов (появления течи).

При разрушении или негерметичности трубок и шлангов топливной системы, размещенных внутри проточной части, топливо может засасываться компрессором и попадать в камеру сгорания, вызывая в ней местное переобогащение смеси. Это приводит к затягиванию процесса выгорания, так что пламя омывает лопатки соплового аппарата, а в отдельных случаях выходит и в реактивное сопло.

5. Повреждения топливных форсунок и коллекторов. Проявляются в виде ухудшения распыла топлива, уменьшения его расхода вследствие коксования форсунок и коллекторов или их засорения (в результате попадания производственной стружки, применения недостаточно очищенного топлива, разрушения топливных фильтров).

Нарушение характеристик распыла форсунок вызывает местный перегрев стенок камеры сгорания, что проявляется в выпучивании, растрескивании, повышенном окислении материала стенки. Ухудшение распыла топлива форсунками может быть связано с закоксовыванием форсунок, образованием нагара на форсунках или их засорением.

Коксование рабочих коллекторов и форсунок вызывается локальной более высокой температурой нагрева элементов конструкции (из-за неравномерности параметров обтекающего их закомпрессорного воздуха, неравномерности лучистых потоков от зоны горения, отклонений размеров).

Процесс отложения кокса протекает достаточно быстро, нередко – лавинообразно. Изменение характеристик распыла вследствие коксообразования приводит к увеличению окружной неравномерности газодинамических параметров в жаровой трубе, что негативно влияет на надежность как элементов самой камеры, так и сопловых и рабочих лопаток турбины.

Интенсивность коксообразования у современных двигателей имеет тенденцию к росту вследствие увеличения степени сжатия в компрессоре и роста температуры закомпрессорного воздуха.

Закоксовывание пусковых топливных форсунок связано с нарушением системы продувки

их трубопроводов или неполным удалением топлива из форсунок после запуска. Кроме того, высокая температура воспламенителя вызывает интенсивное окисление поступающего в него топлива с выделением смол и кокса, что, в свою очередь, приводит к закоксовыванию пусковых форсунок.

Повреждения деталей соединений элементов камер сгорания (форсунки и завихрителя, элементов крепления жаровой трубы и коллекторов к корпусу, газосборника и корпуса соплового аппарата первой ступени турбины). На поверхностях контактирующих деталей в этих соединениях часто наблюдается повышенный износ, следы фреттинг-коррозии, мелкие трещины. В результате в соединениях появляются зазоры, перетекание воздуха и газов, возникают вибрации, приводящие к наклепу контактирующих поверхностей и к быстрому разрушению элементов соединений.

## **2. ПОВРЕЖДЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ ФОРСАЖНОЙ КАМЕРЫ**

Повреждение и разрушение элементов конструкции форсажных камер происходит в результате действия дополнительного повышения температуры газа, нарушений в системе охлаждения и вибрационного горения в форсажной камере.

Источниками дополнительного подвода тепла (повышения температуры корпуса камеры сгорания) являются течи топлива или гидросмеси. Прогар корпуса форсажной камеры происходит независимо от того, где возникла течь, внутри камеры или снаружи. Горение дополнительного неорганизованного источника топлива внутри нарушает систему предохранения корпуса от перегрева (прогорают или коробятся экраны форсажной камеры). Горение топлива или масла снаружи камеры приводит к дополнительному разогреву вместо теплосъема с поверхности корпуса камеры и, как следствие, происходит перегрев материала.

Вытекание топлива может происходить через разрушенный форсажный коллектор или по фланцевому соединению подвода топлива к форсажному коллектору, из-за негерметичности телескопических соединений.

Усталостные повреждения, как правило, возникают в местах резкого изменения формы деталей и вблизи сварочных швов (на ребрах и кольцах стабилизаторов, в местах крепления стабилизатора, на стабилизаторах, тягах их кре-

пления, на антивибрационном экране, на створках, на обтекателях, наружных и внутренних стенках диффузоров и т. д.). Если внутренние поверхности форсажной камеры имеют защитное покрытие, то на нем возможны следы местного перегрева, растрескивание, сколы.

Повреждение и разрушение деталей и стенок форсажной камеры при вибрационном горении форсажного топлива происходит в зонах стабилизации пламени при больших степенях форсирования двигателя и повышенных скоростях полета. Вибрационное горение сопровождается колебаниями газового столба в форсажной камере, возбуждаемыми колебаниями фронта пламени при периодических изменениях местных составов топливо-воздушной смеси. Это явление связано с неравномерностью параметров потока на входе в камеру, местными переобогащениями смеси у кромок стабилизаторов пламени и с неправильной настройкой регулятора форсажа, дающей повышенный расход топлива, или с чрезмерным открытием створок регулируемого сопла.

### 3. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ КАМЕР СГОРАНИЯ

Для моделирования рабочего процесса в камере сгорания применяется достаточно большое число методов [3, 4], однако для целей диагностики могут быть использованы далеко не все. В данной статье анализируется возможность применения модульного метода и численных методов трехмерного моделирования течений, горения и теплообмена.

Использование модульного метода рассмотрим на примере программного комплекса Afterburner [5, 6], разработанного авторами и предназначенного для анализа газодинамики и теплового состояния форсажной камеры.

На рис. 3 виден скачок температур корпуса и экранов на относительном расстоянии от фронтального устройства, равном примерно 0,6.

Вероятной причиной этого является неудовлетворительное распределение охлаждающего воздуха в тракте охлаждения, связанное с нарушением геометрии проточной части этого тракта вследствие коробления экранов. При обнаружении подобного скачка во время термометрирования на работающем двигателе, необходимо воспроизвести подобное явление в имитационной модели, путем корректировки рас-

пределения воздуха под экранами (изменяя проницаемость экранов, высоту тракта охлаждения, загромождение проточной части, а значит, и перепад давления на экране) и выявить причину отклонения.

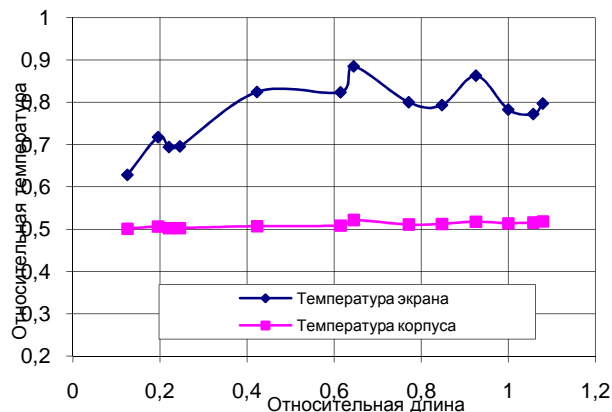


Рис. 3. Результаты расчета теплового состояния форсажной камеры

Возможны два пути использования систем имитационного моделирования.

Первый – превентивное моделирование различных отказов и формирование базы знаний по их признакам – параметрам, фиксируемым измерительными приборами (значениям температур и давлений в контрольных точках). При наступлении признаков отказа (отклонения значений параметров в контрольных точках от номинальных) подбирается наиболее подходящая модель ситуации из базы знаний и по ее исходным данным определяется дефект. Преимущество данного метода – быстрое выявление дефектов и их предпосылок, недостаток – большой объем базы знаний, а значит, и длительный процесс ее формирования.

Второй путь предусматривает создание математической модели и проведение расчетного исследования после наступления события-предвестника дефекта – отклонения контролируемых параметров от нормы. Математическая модель с помощью задания начальных условий настраивается так, чтобы на выходе получались зафиксированные параметры рабочего процесса.

Существенное преимущество данного подхода – отсутствие предварительного моделирования, недостаток – необходимость затрат дополнительного времени на создание модели после отказа или появления признаков его формирования.

Первый путь оптимален для изделий, выпущенных в большом количестве, а второй – для опытных партий.

Из вышеизложенного можно сделать вывод, что существует возможность использования систем имитационного моделирования для предупреждения и выявления дефектов.

Использование готовых моделей позволяет на ранней стадии выявлять зарождающиеся дефекты по признакам, полученным в результате имитационного моделирования.

Аналогичная технология может быть использована и для основной камеры сгорания.

#### **4. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ КАМЕР СГОРАНИЯ**

Одним из наиболее информативных факторов, позволяющим судить о наличии неисправности элементов камеры сгорания, является температурное поле в ее выходном сечении. Ряд дефектов камер (прогары и коробления жаровой трубы, оплавление и растрескивание кромок отверстий, коксование форсунок и их разрушение, деформация элементов подвески жаровой трубы и др.) вызывает изменение распределения температуры газа в выходном сечении камеры.

В современных двигателях температура газа перед турбиной достигает значений 1600...1850 К, что сильно усложняет задачу ее измерения из-за ограниченных возможностей термпар. На большинстве двигателей контролируется температура газа за турбиной высокого давления. В этом случае выходное температурное поле камеры сгорания трансформируется после прохождения через лопаточные венцы турбины. Как показывает практика, многие особенности распределения температуры газа, связанные с дефектами, при этом сохраняются.

Для исследования влияния конкретных дефектов на выходное температурное поле камеры сгорания и изучения изменений, вносимых в это поле с учетом прохождения через турбину, помимо натуральных экспериментов может с успехом применяться численное моделирование газодинамических и тепловых процессов. Такое моделирование осуществляется на основе программных комплексов вычислительной гидродинамики (ПК CFD).

Трехмерное численное моделирование рабочих процессов в камере позволяет получить значения газодинамических и физико-химических параметров среды (скоростей, давлений, температур, концентраций и др.) практически в каждой точке проточной части с учетом тур-

булентного характера течения, двухфазности потока, тепловыделения при горении, геометрических особенностей проточной части.

Однако использование такого мощного инструмента, как ПК CFD, связано с необходимостью решения ряда проблем, главная из которых заключается в необходимости верификации ПК применительно к задачам анализа отдельных элементов камеры (диффузора, фронтального устройства, секции охлаждения, пояса основных отверстий, газосборника и др.).

Верификация проводится на основании сравнения результатов численного моделирования с данными надежных натуральных экспериментов. Желательно, чтобы это были данные трехмерных экспериментов, так как при использовании результатов одномерного натурального эксперимента неизбежно возникнет проблема осреднения данных численного анализа.

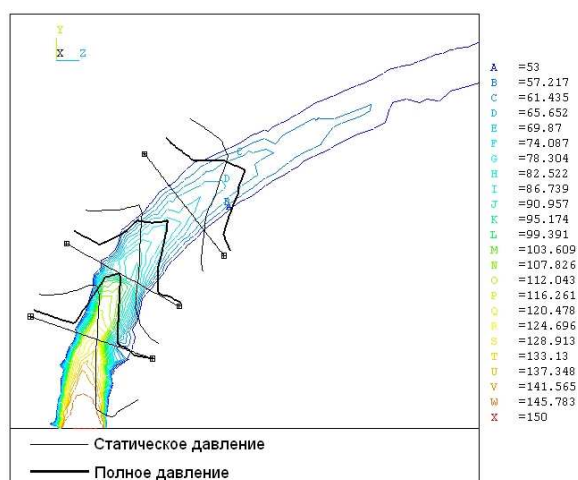
Создание модели для получения численного решения (геометрия, сетка, граничные условия, параметры численного метода, параметры управления ходом решения) предполагает также выбор физических и соответствующих математических моделей отдельных явлений рабочего процесса – турбулентности, течения в пристенном слое, радиационного теплообмена, химических реакций при горении. Однако одного выбора модели недостаточно – необходимо настроить ее, подбирая численные значения коэффициентов на основе результатов соответствующих натуральных экспериментов.

Применительно к конкретной камере, верификация должна быть выполнена заново для другого уровня и соотношения параметров и другого соотношения размеров. По результатам верификации делается вывод об адекватности применяемых моделей и пригодности использования данного ПК CFD для решения задач моделирования и диагностирования.

Для оценки корректности моделирования газодинамических процессов при вводе воздуха через основные отверстия жаровой трубы в ПК ANSYS-CFX была решена задача моделирования распространения одиночной струи в поперечном потоке [7]. Сравнение глубины проникновения струи, полученной при численном моделировании и при использовании известных моделей В. Безменова, А. Лефевра показало удовлетворительное совпадение результатов с отклонением в пределах 5 %. Результаты газодинамического анализа течения также сопоставлялись с данными натурального эксперимента, приведенными в работе [8].



Сравнение показывает подобие профилей полного и статического давления в сечениях струи, расположенных по нормали к ее оси (рис. 4). Анализ форм поперечных сечений струи на различном удалении от начального сечения показал, что под воздействием сносящего потока происходит деформация поперечного сечения из круглого в подковообразное. При этом форма поперечных сечений струи хорошо соотносится с экспериментальными данными [8].



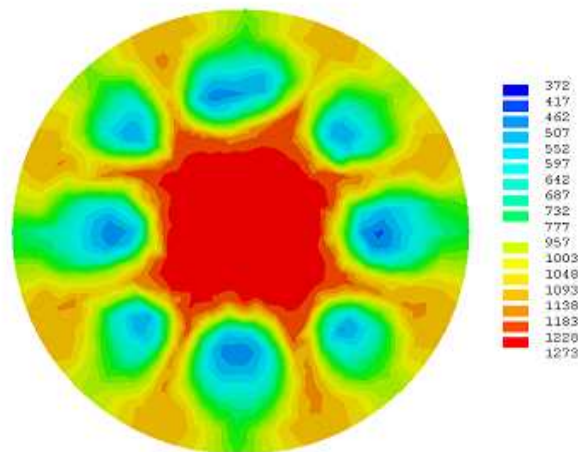
**Рис. 4.** Распределение абсолютных скоростей (изолинии), профили полного и статического давлений в плоскости симметрии одиночной струи

Положительные результаты верификации задачи распространения одиночной струи в поперечном потоке, в существенной степени влияющего на формирование температурного поля, дают возможность перейти к моделированию процессов в зоне разбавления и газосборнике.

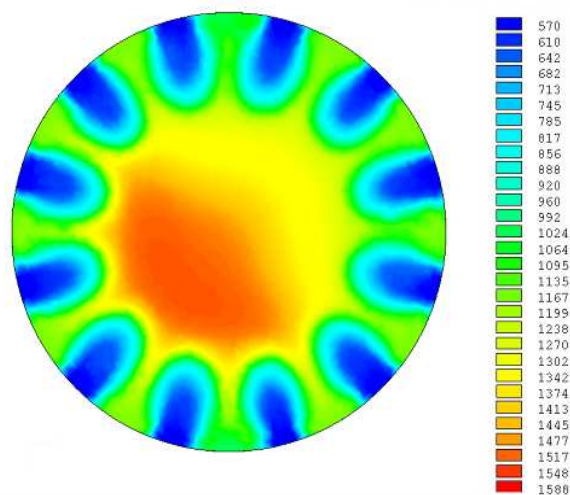
На рис. 5 приведено поле температур, полученное в ПК ANSYS-CFX, иллюстрирующее влияние диаметра отверстий на форму и размеры струи. Таким способом можно смоделировать дефекты камеры, связанные с прогаром жаровой трубы.

Возможность моделирования неисправностей форсунок (например, уменьшение пропускной способности при закоксовывании и появление соответствующей неравномерности температурного поля за фронтальным устройством) показана на рис. 6.

Результаты решения верификационных задач анализа течения для наиболее распространенного элемента фронтального устройства – лопаточного завихрителя – представлены в работе [9].



**Рис. 5.** Распределение температуры газа в поперечном сечении жаровой трубы при вдуве воздуха через отверстия разного диаметра



**Рис. 6.** Распределение температуры газа в промежуточном сечении жаровой трубы при неравномерном поле температуры на выходе фронтального устройства

Особое место при подготовке к моделированию процессов в камере занимает решение верификационных задач для *диффузора*, рабочий процесс в котором при кажущейся простоте

геометрии весьма сложен, что связано с возможностью появления отрывных зон.

Возникновение отрыва потока вследствие погрешностей изготовления деталей, деформации элементов при работе, изменения параметров на входе в камеру может привести к появлению неравномерности распределения скоростей и температур, и стать причиной дефекта (например, прогар жаровой трубы при локальном изменении условий охлаждения).

Моделирование процессов в камере сгорания в целом включает в качестве основной составляющей моделирование процесса турбулентного горения. Некоторые теоретические и методические основы моделирования горения в камерах ГТД изложены в монографии [10]. Верификационные задачи для моделирования горения с целью диагностики необходимо решать с учетом химического состава конкретного топлива, конструктивных особенностей камеры сгорания и значений газодинамических параметров на входе.

## 5. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАЗРАБОТАННОГО МЕТОДА

На основании результатов выполненных исследований можно сформулировать основные положения метода диагностики с использованием математического моделирования процессов в камере сгорания.

1. Проводится анализ причин появления конкретных дефектов исследуемой камеры сгорания с выделением закономерностей локального изменения газодинамических параметров замеренных на работающем двигателе при появлении каждого дефекта.

2. Создается геометрическая модель камеры сгорания, одно-, двух-, трехмерная, в зависимости от выбранного метода моделирования.

3. Формируется расчетная модель камеры (расчетная сетка, расчетная схема, граничные и начальные условия, параметры численного метода, опции процесса решения).

4. Выбираются физические и математические модели отдельных явлений, характерных для рабочего процесса (турбулентность, наличие двух фаз, теплообмен, горение), производится настройка этих моделей.

5. Решаются верификационные задачи для отдельных элементов камеры.

6. Создаются варианты моделей, соответствующие конкретным дефектам.

7. В программных комплексах CFD или функционального моделирования выполняется анализ рабочего процесса при наличии конкретного дефекта, фиксируется полученное распределение газодинамических параметров.

8. В случае использования в качестве диагностической информации поля температур на выходе из камеры осуществляется моделирование преобразования этого поля при прохождении потока газа через турбину.

9. Формируется база знаний по дефектам и распределениям газодинамических параметров, им соответствующим.

10. При появлении дефекта в эксплуатации на какой-либо камере оценивается соответствие замеренного распределения параметров и распределения имеющегося в базе знаний и таким образом устанавливается вид дефекта.

Дальнейшая работа должна быть направлена на создание инженерной методики оценки влияния дефектов камеры сгорания на ее рабочий процесс, а также на формирование базы знаний о дефектах и соответствующих распределениях газодинамических параметров с учетом статистической информации о дефектах камер сгорания в эксплуатации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сиротин Н. Н.** Конструкция и эксплуатация, повреждаемость и работоспособность газотурбинных двигателей. М.: РИА «ИМ-Информ», 2002. 441 с.
2. **Пчелкин Ю. М.** Камеры сгорания газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение, 1984. 280 с.
3. **Мингазов Б. Г.** Камеры сгорания газотурбинных двигателей. Казань: Изд-во КГТУ, 2008.
4. **Харитонов В. Ф.** Проектирование камер сгорания. Уфа: УГАТУ, 2008. 138 с.
5. **Сенюшкин Н. С., Харитонов В. Ф.** Двухуровневая система моделирования форсажных камер ВРД // *Авиационная техника: Известия вузов.* 2010. № 4. С. 76–78.
6. **Сенюшкин Н. С., Харитонов В. Ф.** Применение модульного метода при моделировании и проектировании камер сгорания ВРД // *Вестник УГАТУ.* 2008. Т. 11, №2(29). С. 39–47.
7. **Гребенюк Г. П., Кузнецов С. Ю., Харитонов В. Ф.** Исследование температурного поля на выходе камеры сгорания с поворотом потока в газосборнике // *Вестник СГАУ.* 2006. № 1(9). С. 48–53.

8. **Гиршович Т. А.** Турбулентные струи в поперечном потоке. М.: Машиностроение. 1993. 256 с.

9. **Кузнецов С. Ю., Катасонов И. А., Харитонов В. Ф.** Моделирование газодинамических процессов во фронтовых устройствах и зонах разбавления камер сгорания ВРД // Материалы доклада на отчетной конференции по подпрограмме «Транспорт» Минобразования РФ. М.: МАИ, 2001. С. 32–33.

10. **Куценко Ю. Г.** Численное моделирование оценки эмиссионных характеристик камер сгорания ГТД. Екатеринбург-Пермь: УрО-РАН, 2006. 140 с.

## ОБ АВТОРАХ

**Сенюшкин Николай Сергеевич**, доц. каф. авиац. теплотехники и теплоэнергетики, ст. науч. сотр. НИЛ САПР-Д, зам. декана факультета авиац. двигателей. Дипл. инженер по авиац. двигателям и энергетическ. установкам (УГАТУ, 2005). Канд. техн. наук по тепл., электроракетн. двигателям и энергоустановкам летательн. аппаратов (УГАТУ, 2009). Иссл. в обл. моделирования и проектирования камер сгорания авиац. ГТД., проектирования БПЛА их систем управления и сбора данных.

**Зырянов Алексей Викторович**, доц. каф. авиац. двиг., ст. науч. сотр. НИЛ САПР-Д. Дипл. инженер по технике эксплуатации летательн. аппаратов и двигателей (УГАТУ, 2003). Канд. техн. наук по тепл., электроракетн. двигателям и энергоустановкам летательн. аппаратов (УГАТУ, 2008). Иссл. в обл. моделирования и проектирования камер сгорания авиац. ГТД, планирования эксперимента.

**Харитонов Валерий Федорович**, доц. той же каф., вед. науч. сотр. НИЛ САПР-Д. Дипл. инженер-механик по авиац. двигателям (УАИ, 1971). Канд. техн. наук по тепл. двигателям летательн. аппаратов (МАТИ им. К. Э. Циолковского, 1978). Иссл. в обл. моделирования и проектирования камер сгорания ДЛА.