

непрерывно 6000 с, а на ракетном режиме, модельный КВРД наработал в сумме 200 с.

Анализ полученных основных параметров показал, что полноразмерный прототип модели КВРД позволит удовлетворить требования разработчиков аэро - космической техники при создании перспективных ЛА горизонтального старта.

На модели КВРД перевод УКН из положения ЭУРТ в положение КС с соплом Лавалья выполняется в ручном режиме, а на полноразмерной силовой установке данная операция может осуществляться с помощью гидравлических приводов, шариковинтовой системы с приводом от электродвигателя или другими способами. Процесс сдвигания не представляет серьезных технических

трудностей, так как схожие по конструкции сдвигаемые насадки используются в аэрокосмической технике более 30 лет.

Таким образом, результатами огневых испытаний модели КВРД в основном подтверждены заданные технические требования.

В итоге, проведенные экспериментальные исследования подтвердили возможность создания полноразмерного комбинированного воздушно - ракетного двигателя состоящего из пульсирующей камеры сгорания и универсального комбинированного насадка, предназначенного для работы как в атмосфере, так и в безвоздушном пространстве.

УДК 629.7.036.33(075.8)

## КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ ВИРТУАЛЬНОЙ ЛАБОРАТОРИИ ИСПЫТАНИЙ ГТД

Рыбаков В.Н., Кузьмичёв В.С., Ткаченко А.Ю.

Самарский государственный аэрокосмический университет

### CONCEPT OF CONSTRUCTION OF VIRTUAL LAB FOR GAS TURBINE ENGINE TESTING

*Rybakov V.N., Kuzmichev V.S., Tkachenko A.Y. Concept of construction of virtual lab for gas turbine engine testing is described. Virtual lab for gas turbine engine testing is one of components of gas turbine engine mathematical model and it provides possibility for engine testing and determination of its performance parameters.*

В настоящее время одним из приоритетных направлений в разработке авиационных двигателей является создание виртуальной модели ГТД, которая охватывает весь жизненный цикл двигателя. Одним из этапов жизненного цикла двигателя являются его испытания. При разработке современных авиационных двигателей из-за невозможности получения полностью адекватных их моделей большая часть всех возникающих проблем решаются при помощи испытаний. Виртуальная лаборатория испытаний ГТД предназначена для реализации данного этапа жизненного цикла двигателя и является составной частью его виртуальной модели.

Проведение физических экспериментов по испытаниям авиационных ГТД – трудо-

емкий и дорогостоящий процесс, что значительно снижает количество необходимых испытаний. В связи с этим целесообразно сочетать натурные испытания ГТД с имитацией их испытаний на ЭВМ. Это позволит сократить объём испытаний, затраты на эксплуатацию стенда, а в процессе обучения существенно расширить количество потенциальных лабораторных работ и, таким образом, повысить качество подготовки специалистов.

Виртуальная лаборатория испытаний ГТД предназначена для имитации испытаний по определению основных эксплуатационных характеристик двигателей (дроссельных, скоростных, высотных и климатических).

Моделирование авиационных двигателей в виртуальной лаборатории испытаний ГТД основывается на автоматизированной CAE-системе АСТРА, разработанной в СГАУ. С её помощью реализованы модели 16-ти типов и схем ГТД.

В состав виртуальной лаборатории входят следующие основные компоненты (рис.1): подсистема математического моделирования ГТД АСТРА; подсистема планирования эксперимента; подсистема имитации погрешностей измерений; подсистема идентификации математической модели; подсистема документирования; подсистема визуализации процесса испытаний; информационная подсистема.



Рис. 1. Структура виртуальной лаборатории

Подсистема планирования эксперимента предназначена для проведения виртуального эксперимента по нескольким планам: полный факторный эксперимент, дробный факторный эксперимент, центральное композиционное планирование эксперимента (ортогональное и ротатабельное). Например, при проведении эксперимента по получению высотно-скоростных характеристик применяют ротатабельный центрально-композиционный план 2-го порядка, включающий 15 опытов при различных сочетаниях факторов высоты  $H$ , скорости полета  $M$  и частоты вращения ротора  $n$ . Это позволяет уменьшить объём испытаний примерно в 3 раза.

Подсистема имитации измерений позволяет вносить в расчетные величины случайную погрешность измерения  $\delta$  и отклонение параметров испытываемого двигателя от проектных значений  $\Delta$ , имитирующее индивидуальные особенности каждого конкретного экземпляра двигателя, которые возникают при его изготовлении (например, погрешности изготовления лопаток, сборки ротора, камеры сгорания и т.п.).

Схема моделирования погрешности измерений и отклонений представлена на рис. 2.

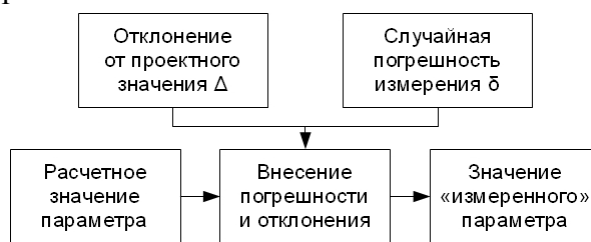


Рис. 2. Схема имитации погрешностей измерений и отклонений

Подсистема идентификации математической модели. В настоящее время в практике создания двигателя чаще всего используются математические модели первого уровня. Это система нелинейных уравнений, описывающая рабочий процесс и совместную работу узлов двигателя и связывающая параметры двигателя  $P$  с параметрами его узлов  $Q$  и входными воздействиями  $X$  (внешними условиями и режимом работы):

$$P = f(Q, X).$$

Идентификация такой математической модели заключается в уточнении оценок параметров узлов  $Q$  по значениям

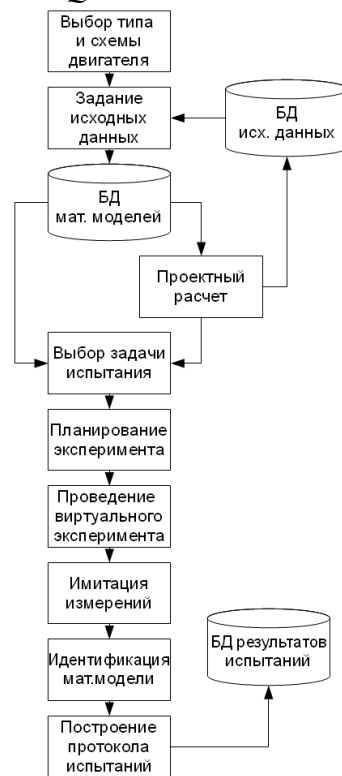


Рис. 3. Схема алгоритма работы виртуальной лаборатории испытаний ГТД

параметров двигателя  $P$ , определенным в результате испытания.

В итоге формируется индивидуальная математическая модель исследуемого двигателя, согласованная с экспериментальными данными.

*Подсистема документирования* предназначена для составления протоколов испытаний и построения характеристик двигателя.

*Подсистема визуализации процесса испытаний* обеспечивает мультимедийную (графическую и звуковую) имитацию испытаний - шум двигателя, имитацию движения

рабочего тела по проточной части двигателя, графическое отображение измеряемых параметров и т.д.

*Информационная подсистема* предназначена для хранения исходных данных и результатов экспериментов в виде базы данных. Это позволяет использовать исходные данные и результаты проведенного ранее эксперимента или же провести эксперимент заново по уже использованной ранее модели ГТД.

Схема алгоритма работы виртуальной лаборатории испытаний ГТД представлена на рис. 3.

УДК 628.438

## **АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ТЕРМОГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА И АНАЛИЗА (АСТРА-4) ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

Ткаченко А.Ю., Кузьмичёв В.С., Кулагин В.В., Крупенич И.Н., Рыбаков В.Н.

Самарский государственный аэрокосмический университет

### **COMPUTER-AIDED SYSTEM OF GAS TURBINE ENGINES AND POWERPLANTS THERMOGASDYNAMIC DESIGN AND ANALYSIS (ASTRA-4)**

*Tkachenko A.Y., Kuzmichev V.S., Kulagin V.V., Krupenich I.N., Rybakov V.N. Multipurpose computer-aided system of gas turbine engines and powerplants thermogasdynamic design and analysis is described. This system is an integrated environment for joint resolution of initial stage of engine designing tasks.*

В современных условиях создание высокоэффективных газотурбинных двигателей для авиационной техники и энергетической промышленности невозможно без широкого применения математического моделирования и разработки универсальных моделей, позволяющих в комплексе решать задачи начального этапа проектирования двигателей.

На кафедре теории двигателей СГАУ разработана универсальная автоматизированная система термогазодинамического расчета и анализа (АСТРА-4) газотурбинных двигателей и энергетических установок, представляющая собой интегрированную среду для совместного решения всего круга задач начального этапа проектирования двигателей.

Основной целью разработки системы является повышение эффективности, сокращение времени создания двигателя и уменьшение стоимости его жизненного цикла.

Формирование математической модели исследуемого объекта и решаемой задачи в автоматизированной системе АСТРА-4 осуществляется по универсальным принципам. Математическая модель исследуемого объекта представляется в виде совокупности модулей расчета типовых элементов, которые взаимодействуют между собой путем передачи значений параметров. Математическая модель решаемой задачи формируется путем добавления к модели объекта модулей операций, которые осуществляют автоматическое определение последова-