

УДК 621.45.034

В. Ф. ХАРИТОНОВ, А. В. КОНОВАЛОВА

ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАМЕР СГОРАНИЯ ГТД НА ОСНОВЕ МОДУЛЬНОГО МЕТОДА

Анализируются методы газодинамического моделирования камер сгорания ГТД. Предлагается модульный метод моделирования камер сгорания, в основе которого лежит представление камеры в виде совокупности функциональных элементов. На базе предложенного метода разработана система КАМЕРА для газодинамического анализа камер сгорания различных типов и схем. Дается общая характеристика системы, рассматриваются ее составные компоненты. Приводятся результаты численного моделирования газодинамики реальных камер сгорания, сравнение данных расчета и эксперимента. Камера сгорания; моделирование; модульный метод

ВВЕДЕНИЕ

Камера сгорания газотурбинного двигателя в значительной степени определяет его техническое совершенство (экономичность, надежность, степень воздействия на окружающую среду).

Разработка высокоэффективной камеры сгорания является сложной инженерно-технической задачей вследствие многообразия и противоречивости предъявляемых требований [1] (надежный запуск и устойчивая работа в широком диапазоне параметров на входе, высокая полнота сгорания, минимальные потери полного давления, допустимая неравномерность поля температур на выходе, допустимый уровень эмиссии токсичных веществ, минимальная масса и габариты, высокая надежность и др.), сложности рабочего процесса, трудностей при проведении экспериментальных исследований, отсутствия адекватных математических моделей, обеспечивающих потребности всех стадий проектирования.

Длительный и трудоемкий процесс создания камер сгорания состоит из нескольких этапов: формирование облика, предварительное проектирование, детальное проектирование, модельные и натурные эксперименты, доводка. Значительная доля временных и финансовых затрат приходится на экспериментальные исследования и доводку. Особое место занимает этап предварительного проектирования, на котором определяются тип камеры, ее основные размеры и параметры технического совершенства (т. е. формируется облик камеры), выбирается тип основных эле-

ментов (диффузора, фронтального устройства, системы охлаждения и др.) и производится предварительный газодинамический и тепловой расчет для оценки потерь полного давления и температур стенок.

Результаты предварительного проектирования являются исходными данными для детальной проработки камеры; они определяют объем, трудоемкость экспериментальных исследований, стендовых испытаний камеры и ее отдельных элементов. Чем точнее оценки, полученные на начальных стадиях проектирования, чем больше вариантов удастся проанализировать для обоснованного выбора наилучшего, тем меньше продолжительность и стоимость последующих этапов.

В связи с вышеизложенным, разработка методов и средств математического моделирования камер сгорания ГТД (в том числе и для этапа предварительного проектирования) остается актуальной задачей.

1. МЕТОДЫ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КАМЕР СГОРАНИЯ

Методы и подходы, используемые для газодинамического моделирования камер сгорания, отличаются друг от друга степенью детализации газовоздушного тракта камеры, явлений рабочего процесса, элементов конструкции, а также областью использования. Рассмотрим основные из них.

Струйный — камера сгорания представлена в виде системы струй [2]: активного потока, охлаждающего воздуха, циркуляционного течения, вторичного воздуха. Метод позволяет сформировать упрощенную газодинамиче-

скую модель для предварительной оценки потерь полного давления.

Последовательно-одномерный — камера представляет собой систему последовательно расположенных элементарных участков (обычно несколько десятков), на каждом из которых процессы описываются одномерными соотношениями [3, 4]. Метод дает возможность разрабатывать модели, используемые как на начальных стадиях проектирования, так и в процессе доводки камер сгорания.

Сетевой (Network Approach) — вся проточная часть камеры сгорания разбивается на большое число элементов — простейших каналов, объединенных с помощью узлов в единую сеть [5]. Число элементов (ветвей сети) может достигать нескольких сотен. Метод позволяет моделировать процессы течения и теплообмена с учетом тепловыделения при горении, дает возможность оценивать потери полного давления и тепловое состояние стенок. Он является эффективным инструментом и предварительного, и детального анализа камер сгорания.

Методы вычислительной гидрогазодинамики и теплообмена (конечных разностей, конечных элементов, конечных объемов и др.) [6,7]. Предполагают высокую степень детализации исследуемой области (число узлов и элементов $10^5 \dots 10^6$ и более) и решение задачи в трехмерной постановке. Вследствие этого становится возможным моделировать процессы в достаточно малой локальной зоне рабочего объема. Используются для детального исследования процессов, на этапах окончательного проектирования и доводки камер сгорания.

Сравнительный анализ рассмотренных методов показал, что ни один из них не дает возможности создать оперативный, достаточно гибкий и универсальный инструмент моделирования камер сгорания различных типов и схем (в том числе со сложной геометрией проточной части) или вариантов камер, отличающихся разновидностью одного или нескольких составных элементов. Соответственно не представляется возможным в течение ограниченного срока выполнить сравнительный газодинамический анализ нескольких вариантов камеры для выбора наилучшего в соответствии с требованиями технического задания. В связи с этим была поставлена задача разработки и реализации метода моделирования для газодинамического анализа камер сгорания произвольных схем.

2. МОДУЛЬНЫЙ ПОДХОД

Нами предложен *модульный* подход, основные принципы которого можно сформулировать следующим образом:

Камера рассматривается как совокупность типовых элементов, *модулей*, каждый из которых выполняет определенные функции.

Каждый модуль имеет свою математическую модель.

Различают модули:

- с фиксированной математической моделью без условий выбора (модули первого типа);

- с разветвленной математической моделью, имеющей условия выбора (модули второго типа).

Формируется библиотека базовых модулей.

Для решения задач газодинамического анализа камеры сгорания из имеющихся модулей создается расчетная модель, в которой модули соединяются между собой в соответствии с движением рабочего тела (газа, воздуха) в камере.

Математическая модель камеры формируется в виде совокупности математических моделей отдельных модулей.

Для основной камеры сгорания ГТД вводятся следующие модули: диффузор, разделитель, фронтное устройство, кольцевой канал, жаровая труба, отверстие зоны горения, отверстие системы охлаждения, отверстие зоны разбавления, выходное сечение и др. В реальной расчетной схеме камеры общее количество элементов (с учетом их многократного повторения) может достигать 100 ... 150.

В качестве моделей элементов используются одномерные соотношения, полученные на основе уравнений сохранения массы, энергии, импульса, а также при обобщении результатов экспериментальных исследований и статистических данных по функциональным элементам существующих камер сгорания. Система нелинейных алгебраических уравнений, образующих математическую модель, решается методом Ньютона.

В соответствии с приведенной выше классификацией (табл.), *модульный* подход занимает промежуточное положение между *последовательно-одномерным* и *сетевым* подходами. По сравнению с ними он обладает большей гибкостью и универсальностью, так как позволяет:

- моделировать камеры сгорания различных схем, используя библиотеку модулей.

Таблица

Общая характеристика методов газодинамического моделирования камер сгорания

Название	Форма представления проточной части камеры	Размерность модели	Число однотипных элементов	Кто использовал	Решаемые задачи
1. Струйный	Система струй	1	3–5	Абрамович Г. Н.	Качественный анализ картины течения в жаровой трубе
2. Последовательно-одномерный	Система элементарных участков	1	10–30	Безменов В. Я., Мингазов Б. Г., Костерин В. А.	Предварительное и детальное проектирование, доводка камер сгорания
3. Сетевой	Система элементарных потоков	1	300–500	Рубини Ф. А., Стуттафорд П. Д.	Предварительное проектирование
4. Методы механики сплошных сред	Система ячеек проточной части достаточно малого размера	2, 3	10^5 – 10^6	Сполдинг Д. Б., Ляшенко В. П.	Детальный анализ элементов камеры сгорания, доводка
5. Модульный	Система типовых элементов	1	50–100	Коновалова А. В., Харитонов В. Ф.	Предварительное проектирование, доводка камер сгорания

При этом переход от одной схемы к другой не требует изменения математических моделей модулей. Достаточно собрать новую расчетную схему из элементов имеющегося набора;

– использовать для каждого модуля различные математические модели, соответствующие его разновидностям (в системах с модулями первого типа);

– непрерывно развивать систему моделирования за счет пополнения библиотеки модулей и ввода новых моделей для каждого конкретного модуля;

– решать задачи как поверочного, так и проектировочного характера, не перестраивая расчетного алгоритма (эта возможность обеспечивается применяемым численным методом и схемой организации расчета).

Кроме того, модульный подход, вследствие меньшего числа однотипных элементов в расчетной схеме, использования менее сложных моделей и методов решения, обеспечивает более высокую производительность расчетов по сравнению с сетевым.

Таким образом, предлагаемый метод занимает свое место среди методов моделирования камер сгорания ГТД.

3. СИСТЕМА ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

На базе модульного подхода разработана система КАМЕРА для газодинамическо-

го анализа камер сгорания ГТД. Разработка системы осуществлена на базе программного комплекса САМСТО, с помощью которого можно создать систему моделирования любого технического объекта, если известна совокупность уравнений, описывающих его поведение.

Для решения задачи газодинамического анализа сначала формируется расчетная схема камеры путем размещения модулей на экране монитора и их соединения в соответствии с взаимодействием реальных элементов камеры сгорания. Связь модулей на схеме и передача данных в процессе расчета осуществляются с помощью информационных потоков. Каждый поток представляет собой набор параметров, значения которых передаются от одного модуля к другому. В системе КАМЕРА используются два типа информационных потоков:

– «газодинамический» (параметры потока в жаровой трубе, в кольцевых каналах, площадь отверстий в жаровой трубе);

– «давление» (полное и статическое давление в жаровой трубе).

Основным компонентом системы является библиотека модулей (рис. 1).

Для каждого модуля разработаны математическая и информационная модели. Рассмотрим их на примере модуля «Жаровая труба». Информационная модель, содержащая наборы входных и выходных данных, их распределение по информационным потокам, возмож-

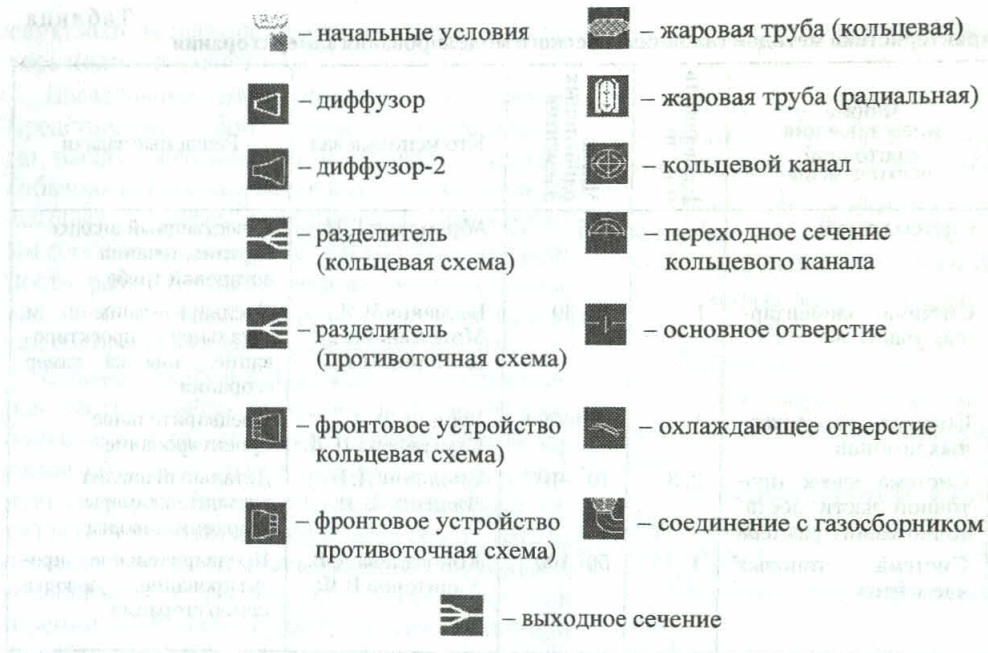


Рис. 1

ные связи с другими модулями, приведена на рис. 2.

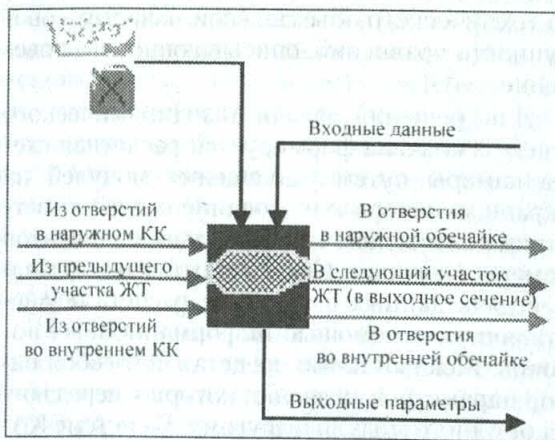


Рис. 2

Математическая модель модуля представляет собой систему следующих уравнений:

1. Расход газа в жаровой трубе:

$$G_{\Gamma i} = g_i + G_{\Gamma(i-1)},$$

где i – номер пояса отверстий; g_i – расход воздуха, вводимого через i -й пояс отверстий в жаровой трубе.

2. Текущее значение коэффициента избытка воздуха α_i :

$$\alpha_i = \frac{G_{\Gamma i} - G_T}{L_0 G_T},$$

где G_T – расход топлива; L_0 – стехиометрический коэффициент.

3. Энтальпия газа $J_{\Gamma i}$ определяется из уравнения

$$G_B J_{\Gamma i} + G_T (J_T - J_{TK}) - G_B J_K = G_T \eta_i H_u,$$

где η_i – текущее значение полноты сгорания топлива; G_B – расход воздуха; $J_{\Gamma i}$, J_K – энтальпия рабочего тела в жаровой трубе и на входе в камеру; J_T , J_{TK} – конечная и начальная энтальпия топлива.

Величина η_i определяется одним из следующих способов:

- задается в исходных данных;
- рассчитывается по упрощенной модели:

$$\eta_i = \frac{\alpha_i}{1,8} \text{ при } \alpha_i \leq 1,8; \quad \eta_i = \eta_{\max} \text{ при } \alpha_i \geq 1,8;$$

- рассчитывается по следующей модели [3]:

$$\eta_{\Gamma i} = \frac{3U_{M0}^3}{W'^3} \left\{ \frac{1}{3} \left(1 - e^{-\frac{3x_i \varepsilon_i}{l_i}} \right) - \frac{U_{H6}}{U_{M0}} \left(1 - e^{-\frac{2x_i \varepsilon_i}{l_i}} \right) + \frac{U_{H6}^2}{U_{M0}^2} \left(1 - e^{-\frac{x_i \varepsilon_i}{l_i}} \right) \right\},$$

где ε_i , l_i – соответственно, интенсивность и масштаб турбулентности; x_i – расстояние

i -го пояса отверстий от фронтального устройства; W' — пульсационная составляющая скорости потока; $U_{нб}$ — нормальная скорость распространения пламени с учетом балластирования смеси продуктами сгорания; $U_{м0}$ — скорость распространения пламени в турбулентном потоке.

4. Температура газа [4]:

$$T_{гi}^* = 1000 \left(-0,05 + 2,273 \cdot 10^{-3} (J_{гi})^{0,882} \right).$$

5. Полное давление:

$$p_{гi}^* = p_{г(i-1)}^* \left[1 - \frac{k_{гi} \lambda_{гi}^2 Y_i}{k_{гi} + 1 - (k_{гi} - 1) \lambda_{гi}^2} \right],$$

$$Y_i = \frac{\Delta T_{гi}^*}{T_{гi}^*} + 2 \frac{g_i}{G_{гi}} (1 - \bar{u}_i),$$

где $k_{гi}$ — показатель адиабаты газа; $\lambda_{гi}$ — приведенная скорость; \bar{u}_i — относительная осевая составляющая скорости истечения воздуха через отверстия жаровой трубы.

Соотношения для g и \bar{u}_i зависят от формы и расположения отверстий. Для основного отверстия в стенке жаровой трубы величина \bar{u}_i определяется, как

$$\bar{u}_i = \frac{w_{ккi} \rho_{кi} f_i \cos \delta_i + g_i \sin \delta_i}{w_{гi} \rho_{гi} f_i},$$

где δ_i — угол наклона стенки жаровой трубы; $\rho_{кi}$ — плотность воздуха на входе в камеру; $w_{ккi}$, $w_{гi}$ — скорость воздуха в кольцевом канале и жаровой трубе; f_i — площадь отверстий i -го пояса.

Необходимым условием газодинамического анализа любой камеры сгорания является соблюдение баланса расходов газообразной среды на входе и выходе. В связи с тем, что проточная часть камеры представляет собой совокупность сообщающихся газового и воздушного трактов, распределение расходов между жаровой трубой и кольцевыми каналами заранее неизвестно и получается в процессе итерационного счета. Для достижения баланса расходов необходимо сформировать закон расчета, т. е. задать совокупность условий и ограничений, которым должны удовлетворять рассчитываемые параметры. Основными компонентами закона расчета являются наборы варьируемых и поддерживаемых параметров.

Разработаны законы расчета для кольцевых проточных и противоточных камер сгорания, а также для камеры секционного типа.

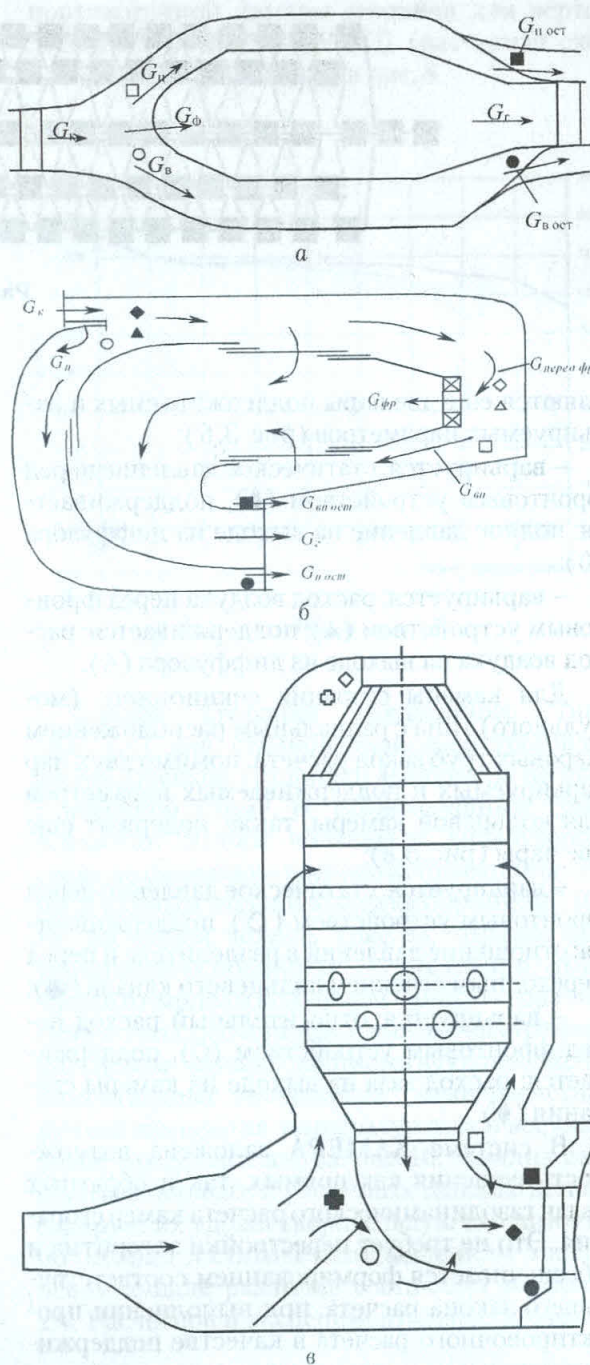


Рис. 3

Для кольцевой проточной камеры в качестве варьируемых параметров выбирают относительные расходы воздуха на входе кольцевых каналов (□, ○) (рис. 3, а), в качестве поддерживаемых — расходы воздуха в последнем сечении кольцевых каналов (■, ●).

Для получения корректного решения задачи газодинамического анализа кольцевой противоточной камеры в закон расчета, кроме вышеупомянутых для кольцевой схемы, доба-

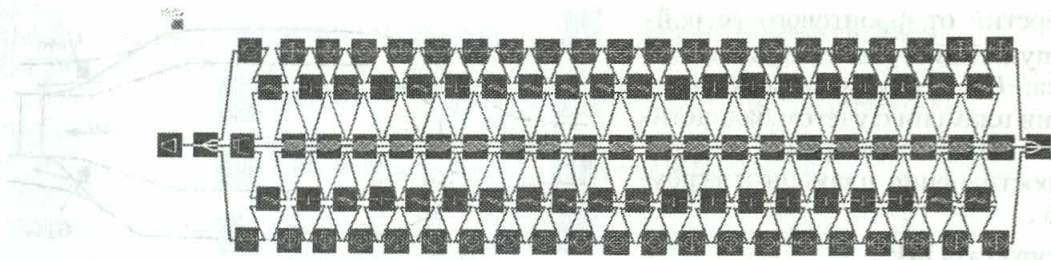


Рис. 4

вляются еще две пары поддерживаемых и варьируемых параметров (рис. 3, б):

- варьируется: статическое давление перед фронтным устройством (\blacklozenge), поддерживается: полное давление на выходе из диффузора (\blacklozenge);

- варьируется: расход воздуха перед фронтным устройством (\blacktriangle); поддерживается: расход воздуха на выходе из диффузора (\blacktriangle).

Для камеры сгорания секционного (модульного) типа с радиальным расположением жаровых труб закон расчета, помимо двух пар варьируемых и поддерживаемых параметров для кольцевой камеры, также содержит еще две пары (рис. 3, в):

- варьируется: статическое давление перед фронтным устройством (\blacklozenge), поддерживается: отношение давлений в разделителе и перед переходным сечением кольцевого канала (\blacklozenge);

- варьируется: относительный расход перед фронтным устройством (\blacklozenge), поддерживается: расход газа на выходе из камеры сгорания (\blacklozenge).

В системе КАМЕРА заложена возможность решения как прямых, так и обратных задач газодинамического расчета камер сгорания. Это не требует перестройки алгоритма и обеспечивается формированием соответствующего закона расчета: при выполнении проекторочного расчета в качестве поддерживаемых параметров используются значения расходов через пояса отверстий, в качестве соответствующих варьируемых — площади этих отверстий. Для проведения поверочного расчета наборы поддерживаемых и варьируемых параметров меняются местами.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

С целью верификации разработанной системы был проведен газодинамический анализ камер сгорания разных схем для газотурбинных двигателей различного назначения

(как авиационных, так и наземных стационарных), разработанных в ФГУП «НПП „Мотор“» и Самарском НТК им. Н. Д. Кузнецова.

Расчетная схема кольцевой прямоточной камеры сгорания со смесительными патрубками в зоне разбавления для авиационного турбореактивного двигателя [8] представлена на рис. 4. Распределения относительных статических давлений b в газовом тракте и расходов газа по длине жаровой трубы даны на рис. 5. Значение b определялось по отношению к параметрам на входе $b_i = 2(p_k^* - p_{Ti}) / (\rho_k w_k^2)$. Как видно из рис. 5, результаты расчета относительных статических давлений с отклонением не более 10% укладываются в диапазон соответствующих экспериментальных данных.

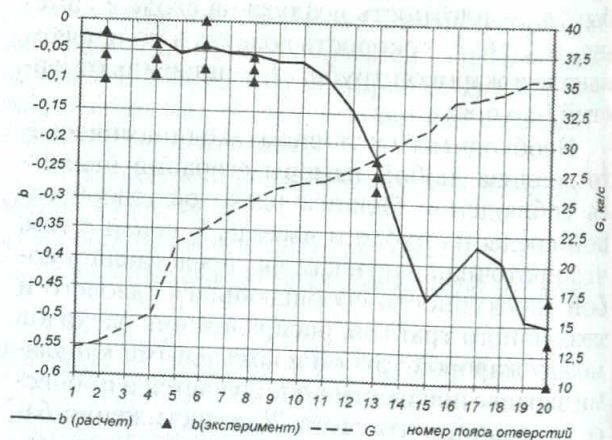


Рис. 5

Для прямоточной кольцевой камеры сгорания с вводом разбавительного воздуха через круглые отверстия сравнение рассчитанных значений статических давлений в наружном кольцевом канале с результатами экспериментов показывает (рис. 6), что расхождение не превышает 2%.

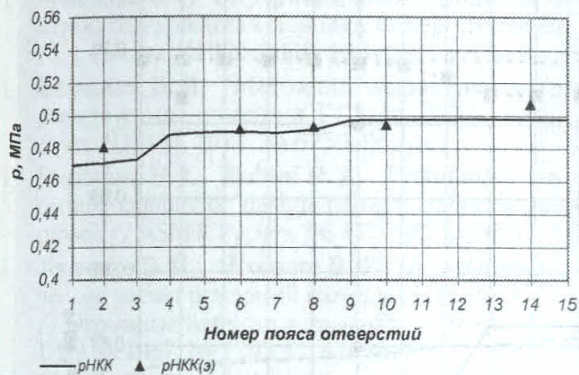


Рис. 6

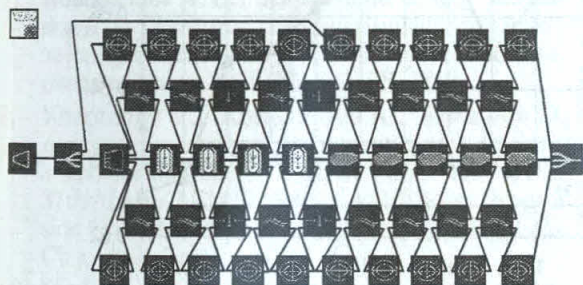


Рис. 7

Особенности моделирования кольцевой противоточной камеры сгорания [9] связаны с более сложным характером течения в ее проточной части (рис. 3, б). Воздух, выходящий из компрессора, делится на две части. Одна часть идет в наружный кольцевой канал и, омывая газосборник, движется в том же направлении, что и газ в жаровой трубе. Вторая часть также идет в наружный кольцевой канал, но в другом направлении, противоположном движению в жаровой трубе, омывает ее головные секции. Часть воздуха через фронтальное устройство подается в жаровую трубу, а оставшаяся часть идет во внутренний кольцевой канал. Результаты расчета кольцевой

противоточной камеры сгорания для вертолетного турбовального ГТД (расчетная схема — рис. 7) приведены на рис. 8.

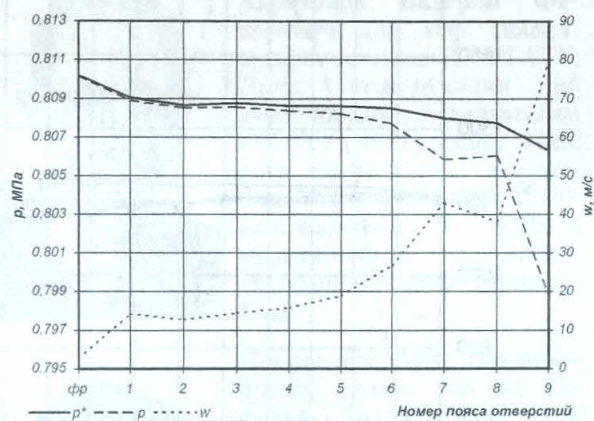


Рис. 8

Камера сгорания секционного типа (рис. 3, в) для стационарной газотурбинной энергетической установки выполнена по противоточной схеме, ее газоздушный тракт образован общим кольцевым диффузором, десятью радиально расположенными модулями и единым кольцевым газосборником [10]. Ее расчетная модель (рис. 9), отражающая указанные особенности, существенно отличается от модели кольцевой камеры сгорания. Результаты расчета давлений во внутреннем кольцевом канале, соответствующие экспериментальные значения, а также расчетная кривая изменения температур газа в жаровой трубе представлены на рис. 10. Анализ экспериментальных и расчетных данных демонстрирует их удовлетворительную сходимость: по полным и статическим давлениям в кольцевом канале различие составляет не более 2%. Расчетные и экспериментальные значения

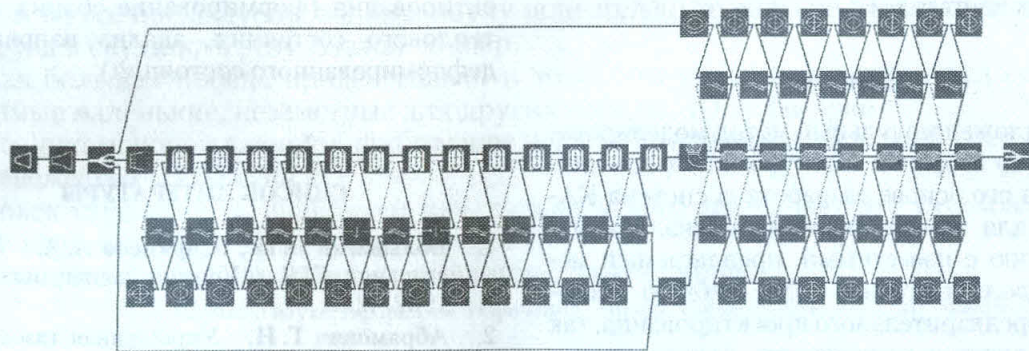


Рис. 9

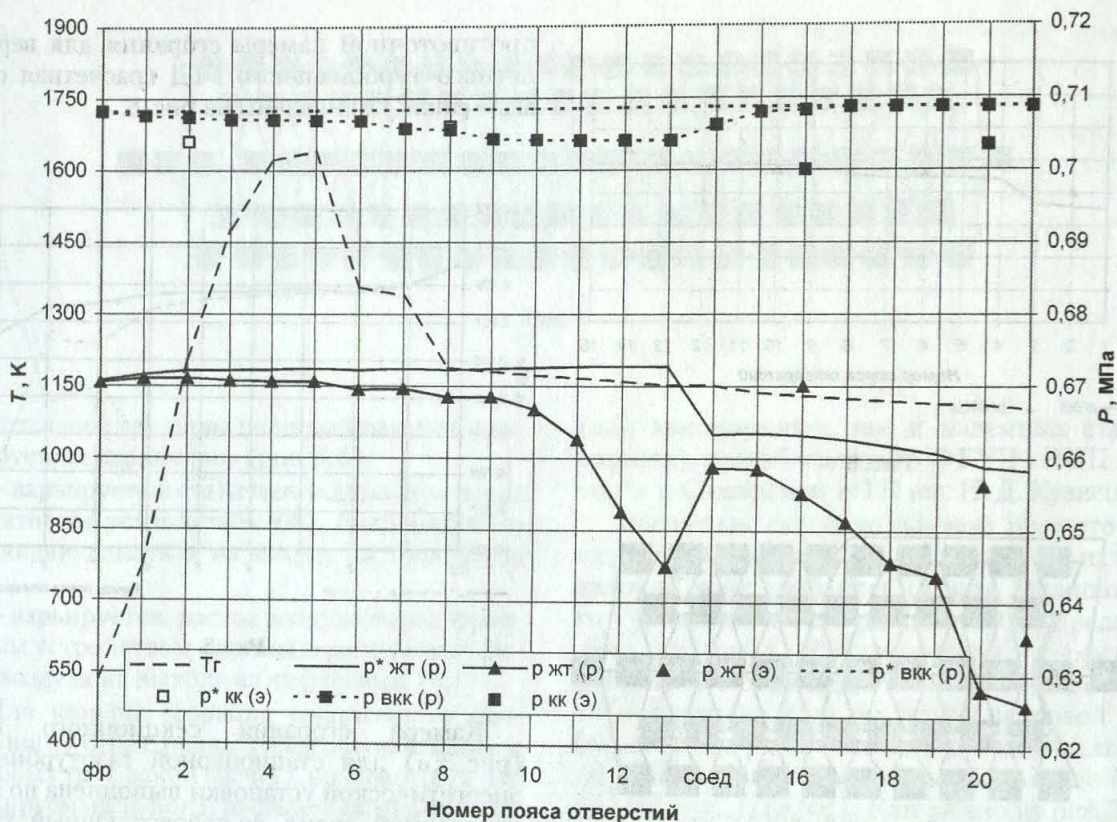


Рис. 10

коэффициента восстановления полного давления в камере сгорания $\sigma_{жс}$ незначительно отличались друг от друга (0,90 и 0,89 соответственно).

Результаты газодинамического анализа, проведенного для пяти камер сгорания ГТД, свидетельствуют об адекватности математических моделей отдельных модулей системы, корректности моделирования схемы проточной части и корректности формирования законов расчета.

Система КАМЕРА внедрена в ФГУП «НПП „Мотор“» и в УГАТУ на кафедре авиационных двигателей.

ВЫВОДЫ

Предложен модульный метод моделирования камер сгорания газотурбинных двигателей и на его основе разработана система КАМЕРА для газодинамического анализа. По сравнению с известными, предлагаемый метод позволяет создать более гибкую технологию предварительного проектирования, так как появляется возможность проанализировать большее количество схем и большее число вариантов для обоснованного выбора наи-

лучшего. Система КАМЕРА может быть использована также и при доводке камер сгорания. Система является открытой и может развиваться как в направлении повышения точности анализа за счет использования новых более адекватных моделей, так и в направлении расширения возможностей (расширение библиотеки модулей с целью учета других факторов, влияющих на газодинамические процессы).

Необходимо отметить, что на базе модульного метода могут быть созданы системы моделирования и для других этапов проектирования (формирование облика, анализ теплового состояния, анализ напряженно-деформированного состояния).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Большагин В. И., Саркисов А. А.** Камеры сгорания ГТД / Уфимск. авиац. ин-т. Уфа, 1982. 42 с.
2. **Абрамович Г. Н.** Упрощенная газодинамическая модель камеры сгорания для идеальной жидкости с подводом тепла // Изв. вузов. Авиационная техника. 1995. № 1. С. 37-42.

3. **Мингазов Б. Г.** Внутрикамерные процессы и автоматизированная доводка камер сгорания ГТД. Казань: КГТУ, 2000. 168 с.
4. **Безменов В. Я.** Методика гидравлического расчета камер сгорания ГТД на ЭВМ: Техн. отчет. ЦИАМ, 1971. № 6759. 96 с.
5. **Stuttaford P. J., Rubini P. A.** Preliminary gas turbine combustor design using a network approach // ASME Papers. 96-GT-135. 1996.
6. **Ляшенко В. П., Ягодкин В. И.** Аэродинамический расчет основной камеры сгорания ГТД // Отрывные течения в камерах сгорания: Тр. ЦИАМ. 1987. № 1203. С. 81–84.
7. **Mongia H. C.** Combustion modeling in design process. Application and future development // AIAA Paper. 1994. № 94-0466. 72 p.
8. **Коновалова А. В., Харитонов В. Ф., Кожин Д. Г.** Система газодинамического анализа камер сгорания ГТД // Изв. вузов. Авиационная техника. 2000. № 4. С. 58–60.
9. **Kharitonov V., Konovalova A., Kozhinov D.** Air-breathing engine combustors modeling using a modular approach // AIAA Paper 2001-3198. 37th AIAA / ASME / SAE / ASEE Joint Propulsion Conf. & Exhibit, 8–11 July 2001, Salt Lake City, Utah. 7 p.
10. **Гребенюк Г. П., Коновалова А. В., Харитонов В. Ф.** Газодинамический анализ камеры сгорания модульного типа для энергетиче-

ской ГТУ // Изв. вузов. Авиационная техника. 2002. № 2. С. 73–75.

ОБ АВТОРАХ



Харитонов Валерий Федорович, доц. каф. авиационных двигателей УГАТУ. Дипл. инж.-механик по авиационным двигателям (УГАТУ, 1971). Канд. техн. наук по тепловым двигателям ЛА (защ. в МАТИ, 1978). Исследования в области моделирования и проектирования камер сгорания ГТД.



Коновалова Анна Владимировна, ассист. той же кафедры. Дипл. инж.-механик по авиационным двигателям и энергоустановкам (УГАТУ, 1998). Канд. техн. наук по тепловым, электроракетным двигателям и установкам ЛА (УГАТУ, 2002). Исследования в области моделирования и проектирования камер сгорания ГТД.

Разнов

СЛОВО О НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ

Прежде чем станешь писать, научись же порядочно мыслить. *Гораций.*

Две силы наиболее успешно содействуют воспитанию культурного человека: искусство и наука. Обе эти силы соединены в книге. *М. Горький.*

Выражай смертными словами бессмертные вещи. *Лукреций.*

Честь российского народа требует, чтобы показать способность и остроту его в науках. *М. В. Ломоносов.*

Для меня слово мудрости ценнее золота. *Демокрит.*

Почти во все предыдущие эпохи в науку шли только те, кого не пугала суровость труда и скудность результатов. *Винер.*

Самая большая победа придет только к тому, кто умеет одерживать над собой самые маленькие, незаметные для других победы. *Ю. А. Гагарин.*

Источником, порождающим наибольшее число общественных бедствий, является невежество. *Гельвеций.*

Человек стремится к знанию, и как только у него пропадает это стремление, он перестает быть человеком. *Нансен.*

Без сомнения, все наше знание начинается с опыта. *Кант.*

[Слово о науке: Афоризмы. Изречения. Литературные цитаты. Кн. 2. М.: Знание, 1981.]