

УДК 621.6.05

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРИ СОЗДАНИИ ГТД С ПОНИЖЕННЫМ УРОВНЕМ ВЫБРОСОВ ОКИСЛОВ АЗОТА

© 2008 С. А. Гулина², М. Ю. Орлов¹, Д. А. Угланов¹

¹Самарский государственный аэрокосмический университет

²Уральский государственный технический университет

Рассматриваются пути использования автоматизации проектирования ГТД и ГТУ с пониженным выбросом окислов азота.

Автоматизация проектирования, прогнозирование выбросов, оптимизация параметров

Автоматизация проектирования сложных изделий, к которым относятся ГТД и ГТУ, в последнее время прочно вошла в практику конструкторских бюро и проектных организаций. Условно различные периоды ее внедрения в проектные работы можно разбить на следующие этапы. На первом этапе компьютерная техника в основном использовалась для составления рабочих и технологических чертежей в целях упрощения внесения изменений и хранения информации. На втором этапе компьютерные программы стали широко использоваться в целях выполнения прочностных расчетов (например, дисков и лопаток турбин). В последнее время, которое можно обозначить как третий этап, компьютерное проектирование при создании ГТД начинает все активнее использоваться для выполнения расчетов газовых течений, полей температур, распределения топлива и воздуха по объемам камеры сгорания и т.д. Рост актуальности компьютерного проектирования нашел отражение в том, что в связи с расширением сферы автоматизации проектирования в ЦИАМе отдел автоматизации проектирования был выделен в самостоятельное подразделение из состава Вычислительного центра с целью концентрации усилий на разработке и внедрении современных компьютерных технологий в процессы проектирования ГТД. Характерными особенностями современных методов создания ГТД и ГТУ являются: проектирование в трехмерном представлении и обеспечение информационной поддержки на всех стадиях жизненного цикла изделия.

Разработке современных и перспективных ГТУ наземного применения сопутствует необходимость решения ряда актуальных проблем. Одной из главных проблем является создание малотоксичных камер сгорания, которые наряду с высокими экономическими и эксплуатационными показателями должны иметь минимальные выбросы вредных веществ, в частности, оксидов азота.

В настоящее время одним из основных путей решения этой проблемы является разработка камер сгорания с организацией сжигания предварительно перемешанных топливовоздушных смесей с коэффициентом избытка воздуха в зоне горения $\alpha_1 = 1,9 \dots 2,5$. Этот способ организации рабочего процесса на современных ГТУ позволил достичь уровня концентраций оксидов азота на рабочих режимах менее $10 \dots 25 \text{ млн}^{-1}$. Вместе с тем, использование сжигания «бедных» гомогенных топливовоздушных смесей создает другие проблемы, связанные, например, с обеспечением надежной эксплуатации. Это несколько осложняет доводку установок и решается за счет использования современных методов расчета и наработок отдельных фирм в данной области. Современные методы расчета и использование для их реализации САЕ-систем позволяют обеспечить устойчивое горение «бедных» топливовоздушных смесей без срыва пламени, его проскоков и пульсации давления, а также достичь минимальных концентраций токсичных продуктов сгорания, в том числе и на переменных режимах работы ГТУ.

В настоящее время считается, что использование современных методов органи-

зации рабочего процесса практически не позволяет достичь дополнительного существенного снижения уровня выбросов окислов азота. Следовательно, необходимо использование различных новых технологий. К ним, например, относится использование катализаторов в процессе сжигания топлив в камерах сгорания. Это позволяет значительно снизить концентрации NO_x , CO и HC в выхлопных газах (ниже 10 ppm). Проблема данного подхода заключается в том, что к катализаторам, используемым в камерах сгорания газовых турбин, предъявляются жесткие требования с точки зрения высокой активности, термостабильности (до 1100...1400 °С) и устойчивости к перепадам температур, возможности работы при повышенных давлениях и высоких скоростях газового потока (до 50 м/с). В связи с этим приходится использовать катализаторы на основе благородных металлов, что повышает стоимость ГТУ. В настоящее время работы в этой области привели к созданию катализаторов на основе сотовых конструкций с напыляемыми материалами. Данные работы не могли бы быть успешно завершены без использования современных методов расчета с помощью компьютеров. В частности, для создания трехмерных моделей катализаторов могут использоваться специальные пакеты программ, обеспечивающие расчеты на прочность при изменении температурного состояния катализатора и т.д.

Работы по снижению выбросов окислов азота зачастую осложняются тем, что параллельно требуется обеспечивать снижение других токсичных составляющих выбросов, например CO . Из-за отсутствия достоверных расчетных методов для этого в настоящее время приходится выполнять экспериментальные исследования. Таким образом, возникает задача многопараметрической и многокритериальной оптимизации камеры сгорания в условиях жестких ограничений на эксперименты (10 опытов и менее). Данную задачу оптимизации приходится решать за счет разработки специальных методических подходов. В частности, может быть использовано компьютерное моделирование с целью оптимизации уровня выбросов по отдельным параметрам. Такое решение позволяет выявить взаимосвязи

уровня выбросов вредных веществ с конструктивными параметрами конкретных камер сгорания. Это позволяет упростить процесс поиска компромиссных решений, позволяющих существенно улучшить экологические характеристики на основе минимальных доработок конструкции.

Остается актуальной и проблема снижения выбросов окислов азота для авиационных ГТД. Первые попытки создания моделей процесса горения в камере сгорания ГТД, позволяющих прогнозировать характеристики выбросов, были сделаны применительно именно к выбросу NO [1] в 80-х годах прошлого столетия. Исследования показали, что качественная модель должна учитывать сложную структуру потока и кинетику важнейших химических реакций, происходящих в объеме камеры сгорания. Поскольку кинетика процессов образования загрязняющих веществ в то время не была достаточно изучена, разработанные модели в основном позволяли только качественно отслеживать изменение выбросов в зависимости от различных параметров. В настоящее время процесс образования собственно окислов азота достаточно изучен, выделено четыре основных механизма образования NO_x при горении углеводородных топлив: термический Зельдовича, «быстрый», с образованием N_2O как промежуточного вещества и высвобождения химически связанного с топливом азота. Перечисленные механизмы каждый по-своему влияют на процесс образования окислов азота в камере сгорания. Степень их влияния также различна. Тем не менее, проведенные исследования позволили выявить ряд закономерностей. Так было показано, что наиболее эффективно с целью уменьшения содержания NO_x - обеднение ТВС в зоне горения, поскольку при этом снижается равновесная концентрация и увеличивается период задержки образования окислов азота [2].

Важный вклад в описание процесса горения был внесен специалистами ЦИАМ. Известно, что в камере сгорания, где относительный уровень турбулентности достигает 50...100 %, смешение топлива с воздухом, а следовательно и горение, практически полностью определяется турбулентностью. В.Р. Кузнецов разработал теорию турбу-

лентного горения, в основе которой лежит физически обоснованное предположение о тонкой зоне горения. Эта идея позволила математически строго разделить область применимости уравнений газодинамики и уравнений кинетики. Благодаря этому стал возможен расчет трехмерного горения с учетом сотен реакций между многими десятками химических компонент. В [3] приведен пример, демонстрирующий возможности предложенных моделей турбулентности и тонкой зоны турбулентного горения применительно к расчету процессов в камере сгорания авиационного типа, предназначенной для стационарной энергетической установки, работающей на метане. Расчет был ориентирован на оптимизацию выбросов окислов азота NO_x . В нем учитывались все известные механизмы их образования и, в первую очередь, механизм Зельдовича и «быстрый» ("prompt"). Расчет позволил установить влияние перераспределения подвода воздуха по длине камеры на образование окислов азота. Результаты расчета были приведены в виде полей температур и скоростей образования NO_x для двух вариантов конструкции камеры сгорания: стандартного и с увеличенным подводом воздуха в головной части камеры через дополнительный ряд отверстий. Было показано, что в результате модификации сократился объем высокотемпературных зон, что позволило уменьшить выбросы NO_x на 30...40 %.

В последнее время для решения ряда проектных задач, связанных с компьютерным проектированием ГТД и ГТУ, стал использоваться программный комплекс FLUENT, предназначенный для решения задач механики жидкостей и газов, с 2006 года входящий в состав программного комплекса ANSYS. FLUENT использует неструктурированную сеточную технологию (типы элементов - гексаэдры, тетраэдры, призмы и пирамиды). Адаптация расчетной сетки позволяет получить точное решение для областей с большими градиентами потока, например, для пограничных слоев. Во FLUENT включены ламинарные и турбулентные модели гидродинамики, теплопередачи, фазовых переходов и радиации, а также модели

для расчета кавитации, сжимаемых жидкостей, теплообмена, теплопроводности, реальных газов, а также модуль для расчета влажного пара. Особенно важно, что FLUENT является в настоящее время признанным лидером при расчете химических реакций и задач горения. Его база данных содержит свойства множества газообразных, твердых, пылеугольных и жидких топливных материалов, а также модели для прогнозирования образования NO_x . FLUENT – также один из лучших пакетов в области многофазного моделирования. Постпроцессор FLUENT позволяет отображать результаты расчета в векторном и контурном видах, а также отображать траектории движения отдельных частиц. Встроенный модуль создания анимаций позволяет представлять результаты нестационарных расчетов.

Таким образом, можно выделить следующие направления использования компьютерных технологий при проектировании современных двигателей. При проведении проектно-конструкторских работ современные компьютерные технологии применяются для решения таких задач, как тепловые и прочностные расчеты (ANSYS, NASTRAN), расчеты газодинамики и процессов горения (STAR-CD, Flower, Phoenix), трехмерное моделирование (UNIGRAPHICS) и подготовка чертежной документации (Autocad). Данные пакеты позволяют обеспечить выполнение стандартов системы качества ИСО 9000.

Библиографический список

1. Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД / Пер. с англ.-М.: Мир, 1986. - 566с.
2. Гриценко Е. А., Данильченко В. П., Лукачев С. В. и др. Некоторые вопросы проектирования авиационных газотурбинных двигателей. - Самара: СНЦ РАН, 2002.-527 с.
3. Скибин В., Крайко А., Блинник Б. и др. Математическое моделирование-ключ к созданию двигателей // В журнале «Двигатель». - М . ООО Редакция журнала "Двигатель". - №3. 1999.- С.28-30.

References

1. Lefevre A. Combustion Chamber Processes in Gas Turbine Engines. Transl. from English. Moscow: "Mir", 1986.
2. Gricenko E.A., Danilchenko V.P., Lukachev S.P. et al. "Some issues of aircraft gas turbine engines designing". Samara: "SSC RAS". 2002.
3. Skibin V., Kraiko A., Blinnik B. et al. "Mathematical Modelling – Key to the Engine Designing". "Engine" №3. Moscow: "Engines Magazine Editing Office Ltd", 1999

THE USING OF COMPUTATIONAL MODELING FOR DESIGN OF GAS TURBINE ENGINES WITH DECREASED BLOWOUT NITROGEN OXIDES

© 2008 S. A. Gulina², M. Y. Orlov¹, D. A. Uglanov¹

¹Samara State Aerospace University

²Ural State Technical University

In this paper it is shown the ways of automatization using in design process of new gas turbine engines with decreased blowout nitrogen oxides.

Design automation, emission prediction, parameter optimization.

Информация об авторах

Орлов Михаил Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплотехника и тепловые двигатели» Самарского государственного аэрокосмического университета. Тел. (846)3351812, факс (846) 3345613, E-mail: teplotex_ssau@bk.ru. Область научных интересов: Процессы горения, двигатели внутреннего сгорания, процессы тепло- массообмена и диффузии, CALS-технологии.

Гулина Светлана Анатольевна, старший преподаватель кафедры "Оборудование и эксплуатация газопроводов" Уральского государственного технического университета. Тел. (8343) 8434841, факс (8343) 8434812, E-mail: kr_oeg@mail.ru. 624460, г. Краснотурьинск, ул. Ленина, 41, филиал Уральского государственного технического университета. Область научных интересов: Газотурбинный двигатель, проектирование, оптимизация, процессы тепло-массообмена и диффузии, CALS-технологии.

Угланов Дмитрий Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплотехника и тепловые двигатели» Самарского государственного аэрокосмического университета. Тел. (846)3351812, факс (846) 3345613, E-mail: dmitry.uglanov@mail.ru. Область научных интересов: Лазерные системы, системы охлаждения энергетических установок, гидродинамика закрученных струй, численное моделирование.

Orlov Michail Yurjevich, Candidate of Engineering Science – associate professor of SSAU "Heat Engineering and Heat Engines" department. Phone: 8 (846) 3345613; E-mail: teplotex_ssau@bk.ru. Area of research: combustion processes, internal combustion engines, diffusion and heat-mass exchange processes, CALS-methods.

Gulina Svetlana Anatoljevna, senior lecturer of Ural State Technological University "Gas Pipelines Equipment and operation" department. Phone: 8 (8343) 8434841, Fax: 8 (8343) 8434812. E-mail: kr_oeg@mail.ru. Contact Address: Branch of Ural State Technological University, Krasnotyrinsk town, Lenina Str. 41, ZIP Code 624460. Area of research: gas turbine engines, designing, optimization, diffusion and heat-mass exchange processes, CALS-methods.

Uglanov Dmitry Alexandrovich, Candidate of Engineering Science - associate professor of SSAU "Heat Engineering and Heat Engines" department. Phone: 8 (846) 3351812, Fax 8 (846) 3345613. E-mail: dmitry.uglanov@mail.ru Area of research: gas turbine engines.