

УДК 621.45.034

**В. Ф. ХАРИТОНОВ, Н. С. СЕНЮШКИН****ПРИМЕНЕНИЕ МОДУЛЬНОГО МЕТОДА  
ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ И ПРОЕКТИРОВАНИИ  
КАМЕР СГОРАНИЯ ВОЗДУШНО-РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

Предлагается модульный метод моделирования камер сгорания ВРД, в основе которого лежит представление камеры в виде совокупности функциональных элементов. На базе предложенного метода разработаны системы моделирования КАМЕРА и Afterburner для газодинамического и теплового анализа камер сгорания, а также формирования их облика. Дается общая характеристика систем, рассматриваются их составные компоненты. Обосновывается внедрение многодисциплинарности систем. Приводятся результаты численного моделирования реальных камер сгорания, сравнение данных расчета и эксперимента. *Камера сгорания; форсажная камера; моделирование; проектирование; многодисциплинарность; модульный метод*

Камера сгорания, как один из основных узлов воздушно-реактивного двигателя, играет существенную роль в обеспечении его технических характеристик. Несмотря на кажущуюся простоту устройства (отсутствие вращающихся и подвижных элементов, большого числа разнообразных деталей), рабочий процесс камеры сгорания отличается необычайной сложностью. Он представляет собой совокупность физико-химических процессов, протекающих в потоке движущегося газа практически одновременно и влияющих друг на друга: течение газообразной среды, теплообмен, распыливание и испарение топлива, смесеобразование, воспламенение, горение, смешение воздуха и продуктов сгорания. Камера сгорания в наименьшей степени (по сравнению с другими узлами двигателя) поддается моделированию с использованием аналитических и численных методов.

Создание камер сгорания требует проведения большого объема экспериментов. Вследствие этого разработка эффективных методов и средств их моделирования является актуальной задачей.

Сложная структура рабочего процесса камер сгорания диктует необходимость разработки систем моделирования, позволяющих решать задачи инженерного анализа в области различных дисциплин — газодинамики, горения, образования вредных веществ, теплообмена, прочности, надежности и долговеч-

ности, то есть *многодисциплинарных систем анализа.*

Процесс проектирования камер сгорания, как и любого сложного изделия, имеет *многоуровневый* характер, заключающийся в последовательном усложнении используемых математических моделей с одновременным увеличением их размерности при переходе с одного уровня (этапа) на другой.

Среди методов, используемых для моделирования камер сгорания, необходимо отметить модульный метод, основные принципы которого изложены в статье [1]. Преимущества этого метода — универсальность, гибкость, производительность, умеренные требования к вычислительным ресурсам — позволяют рассматривать его как перспективный базовый метод для разработки многодисциплинарных многоуровневых систем моделирования камер сгорания.

**1. ДВУХДИСЦИПЛИНАРНАЯ СИСТЕМА  
МОДЕЛИРОВАНИЯ ОСНОВНЫХ КАМЕР  
СГОРАНИЯ**

Основные особенности многодисциплинарных систем включают в себя:

- наличие общей базы для решения задач анализа различных аспектов проектируемого (исследуемого) объекта,
- наличие внутренних (для системы) каналов передачи информации из блока анализа одной дисциплины в блок другой,

• возможность проведения итерационных расчетов с участием блоков различных дисциплин, в рамках единой среды моделирования.

В качестве общей базы в многодисциплинарных системах может использоваться:

- 1) численный метод решения задач различных дисциплин (общий решатель);
- 2) метод дискретизации исследуемого объекта (например, конечные элементы, суперэлементы, конечные объемы, функциональные элементы и др.);
- 3) набор (библиотека) типовых элементов;
- 4) пре- и постпроцессор;
- 5) интерфейсная часть.

Отдельные системы многодисциплинарного анализа построены с использованием всех вышеперечисленных типов общих баз, в большинстве же систем этот перечень реализован лишь частично.

Авторами на базе модульного метода разработана система двухдисциплинарного анализа «КАМЕРА-4.00», позволяющая проводить анализ газодинамических процессов и анализ теплового состояния стенок для кольцевых проточных и противоточных камер сгорания. Разработка выполнена на базе созданной ранее системы газодинамического моделирования «КАМЕРА-2.00» [1]. В библиотеку модулей системы «КАМЕРА-2.00» был введен один новый элемент — «Стенка», позволяющий моделировать процессы теплообмена в стенках камеры сгорания, определять температуры жаровой трубы и корпуса и таким образом получать информацию, необходимую для оценки их прочности и ресурса.

Математическая модель элемента «Стенка» сформирована для случая послойного конвективно-пленочного охлаждения секций жаровой трубы и состоит из трех базовых нелинейных алгебраических уравнений теплового баланса, основными составляющими которых являются лучистые, конвективные и кондуктивные тепловые потоки. Тепловой поток вдоль стенок камеры не учитывается. Расчетная схема секции охлаждения представлена на рис. 1.

$$\begin{cases} \alpha_f(T_f^* - T_{w\Gamma}) + q_{лг} = \alpha_b(T_{wb} - T_b^*) + q_{лw}; \\ \alpha_b(T_{wb} - T_b^*) + q_{лw} = \frac{\lambda_w}{h_w}(T_{w\Gamma} - T_{wb}); \\ \alpha_b(T_b^* - T_k) + q_{лw} = \sigma \varepsilon_k T_k^4; \end{cases}$$

где искомые величины  $T_{w\Gamma}$ ,  $T_{wb}$ ,  $T_k$  — температуры стенки жаровой трубы с горячей и холодной стороны и стенки корпуса соответственно;  $q_{лг}$  — лучистый поток от пламени к

стенке жаровой трубы;  $q_{лw}$  — лучистый поток от стенки жаровой трубы к стенке корпуса, причем считается, что потоки являются результирующими;  $\alpha_f$ ,  $\alpha_b$  — коэффициенты теплоотдачи от стенки в защитную пленку и в охлаждающий воздух в кольцевом канале;  $T_b^*$  — температура воздуха в кольцевом канале;  $T_f^*$  — температура газа в пристеночном слое;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности материала жаровой трубы;  $\varepsilon_k$  — степень черноты поверхности корпуса;  $\sigma$  — постоянная Стефана-Больцмана.

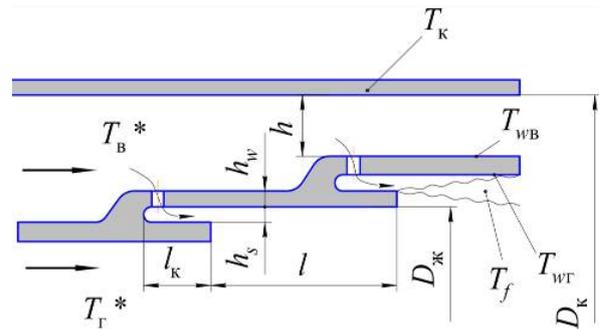


Рис. 1. Расчетная схема модуля «Стенка»

Величины лучистых потоков могут быть найдены следующим образом:

$$\begin{aligned} q_{лг} &= 0,5(1 + \varepsilon_w) \varepsilon_\Gamma \sigma T_\Gamma^{*1,5} (T_\Gamma^{*2,5} - T_{w\Gamma}^{*2,5}), \\ q_{лw} &= \varepsilon_{пр} \sigma (T_{wb}^4 - T_k^4), \end{aligned}$$

где  $T_\Gamma^*$  — температура в зоне горения,  $\varepsilon_\Gamma$  — степень черноты факела пламени,  $\varepsilon_w$  — степень черноты стенки жаровой трубы,  $\varepsilon_{пр}$  — приведенная степень черноты, определяемая как

$$\varepsilon_{пр} = \frac{\varepsilon_k \varepsilon_w}{\varepsilon_k + \varepsilon_w (1 - \varepsilon_k) \frac{D_w}{D_k}}.$$

Величины коэффициентов теплоотдачи рассчитываются по соотношениям

$$\begin{aligned} \alpha_f &= c_1 Re_\Gamma^{-m} Pr_\Gamma^{-n} c_{p\Gamma} (\rho u)_\Gamma; \\ \alpha_b &= c_2 Re_b^{-m} Pr_b^{-n} c_{pb} (\rho u)_b \end{aligned}$$

где  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $m$ ,  $n$  — константы, определяемые в результате обобщения экспериментальных данных;  $Re$ ,  $Pr$ ,  $\rho u$ ,  $c_p$  — соответственно число Рейнольдса, число Прандтля, массовая скорость, теплоемкость при постоянном давлении, определяемые по параметрам газа (индекс «г») и воздуха (индекс «в»);  $\rho$  — плотность.

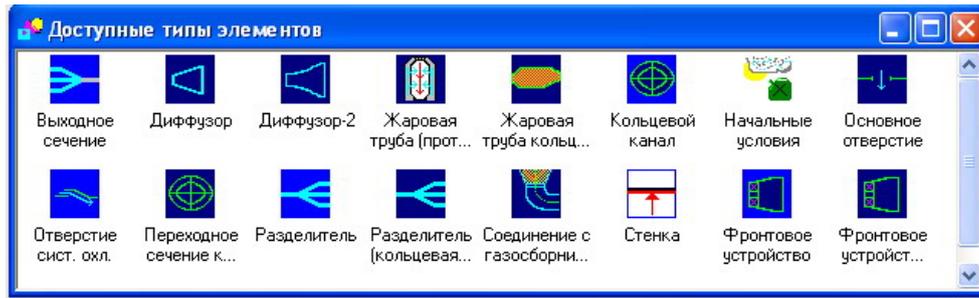


Рис. 2

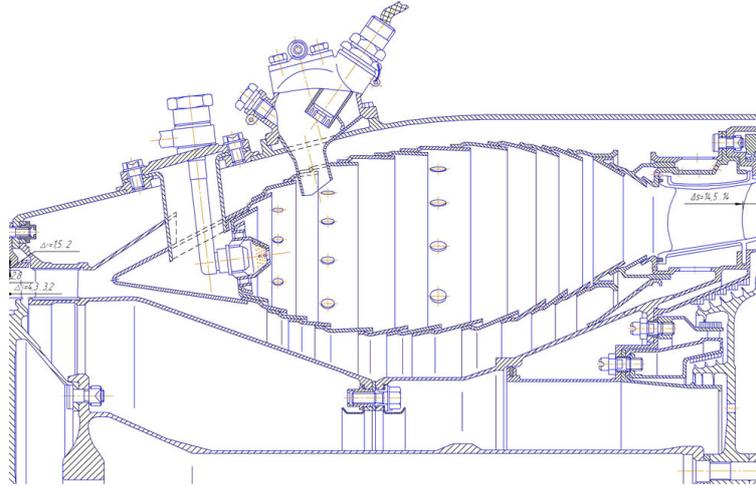


Рис. 3. Камера сгорания ТРДД

Температура газа в пристеночном слое определяется в зависимости от величины эффективности охлаждения  $\eta$

$$T_f^* = T_T^* - \eta(T_T^* - T_B^*).$$

Значение  $\eta$  рассчитывается следующим образом [2]:

для  $0,2 \leq m \leq 1,3$

$$\eta = 1,1m^{0,65}(\mu_B/\mu_T)^{0,15}(l/h_s)^{-0,2}(h_w/h_s)^{-0,2};$$

для  $1,3 \leq m \leq 4$

$$\eta = 1,28(\mu_B/\mu_T)^{0,15}(l/h_s)^{-0,2}(h_w/h_s)^{-0,2},$$

где  $m$  — отношение массовых скоростей воздуха и газа;  $h_s$  — высота щели между козырьком и стенкой секции охлаждения;  $\mu_T$ ,  $\mu_B$  — коэффициенты динамической вязкости;  $l$  — длина секции охлаждения.

Библиотека элементов системы «КАМЕРА-4.00» показана на рис. 2.

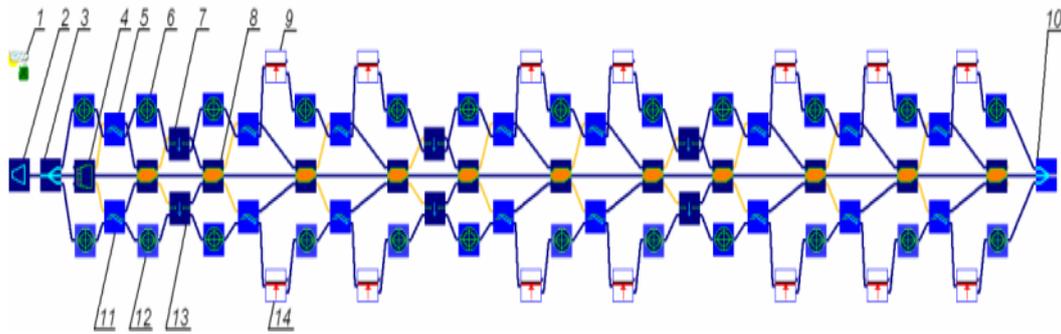
В версии 4.00 технология решения задач аналогична базовой версии. Особенности формирования расчетной схемы заключаются в следующем. Модуль «Стенка» (см. пример ниже, рис. 4) всегда располагается после модуля «Отверстие системы охлаждения» и является замыкающим в данном сечении. В нем

производится обработка данных, полученных транзитом через модуль «Отверстие системы охлаждения» от модуля «Жаровая труба», предыдущего модуля «Стенка» и модуля «Кольцевой канал», то есть выполняется расчет температур стенок жаровой трубы (со стороны газа и вторичного воздуха, для наружной и внутренней обечаек жаровой трубы), температуры корпуса (со стороны наружного и внутреннего кольцевых каналов), уточненной с учетом подогрева температуры вторичного воздуха в кольцевых каналах, а также температуры пристеночного слоя для следующего сечения.

Проведено тестирование системы моделирования при проведении комплексного (газодинамического и теплового) анализа двух камер сгорания: для двухконтурного турбореактивного двигателя (ТРДД) пассажирского самолета и для ТРДДФ боевого самолета.

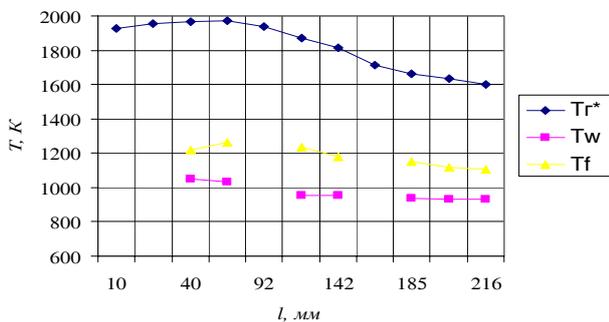
Конструктивная схема камеры сгорания ТРДД показана на рис. 3, соответствующая ей расчетная схема приведена на рис. 4.

Для проведения газодинамического анализа было выбрано 11 расчетных сечений, из них для 7 сечений был введен модуль «Стенка». Расположение сечений диктовалось особенностями геометрии проточной части ка-



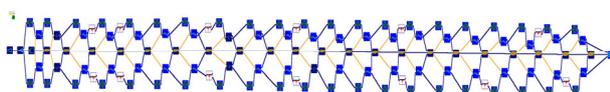
**Рис. 4.** Расчетная схема камеры сгорания ТРДД в системе «КАМЕРА 4.00»: 1 — начальные условия; 2 — диффузор; 3 — разделитель; 4 — фронтное устройство; 5, 11 — отверстия системы охлаждения; 6, 12 — кольцевые каналы; 7, 13 — основные отверстия; 8 — жаровая труба; 9, 14 — стенки; 10 — выходное сечение

меры и расположением отверстий (основных и системы охлаждения). Выбранный режим расчета обеспечивал подбор распределения расхода в разделителе между наружным кольцевым каналом, внутренним кольцевым каналом и фронтным устройством для полного перехода воздуха из кольцевых каналов в жаровую трубу к последнему расчетному сечению. Результаты анализа теплового состояния стенок даны на рис. 5.



**Рис. 5.** Результаты расчета температуры стенок жаровой трубы камеры сгорания ТРДД ( $T_g^*$  — температура газа,  $T_w$  — температура стенок,  $T_f$  — температура пристеночного слоя)

Расчетная схема основной камеры ТРДДФ, сформированная из набора библиотеки элементов системы «КАМЕРА 4.00», используемых при решении задач комплексного анализа, представлена на рис. 6.

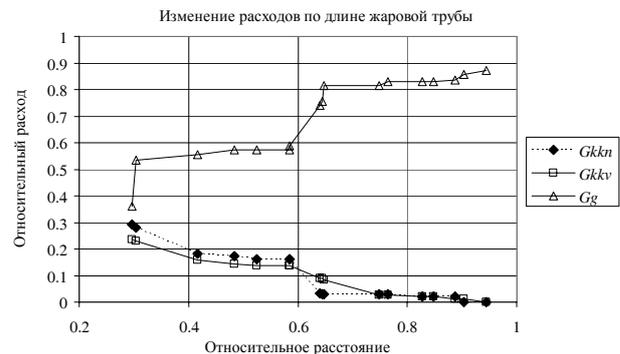


**Рис. 6**

В результате расчета были получены данные о газодинамических параметрах камеры (распределения расходов, давлений, скоростей, температура потока по длине жаровой

трубы) и о тепловом состоянии по шести сечениям наружного кольцевого канала и по семи сечениям внутреннего кольцевого канала.

Распределение расходов воздуха в кольцевых каналах ( $G_{kkn}$ ,  $G_{kkv}$  соответственно) и газа в жаровой трубе ( $G_g$ ) представлено на рис. 7 в зависимости от относительного расстояния до фронтного устройства.



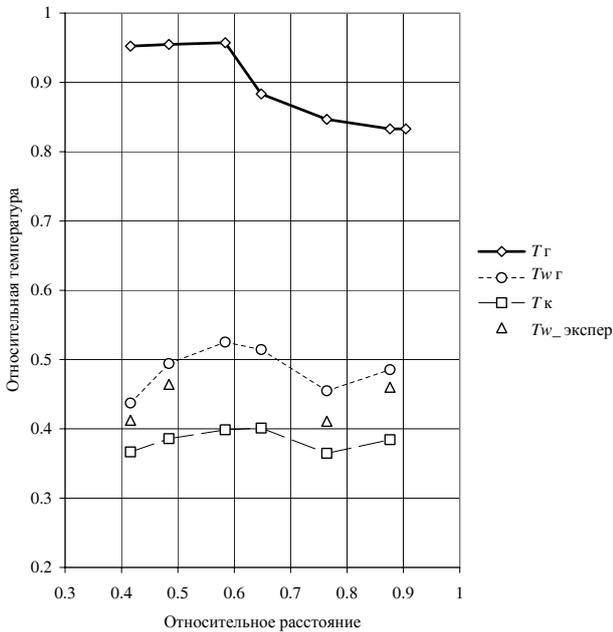
**Рис. 7.** Расчетное распределение расходов воздуха и газа в камере сгорания ТРДДФ

Результаты теплового расчета (температура газа в зоне горения  $T_g^*$ , температура стенок со стороны зоны горения  $T_w$ , температура корпуса  $T_k$ ), экспериментальные данные по температуре стенок жаровой трубы представлены на рис. 8.

Сравнение данных по температуре стенок с данными термометрирования показывает адекватность предложенной математической модели теплового состояния жаровой трубы и корпуса основной камеры сгорания.

Расхождение результатов расчетного анализа с имеющимися экспериментальными данными составило: по газодинамическим параметрам — 2...12%, по температурам стенок — 7...16%.

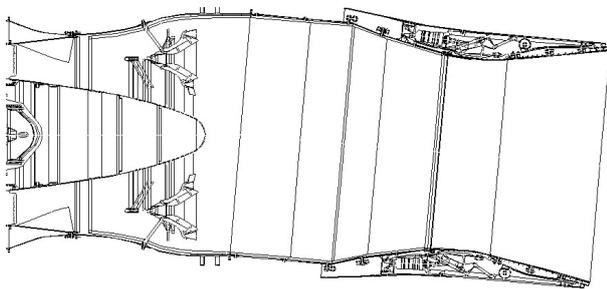
Система «Камера 4.00» внедрена в учебный процесс на кафедре авиационных двигателей УГАТУ.



**Рис. 8.** Распределение температур жаровой трубы и корпуса камеры сгорания двигателя ТРДДФ, полученное в системе «КАМЕРА 4.00» (сравнение с экспериментом)

## 2. ДВУХУРОВНЕВАЯ СИСТЕМА МОДЕЛИРОВАНИЯ ФОРСАЖНЫХ КАМЕР ВРД

Форсажная камера является частью многих современных воздушно-реактивных двигателей для сверхзвуковых боевых самолетов (рис. 9).



**Рис. 9.** Форсажная камера ТРДДФ

Ее рабочий процесс, по сравнению с основной камерой сгорания, отличается следующими особенностями:

- 1) высокая температура во всем рабочем объеме камеры,
- 2) более высокая скорость потока, более высокая температура и меньший уровень давлений на входе в камеру,

3) неравномерность параметров потока на входе, существенно возрастающая в двухконтурных двигателях,

4) низкое содержание кислорода в рабочем теле после газогенератора.

В этих условиях усложняется решение проблем предотвращения вибрационного горения, обеспечения требуемого уровня полноты сгорания и достаточной надежности конструкции.

На рис. 10 представлена схема процесса проектирования форсажной камеры.

Можно выделить три уровня проектирования, соответствующих рассмотренным этапам:

- предварительное проектирование (этап «Формирования облика»);
- детальное проектирование (этап «Детальный расчет»);
- трехмерное моделирование процессов (этап «Разработка окончательного варианта»).

Логика проектирования любого изделия формирует подход к процессу его моделирования и к организации соответствующих систем.

Исходя из этого, авторами была предложена двухуровневая система (программный комплекс) моделирования форсажных камер Afterburner на основе модульного подхода. Концепция создания данного программного комплекса подразумевает его интеграцию с системами пространственного моделирования для реализации третьего уровня проектирования. Программный комплекс Afterburner предназначен для решения следующих задач:

- 1) формирование облика форсажной камеры,
- 2) детальный расчет ее основных элементов,
- 3) расчетное определение диапазона устойчивой работы,
- 4) оптимизация геометрии элементов проточной части камеры,
- 5) оптимизация распределения топлива в окружном и радиальном направлениях.

Разрабатываемый программный комплекс состоит из двух систем — «Формирование облика» (1-й уровень) и «Детальный расчет» (2-й уровень).

Взаимодействие между системами разного уровня может быть организовано в зависимости от вида используемых библиотек. Рассмотрим, например, передачу данных из системы «Формирование облика» в систему «Де-

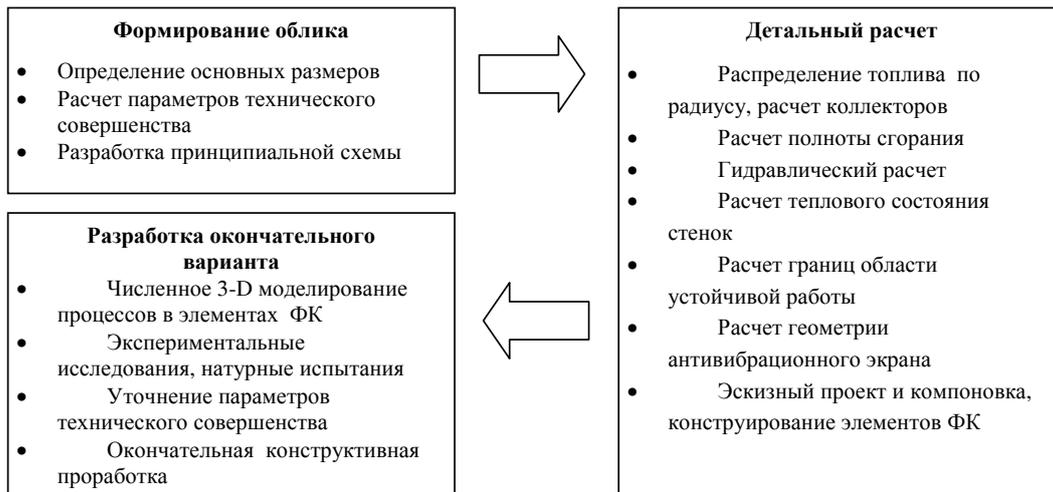


Рис. 10. Основные этапы проектирования форсажной камеры (ФК)

тальный расчет». Результатом работы системы формирования облика является геометрия проточной части проектируемой форсажной камеры. Предполагается несколько путей передачи геометрии:

- создание собственного формата графического файла, например, базы данных ключевых точек с помощью BDE или использование обычного текстового файла и языка, аналогичного HTML;
- организация взаимодействия с существующей САД-системой с помощью API-интерфейса, например, КОМПАС, AutoCad или Uni-graphics, что дополнительно обеспечивает возможность предварительной конструктивной проработки перед детальным расчетом;
- возможно совмещение двух методов — созданный файл базы данных считывается в САД-систему с помощью макроса, работающего в самой системе, при этом в имеющуюся параметрическую модель вводятся значения рассчитанных параметров.

В случае использования единой библиотеки, в процессе расчета в системе «Формирование облика» возможно определение и хранение геометрических параметров внутри модулей (общих для обеих систем) и их последующее использование в детальном расчете.

При разработке программного комплекса Afterburner определенное внимание уделяется организации взаимодействия между подсистемами на уровне детального анализа и системами трехмерного моделирования процессов в ФК. К таким системам относятся программные комплексы (ПК) вычислительной гидрогазодинамики (CFD). Применение ПК CFD целесообразно для решения широкого

круга задач в области форсажных камер, например:

- 1) Корректировка профиля проточной части диффузора, сформированного на этапе предварительного проектирования с точки зрения минимизации потерь полного давления.
- 2) Исследование характера течения в смесителе и оптимизация его геометрии.
- 3) Исследование течения в камере смешения, оптимизация геометрии фронтального устройства (размещение коллекторов и стабилизаторов).
- 4) Уточнение потерь полного давления в отдельных элементах ФК и в камере в целом.
- 5) Расчет распределения топлива по сечению ФК.
- 6) Расчет распределения газодинамических параметров в ФК без горения и с учетом выгорания форсажного топлива.
- 7) Оптимизация геометрических параметров экрана с целью достижения требуемого уровня его температуры при минимально возможном расходе воздуха на охлаждение.
- 8) Анализ газодинамических параметров в отдельных зонах фронтального устройства для оценки условий стабилизации процесса горения и области устойчивой работы ФК.
- 9) Исследование возможности возникновения вибрационного горения и оценка эффективности мероприятий по его подавлению.

Кроме того, использование трехмерного численного эксперимента позволит уточнить ряд эмпирических коэффициентов, применяемых в математических моделях первого и второго уровня проектирования.

Для моделирования элементов ФК совместно с ПК Afterburner возможно использование пакетов вычислительной гидрогазодинамики FlowVision (Россия) и ANSYS-CFX-Fluent (США).

### 3. СИСТЕМА «ФОРМИРОВАНИЕ ОБЛИКА»

Основной задачей системы формирования облика форсажной камеры является определение основных геометрических параметров камеры, выбор базовых схемных решений и предварительная оценка параметров технического совершенства.

На данном этапе форсажную камеру представляют в виде совокупности нескольких основных узлов (рис. 11).

Библиотека модулей для реализации этого уровня (рис. 12) состоит из следующих элементов: диффузор с плавной образующей, диффузор с внезапным расширением, смеситель кольцевой, смеситель лепестковый, коллекторы топливные (3 вида), система стабилизаторов (3 вида), воспламенитель, жаровая труба.

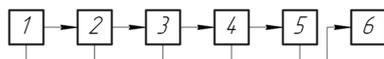


Рис. 11. Принципиальная схема форсажной камеры ТРДДФ

Руководствуясь схемой форсажной камеры, из модулей библиотеки собирают расчетную модель (пример приведен на рис. 13).

Связь между модулями обеспечивается информационным потоком, через который передаются газодинамические и геометрические параметры: полные и статические давления и температуры, расходы газа и воздуха, размеры входного сечения и несколько служебных переменных, которые могут передавать значения различных величин в зависимости от типа модуля. Система позволяет формировать разные варианты схем камеры. После составления расчетной схемы задаются входные данные для всех элементов, которые

берутся из компоновки двигателя и его термогазодинамического расчета.

Математические модели элементов построены на базе соотношений для характеристик этих элементов (например, коэффициентов потерь полного давления), полученных на основании уравнений газодинамики одномерных течений с использованием результатов анализа и обобщения экспериментальных и эксплуатационных данных по существующим форсажным камерам ТРДДФ. Некоторые аппроксимирующие зависимости уточнены по результатам численного 3-D моделирования газодинамических процессов в отдельных элементах.

Расчетную модель необходимо настроить в соответствии с решаемой задачей, задавая определенный закон расчета. Последний формирует различные ограничения, которые должны соблюдаться при проведении расчета (например, баланс расходов на входе и выходе), и предполагает задание варьируемых и поддерживаемых параметров. Для варьируемых параметров назначаются не конкретные величины, а диапазон возможных значений. Поддерживаемые параметры задаются в виде чисел или непрерывных функций, и процесс расчета продолжается до тех пор, пока их значения не будут отличаться от заданных на величину точности расчета. Таким образом обеспечивается возможность параметрической оптимизации любых выходных параметров на основе подбора любых входных, при этом необходим контроль за физическим правдоподобием рассчитываемых значений.

Разработанная система «Формирование облика» была протестирована при решении задачи воспроизведения облика форсажной камеры одного из отечественных ТРДДФ; расхождение результатов с данными реальной камеры составило 8–17%.

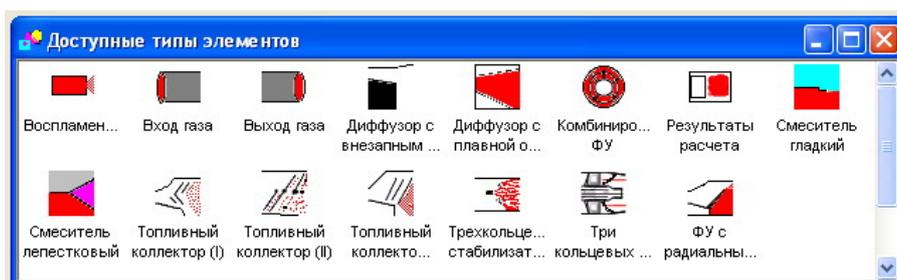


Рис. 12. Библиотека элементов системы «Формирование облика ФК»

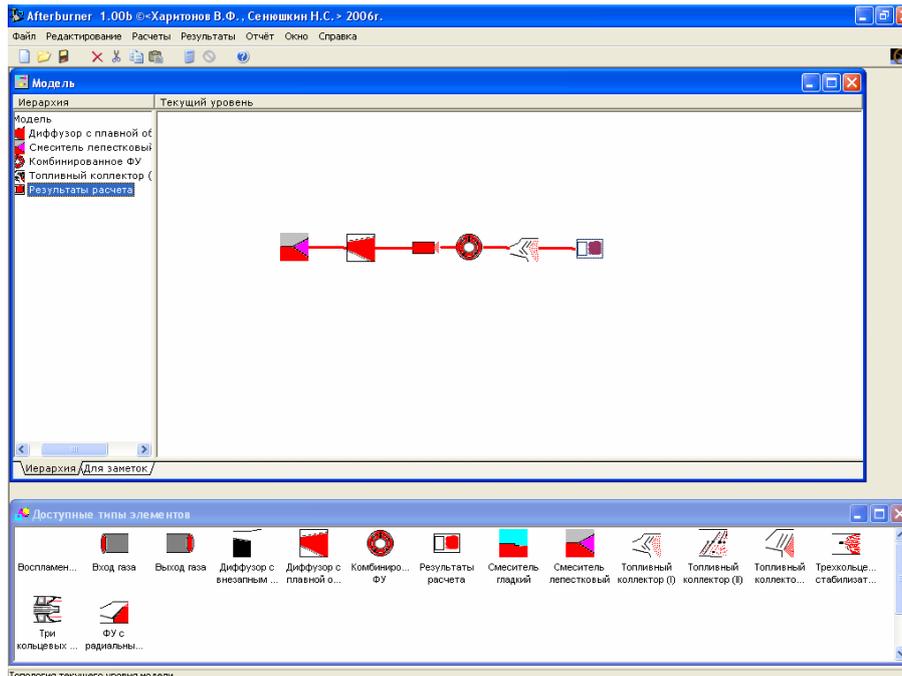


Рис. 13. Общий вид окна системы «Формирование облика ФК»



Рис. 14. Библиотека элементов подсистемы «Газодинамика и тепловое состояние»

#### 4. СИСТЕМА «ДЕТАЛЬНЫЙ РАСЧЕТ»

После формирования облика ФК и ее предварительной конструктивной компоновки совместно с турбиной и реактивным соплом выполняется детальный расчет форсажной камеры.

Перечень решаемых задач для системы детального расчета гораздо шире, а требования к точности результатов существенно выше. На данном этапе осуществляется:

- газодинамический анализ элементов проточной части с использованием одномерных и квазидвумерных моделей. В результате этого анализа помимо определения температур, скоростей, давлений, расходов должны быть уточнены значения коэффициентов сохранения полного давления;
- оптимизация геометрии смесителя с целью увеличения полноты сгорания;
- расчет распределения топлива по коллекторам с последующим расчетом распределения топлива по сечению камеры;

- расчет полноты сгорания с учетом имеющегося распределения топлива;
- оптимизация распределения топлива с целью получения требуемой полноты сгорания;
- анализ теплового состояния стенок (экранов, корпуса, кожуха);
- оптимизация геометрии тракта охлаждения и тепловых экранов с целью достижения возможно меньших температур корпуса и экранов;
- расчет диапазона устойчивой работы форсажной камеры;
- расчет антивибрационных экранов;
- расчетная оценка параметров пускового воспламенителя;
- уточненная оценка габарито-массовых характеристик.

В соответствии с перечнем решаемых задач система «Детальный расчет» состоит из нескольких подсистем.

Рассмотрим для примера подсистему «Газодинамика и тепловое состояние», предна-

значенную для газодинамического расчета ФК и анализа теплового состояния ее стенок. Библиотека элементов этой подсистемы (рис. 14) включает следующие модули: начальные условия, вход газа, канал смесителя, камера смешения, диффузор, диффузор с внезапным расширением, фронтное устройство (4 вида), антивибрационный экран, теплозащитный экран, секционный экран, тракт охлаждения, камера сгорания, разделитель, выходное сечение.

В качестве математических моделей элементов использованы одномерные уравнения, полученные на основании законов сохранения массы, энергии, импульса потока рабочего тела, а также уравнений теплового баланса. Многие коэффициенты в этих уравнениях получены при обобщении результатов модельных и натуральных физических экспериментов.

Из набора элементов библиотеки формируется расчетная модель. Количество расчетных сечений определяется аналогично системе «КАМЕРА-4.00» и зависит от конструкции ФК и ее элементов, а также от необходимой точности расчета. На рис. 15 представлена расчетная модель форсажной камеры ВРД, изображенной на рис. 9.

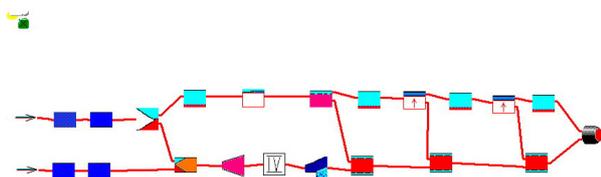


Рис. 15. Расчетная модель ФК ТРДДФ в подсистеме «Газодинамика и тепловое состояние»

Разработанная подсистема позволяет оценить газодинамические параметры ФК по всей ее длине, температурное состояние стенок корпуса и экранов, характеризующее прочностную надежность конструкции. Кроме того, подсистема «Газодинамика и тепловое состояние» на этапе детального проектирования ФК дает возможность более точно оценить влияние параметров форсажной камеры на параметры двигателя в целом (в том числе на потери полного давления по тракту на форсированном и максимальном режимах, на удельный расход топлива).

Программный комплекс Afterburner предполагается применять на этапе эскизного проектирования для более эффективной и глубо-

кой проработки различных вариантов узла с целью уменьшения времени и затрат на экспериментальную доводку.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, что модульный метод является приемлемой основой для разработки как междисциплинарных, так и многоуровневых систем моделирования камер сгорания воздушно-реактивных двигателей. По сравнению с другими методами он отличается достаточной гибкостью, экономичностью, универсальностью. Последующие исследования, связанные с развитием этого метода, необходимо посвятить разработке эффективных инструментов взаимодействия с системами пространственного анализа рабочего процесса, что позволит создать сквозную систему трехуровневого моделирования камер сгорания.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Харитонов, В. Ф. Газодинамическое моделирование камер сгорания ГТД на основе модульного метода / В. Ф. Харитонов, А. В. Коновалова // Вестник УГАТУ. 2003. Т. 4, № 1. С. 55–63.
2. Лефевр, А. Процессы в камерах сгорания ГТД / А. Лефевр. М.: Мир, 1986. 568 с.

## ОБ АВТОРАХ

**Харитонов Валерий Федорович**, доц. каф. авиац. двиг. Дипл. инж.-механик по авиац. двиг. (УАИ, 1971). Канд. техн. наук по тепл. двигателям летательн. аппаратов (МАТИ им. К. Э. Циолковского, 1978). Иссл. в обл. моделирования и проектирования камер сгорания ГТД.



**Сенюшкин Николай Сергеевич**, асп. каф. авиац. двигателей, м.н.с. НИЛ САПР-Д. Дипл. инж. по авиац. двигателям и энергоустановкам (УГАТУ, 2005). Иссл. в обл. моделирования и проектирования камер сгорания ГТД.

