

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

**Расчет образования CO и NO_x
в камерах сгорания ГТД**

Электронное учебное пособие

САМАРА

2012

УДК621.431.75(075)

ББК39.55

P248

Авторы: **Матвеев Сергей Геннадьевич,**
Лукачев Сергей Викторович,
Орлов Михаил Юрьевич,
Чечет Иван Викторович,
Анисимов Михаил Юрьевич,
Красовская Юлия Вячеславовна

Рецензенты: д-р техн. наук, профессор Ю.И. Цыбизов

д-р техн. наук, профессор Г.В. Смирнов

Расчет образования СО и NO_x в камерах сгорания ГТД [Электронный ресурс] : электрон. учеб. пособие / С. Г. Матвеев, С. В. Лукачев, М. Ю. Орлов, И. В. Чечет, Ю. В. Красовская; Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). - Электрон. текстовые и граф. дан. (1,07 Мбайт). - Самара, 2012. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

В учебном пособии рассмотрен метод расчета образования СО и NO_x в камерах сгорания ГТД с помощью современных CFD-пакетов. Даны представления по детальным кинетическим механизмам и формированию редуцированной кинетической схемы горения.

Данное пособие предназначено для студентов, обучающихся по специальности 160301.65 «Авиационные двигатели и энергетические установки» по дисциплинам: «Моделирование процессов в камере сгорания» в 8 семестре, «Теория процессов горения» в 6 семестре (ГОС-2); для студентов по специальности 160700.65 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей», по дисциплинам: «Моделирование процессов в камере сгорания» в 8 семестре, «Физико-химические основы процессов горения» в 6 семестре, «Численное моделирование процессов горения» в 8 семестре; для бакалавров направления подготовки 141100.62 «Энергетическое машиностроение» по дисциплине «Моделирование процессов горения» в 8 семестре (ФГОС-3).

Подготовлено на кафедре теплотехники и тепловых двигателей.

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2012

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	5
Глава 1 ОБРАЗОВАНИЕ СО И NO _x В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ ГТД	6
Глава 2 СОЗДАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ РАСЧЁТА ОБРАЗОВАНИЯ СО И NO _x В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ГТД	16
2.1 Создание трехмерной расчётной области камеры сгорания	16
2.2 Генерация трехмерной конечно-элементной модели для расчетной области камеры сгорания ГТД.....	19
Глава 3 ПОДГОТОВКА НЕОБХОДИМЫХ ДАННЫХ ДЛЯ РАСЧЁТА РЕАГИРУЮЩИХ ПОТОКОВ В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ ГТД	22
3.1 Выбор кинетического механизма описывающего процесс горения	24
3.2 Формирование термодинамических и транспортных данных	27
Глава 4 ПРОЦЕДУРА РАСЧЕТА В ПАКЕТЕ ANSYS FLUENT..	31
4.1 Настройка решателя	31
4.2 Выбор типа решателя	31
4.3 Задание свойств рабочего тела.....	32
4.4 Задание граничных условий.....	32
4.5 Обработка данных результатов расчета	33
4.6 Анализ результатов расчёта	36
Глава 5 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ «РАСЧЕТ ОБРАЗОВАНИЯ СО И NO _x В КС ГТД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ САЕ СИСТЕМ».....	37
Контрольные вопросы	38
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	39
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	40

ПРЕДИСЛОВИЕ

Увеличение объема авиаперевозок, а также дальности и высоты полета воздушных судов способствует увеличению вредного воздействия со стороны авиации на окружающую среду. В настоящее время доля авиации в общем антропогенном загрязнении составляет около 1%, но в окрестности больших аэропортов, где интенсивность воздушного движения чрезвычайно высока, может достигать 3-4% от общего объема выбросов в атмосферный воздух. Имеющаяся тенденция приводит к тому, что в последнее время все большее внимание уделяется снижению загрязнения атмосферы от авиационных двигателей. Эмиссия вредных выбросов нормируется Международной Организацией Гражданской Авиации (International Civil Aviation Organization – ИКАО) требования которой к экологическим характеристикам авиационных двигателей возрастают с каждым годом [1].

С учетом увеличивающегося объема применения наземных ГТУ, эта проблема представляется весьма актуальной. Рассмотрение рабочего процесса ГТД и ГТУ показывает, что основным узлом, определяющим экологические характеристики двигателей и энергетических установок этого типа, является камера сгорания. Таким образом, снижение вредных выбросов ГТД напрямую связано с разработкой перспективных и доработкой существующих камер сгорания с целью обеспечения ими уровня выброса токсичных веществ в пределах существующих нормативов. Выполнение этой работы невозможно без применения современных расчётных методик, в том числе и с использованием CAE-систем.

Данное пособие включает в себя изложение основных существующих подходов к расчётам CO и NO_x в камерах сгорания ГТД с использованием ANSYS Fluent.

Глава 1 ОБРАЗОВАНИЕ СО И NO_x В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ ГТД

В настоящее время все авиационные двигатели гражданской авиации должны соответствовать стандартам ИКАО, в которых содержатся нормы, ограничивающие эмиссию окиси углерода (СО), окислов азота (NO_x), несгоревших углеводородов (НС) и дыма (SN). Вместе с тем, исследования последних лет показали, что спектр выбрасываемых в атмосферу вредных веществ реактивными двигателями гораздо шире, чем установлено рамками ИКАО. Уровень выбросов вредных веществ сильно зависит от типа двигателя, его совершенства, размеров и от реального состава используемого топлива. Требования ИКАО к экологическим характеристикам авиационных двигателей возрастают с каждым годом [1, 2]. Так, с момента введения первых ограничения (САЕР/1) авиационного комитета по защите окружающей среды (1986 год), в них уже несколько раз вносились изменения. С первого января 2014 года вступит в силу стандарт (САЕР/8), которому на смену уже готовы более жесткие требования по снижению выбросов NO_x (к 2020 году на 40% по сравнению с (САЕР/2)). Аналогичная тенденция и по остальным загрязняющим веществам (СО, НС, SN).

Камера сгорания (КС), как один из основных узлов ГТД, играет существенную роль в обеспечении его экологических характеристик. Поэтому понимание механизмов образования вредных веществ и возможность прогнозирования их эмиссии на количественном уровне при изменении параметров рабочего процесса двигателя и внешних условий являются одними из ключевых вопросов обеспечения норм ИКАО. Решение этих вопросов позволяет оценить эмиссионные характеристики на этапе проектирования двигателей и разрабатывать эффективные методы предотвращения образования загрязняющих атмосферу веществ, а так же повысить эффективность сжигания топлив.

Основные трудности при создании камер сгорания с низким выбросом вредных веществ, связаны с тем обстоятельством, что для снижения выхода СО и NO_x необходимо проведение взаимно противоположных мероприятий. Рациональная конструкция камеры сгорания должна представлять собой некоторый компромисс между

требованиями, вытекающими из задачи уменьшения эмиссии этих двух групп загрязняющих компонентов. Это может быть обеспечено за счет совершенствования рабочего процесса первичной зоны, зон выгорания и смешения, рационального выбора объема жаровой трубы и времени пребывания в камере сгорания [3, 4, 5, 6]. Принцип действия всех малоэмиссионных КС основан на поддержании температуры в зоне (зонах) горения в достаточно узком интервале на всех эксплуатационных режимах двигателя (рис. 1).

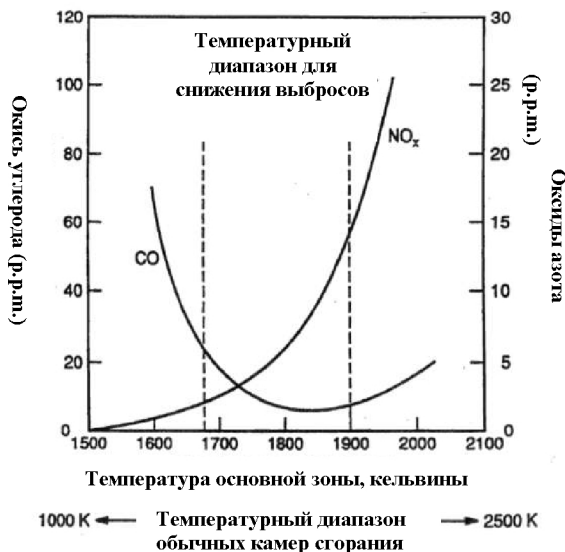


Рис. 1. Диапазон температур с малыми выбросами CO и NO_x [3]

Для снижения эмиссии вредных веществ необходима разработка камер сгорания сложной конструкции с увеличением числа зон горения, каждая из которых оптимизируется на определенный режим работы. При этом, для обеспечения перспективных норм на эмиссию вредных веществ, необходимо создание КС, которые бы позволили одновременно снизить все виды вредных компонентов.

Для более четкого представления о возможных путях снижения эмиссии вредных веществ КС ГТД, рассмотрим механизмы их образования.

Оксид углерода (CO) образуется вследствие:

- неполного сгорания топлива в сильно обедненных топливо-воздушных смесях (ТВС);

- наличия холодного пристеночного слоя в традиционной схеме заградительного охлаждения стенок жаровой трубы;

- нехватки кислорода при горении богатых смесей ($\alpha < 1,0$) (здесь $\alpha = G_B / (G_T \cdot L_0)$ - коэффициент избытка воздуха, где G_B и G_T - расходы воздуха и топлива соответственно, L_0 - стехиометрический коэффициент);

- диссоциации CO_2 при высоких температурах.

В первых двух случаях можно обеспечить эффективное снижение CO при условии правильной организации рабочего процесса в КС с доокислением CO в послепламенных зонах и использованием нетрадиционных систем охлаждения. Окисление CO идет относительно медленно, что является фактором, определяющим выбор времени пребывания (объема камеры), необходимого для завершения реакций.

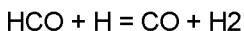
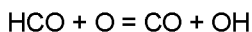
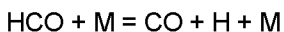
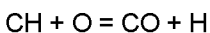
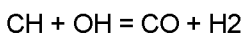
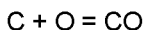
Основные методы снижения выброса CO основаны на представлениях о физико-химических закономерностях его образования:

- обеспечение состава смеси в зоне горения ближе к $\alpha = 1,1 \dots 1,3$;

- увеличение объема зоны горения и времени пребывания в ней [7].

Перечисленные методы снижения выбросов CO трудно реализовать в малоэмиссионных камерах сгорания, т.к. они ведут к резкому увеличению образования NO_x . Установлено, что только в очень узком диапазоне температур ($T_{\text{пл}}=1650 \dots 1900 \text{ K}$) можно одновременно добиться требуемых уровней выбросов NO_x и CO .

При моделировании выбросов CO в детальные кинетические механизмы обязательными к включению являются реакции вида:



Приведенные реакции показывают, что образование CO происходит за счет взаимодействия радикалов, которые содержатся в большом количестве во фронте пламени, а следовательно избежать их

образования невозможно. Снижение выбросов CO осуществимо лишь в послепламенной зоне за счет мероприятий рассмотренных выше.

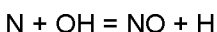
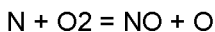
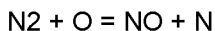
Оксиды азота (NO_x) образуются в результате окисления азота, находящегося в атмосферном воздухе и в топливе. Легкие дистиллятные топлива содержат небольшие количества органического азота (менее 0,06 %), в то время как тяжелые продукты перегонки могут содержать до 1,8 %. В последнем случае доля NO из топлива может составлять значительную часть в общем выбросе оксида азота [2, 8].

Процесс образования оксида азота эндотермичен и идет с заметной скоростью при температурах выше 1800 K, поэтому NO образуется только в горячих зонах и достигает максимальной концентрации на режиме наибольшей тяги. Окисление NO до NO_2 происходит при снижении температуры газа. Практический диапазон температуры газа, при которой образуется двуокись азота, составляет от 400 до 900 K. На режимах большой тяги доля NO_2 в оксидах азота NO_x очень мала, но на режиме малого газа она может достигать 50 %.

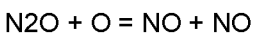
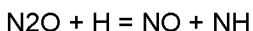
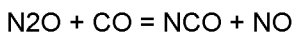
Установлено, что выброс NO_x экспоненциально возрастает с повышением температуры пламени и линейно возрастает с повышением времени пребывания продуктов сгорания в высокотемпературных зонах. Изменение давления от 0,5 до 3 МПа практически не влияет на уровень выброса NO_x .

При моделировании используют следующие основные механизмы образования оксидов азота [8]:

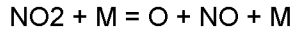
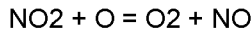
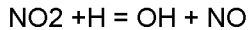
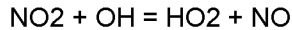
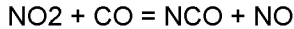
1. Термический механизм, который включает окисление N_2 кислородом по цепи механизма Зельдовича и взаимодействия атомов N с радикалами OH



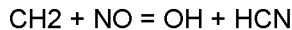
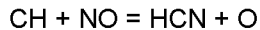
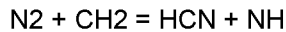
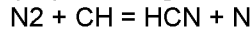
2. N_2O – механизм. Этот механизм определяется группой реакций, в которых N_2O выступает как промежуточное вещество при образовании NO



3. NO_2 – механизм, приводящий к образованию NO через следующие реакции



4. Механизм Фенимора (NO механизм). «Быстрые» оксиды азота образуются при горении топлива во фронте пламени в результате взаимодействия N_2 с радикалами CH и CH_2 , появляющимися при разрушении сложных молекул углеводородного горючего.



5. Недавно, было продемонстрировано, что реакции с веществами группы N_xH_y (например, N-N-H) и HNO могут также давать вклад в образование NO_x . Другими N-содержащими веществами, которые могут генерироваться при горении углеводородов с воздухом, являются HNO_2 , HNO_3 , HNO , элементы групп N_xH_y и HCN . Процессы, приводящие к образованию этих веществ, на сегодняшний день исследованы достаточно слабо.

Таким образом, современные детальные кинетические схемы, используемые для расчета эмиссии от камеры сгорания N-содержащих компонентов должны включать перечисленные механизмы образования этих веществ, которые в дальнейшем могут редуцироваться и использоваться при расчетах в САЕ-системах с достаточной для практических целей точностью.

Для снижения уровня эмиссии NO_x используются следующие подходы:

- реализация процесса горения жидкого топлива на малой длине жаровой трубы (ЖТ) с временем пребывания в зоне высоких температур (более 1920К) 5...6 миллисекунд и затем интенсивное охлаждение в зоне смешения, то есть используется принцип «быстро сжечь и быстро охладить»;

- горение топлива при температуре 1750 ± 50 К (то есть ниже 1920К), с формированием эпюры температур на выходе за счёт подвода воздуха в зоне смешения или из зоны фронтального устройства с исключением охлаждения продуктов сгорания.

Результаты анализа общего объёма разработок в направлении уменьшения выбросов вредных веществ, позволяют выделить следующие типовые технологии сжигания топлива в КС ГТД, удовлетворяющие существующим экологическим требованиям:

- *схема RQL*, горение обогащенной смеси с последующим быстрым подмешиванием воздуха и догоранием обедненной смеси (Reach Quench Lean);

- *схема LPP*, горение обедненной предварительно смешанной и испаренной смеси (Lean Premixed Prevaporized);

- *схема LDI*, горение с впрыском обедненной смеси непосредственно в зону горения (Lean Direct Injection).

- *схема горения в КС с изменяемой геометрией*;

- *схема горения в каталитической КС*.

В схемах LPP и LDI различны лишь способы подачи топлива, а суть основана на горении обедненной смеси.

Рассмотрим приведенные схемы подробнее.

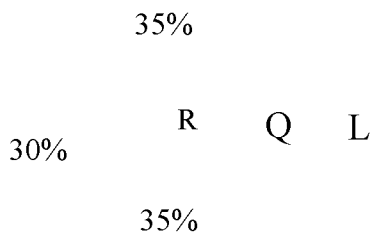


Рис. 2. Эскиз схемы горения RQL

Схема горения RQL. Современные малоэмиссионные КС, в большинстве своём следуют схеме горения обогащенной смеси, с последующим быстрым подмешиванием воздуха и догоранием обедненной смеси. Рассмотрим технологию RQL более подробно. Процесс горения этой схемы осуществляется в трёх последовательных стадиях. Вначале формируется горение богатой топливовоздушной смеси при $\alpha = 0,5 \dots 0,7$, при отсутствии свободного кислорода, затем следует стадия резкого смешения продуктов неполного сгорания топлива в «богатой» зоне (CO , CO_2 , H_2 , H_2O) с большим количеством ($\approx 70\%$) холодного воздуха. Одновременно происходит их охлаждение. В ней осуществляется быстрый ($\tau = 1 \dots 2$ мс) переход через стехиометрию из богатой топливовоздушной смеси

($\alpha = 0,5 \dots 0,7$) в «бедную» ($\alpha > 2,4$). Последняя стадия – горение бедной смеси (CO , H_2) + (O_2 , N_2). Эмиссия NO_x на выходе из камеры сгорания есть сумма различных концентраций NO_x , образующихся в каждой зоне горения. Наибольшая концентрация NO_x образуется в зоне резкого разбавления.

Задача получения низкого уровня концентрации NO_x при схеме RQL состоит в обеспечении закона выгорания диффузионного факела по длине жаровой трубы с температурой пламени, не превышающей температуры окисления азота ($\approx 1800 \text{ K}$).

Камеры сгорания с технологией RQL имеют преимущество перед КС, реализующими сжигание бедной ТВС – широкий диапазон устойчивой работы, отсутствие пульсационного горения при простой одноконтурной системе подачи топлива.

Схема горения LPP. Горение обедненной предварительно смешанной смеси и испаренной смеси воплощено в конструкции двухзонной КС. Её конструкция имеет наибольший потенциал в уменьшении выбросов NO_x по сравнению с другими конструкциями. Основная зона (ОЗ) на режимах больших тяг обеспечивает малые выбросы NO_x за счёт бедного состава смеси ($\alpha \approx 1,8$), при котором температура пламени поддерживается на низком уровне ($1800 \dots 1900 \text{ K}$). Дежурная зона (ДЗ) предназначена для обеспечения низкого уровня выбросов CO на режимах малого газа. При запуске и работе на низких режимах, топливо подается на форсунки дежурной зоны. При этом скорости воздуха в этой зоне небольшие и состав смеси близок к стехиометрии. Дежурная зона обеспечивает дежурное пламя для основной зоны. Из-за возможности проскока пламени и самовоспламенения, а также из-за сложности обеспечения устойчивого безрывного процесса горения на переходных режимах работы двигателя, осуществление способа разделения топлива по схеме LPP в конструкции КС обычно ограничивают. Современные КС работающие по схеме бедного горения обычно используют технологию LDI.

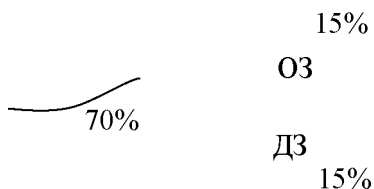


Рис. 3. Эскиз схемы горения LPP и LDI

Схема горения LDI. Горение с подачей обедненной смеси непосредственно в зону горения реализуется на основе традиционной конструкции КС, поэтому около 70% воздушных масс потока отбирается для подготовки бедной топливовоздушной смеси. Данная схема использует двухстадийную подачу топлива.

Стадийность подачи топлива осуществляется посредством концентрически расположенных форсунок (главная ступень), обдуваемых большим количеством воздуха, и вложенную в центр дежурную форсунку. Основные форсунки работают с обедненной смесью, а дежурная с богатой, что необходимо для работы двигателя на малой тяге и стабилизации горения главной ступени.

Необходимо отметить, что технология бедного горения в настоящее время только развивается, а традиционно оптимизируются технологии богатого горения.

Схема горения в каталитической КС. Схема горения в каталитической КС основана на принципе использования катализаторов, которые снижают температуру воспламенения топлива и вводятся в конструкцию ЖТ для того, чтобы сжигать топливо при $T_{пл} = 1200...1500$ К и получить снижение выбросов NO_x на порядок и более по сравнению с современными малотоксичными камерами (менее 5ppm). Жаровая труба имеет зону подготовки ТВС, зону каталитического горения и зону дожигания на выходе. Такие камеры исследуются и скоро будут широко внедряться, так как стоимость снижения выбросов NO_x здесь самая низкая [4].

Катализатор

Рис. 4. Эскиз схемы горения в каталитической камере

Схема горения в КС с изменяемой геометрией. Камеры с изменяемой геометрией могут работать, как по технологии бедного, так и богато-бедного горения. Обе схемы функционируют в узких пределах по значениям локальных коэффициентов избытка воздуха и при контроле уровня образования оксидов азота. В основном, изменяемая геометрия имеет различные пути обеспечения необходимого коэффициента избытка воздуха, в пределах диапазона требуемого для низкой эмиссии. Принцип работы состоит в стадийной подаче топлива в камеру для системы бедного горения и регулируя геометрией камеры (изменяя площади отверстий подвода вторичного воздуха или выходного сечения, или используя иные возможности) добиваются оптимальных параметров рабочего процесса.

Главным недостатком камеры с изменяемой геометрией является потребность в подвижных частях и действующих задвижек, способных выстоять при высокой температуре, что снижает надежность работы двигателя. Данная конструкция будет применима лишь в случае разработки принципиально новых материалов, отвечающих условиям надежности, лёгкости и цены.

Существует две основных наиболее распространенных модели, используемых при расчете процессов горения с целью определения вредных выбросов на основе кинетической схемы горения, это модель тонкого фронта пламени и реакторная модель.

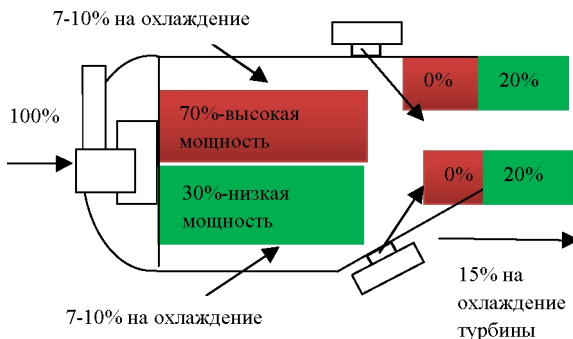


Рис. 5. Эскиз схемы горения в камере с изменяемой геометрией

Модель тонкого фронта пламени дает достаточно точное описание лишь для реакций, протекающих с высокой скоростью в области фронта пламени. Так как процессы образования основных загрязняющих веществ (CO , NO_x) протекают медленно, и это происходит непосредственно после прохождения фронта пламени, то описание процесса образования вредных выбросов моделью тонкого фронта пламени становится достаточно приближенным.

При использовании в расчётах реакторных моделей достигается более высокая точность описания эмиссии загрязняющих веществ. Сложность реакторной модели состоит в её не универсальности, так как для каждого типа камеры сгорания и режима ее работы разрабатывается своя модель. Суть реакторных моделей состоит в разбиении модели расчётной зоны камеры сгорания на области, каждой из которых приписывается своё среднее значение

восстановленной концентрации топлива Z ($Z = \frac{1}{1 + \alpha L}$, где α – интегральный коэффициент избытка воздуха в камере, L – стехиометрический коэффициент) и τ – время пребывания. Значения концентрации химических элементов передаются от одних реакторов к другим, формируя, таким образом, распределение элементов по всей области камеры сгорания [9].

Глава 2 СОЗДАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ РАСЧЁТА ОБРАЗОВАНИЯ СО И NO_x В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ГТД

Для расчёта выбросов NO_x и СО необходимо создать математическую модель протекающего в камере сгорания процесса. В общем случае она включает в себя геометрическую модель КС, созданную на её базе конечно-элементную модель с граничными условиями и математическое описание рассчитываемого процесса. При этом могут использоваться различные современные CAD/CAE – системы. В данном пособии рассматриваются:

- Siemens PLM NX для построения трехмерной модели камеры сгорания и создания её расчётной газодинамической области;
- ANSYS Mesher для наложения конечно-элементной сетки на расчётную газодинамическую область;
- ANSYS Fluent для расчёта газодинамического течения с учетом выбросов СО и NO_x, а так же, обработки полученных данных.

2.1 Создание трехмерной расчётной области камеры сгорания

Для построения трехмерной модели любого технического объекта необходимо иметь представление о его работе, особенностях геометрии, параметрах и т.д. На рис. 6, представлена модель камеры сгорания, которая является объектом исследования.

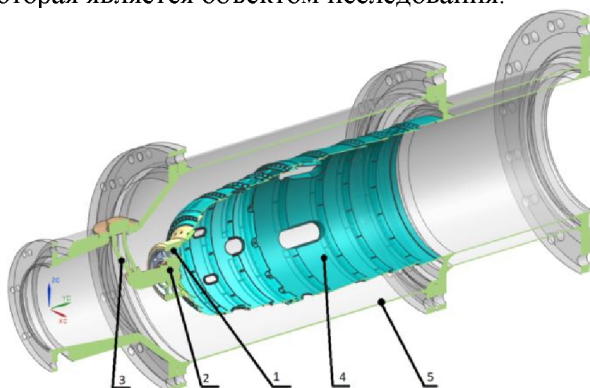


Рис. 6. Модель камеры сгорания

1 – воздушный завихритель, 2 – топливная форсунка, 3 - элементы топливной подачи, 4 - корпус жаровой трубы, 5 – корпус камеры сгорания

На вход камеры сгорания из компрессора подается сжатый воздух, который попадает в диффузор, снижающий его скорость и создающий два потока. Первый поток (центральный) проходит внутрь жаровой трубы через воздушный завихритель топливной форсунки, а второй поток направляется по кольцевым каналам между корпусом камеры и жаровой трубой. Из кольцевых каналов воздух через несколько рядов отверстий поступает внутрь жаровой трубы.

Топливо подаётся в жаровую трубу через форсунку. Непосредственно в горении топлива принимает участие только тот воздух, который проходит через воздушный завихритель и первые ряды крупных отверстий. Образовавшаяся в головной части жаровой трубы горючая смесь сгорает с формированием пространственно развитого и протяженного факела пламени, который занимает 30-60% от всей длины жаровой трубы.

Головная часть жаровой трубы с системой щелей и отверстий для подачи воздуха, вместе с форсунками образует фронтное устройство камеры сгорания, отвечающее за подготовку топливовоздушной смеси и стабилизацию горения. На выходе из КС горючие газы, расширяясь, создают давление на лопатках турбины, заставляя их вращаться [10].

Для моделирования физических явлений в КС ГТД, на первом этапе необходимо создание геометрической 3D-модели. Для этого необходим плоский эскиз, который может быть выполнен в каком-либо САД-пакете. Наличие электронного чертежа, в отличие от выполненного на бумаге позволяет гибко настраивать параметры создаваемой 3D-модели, которые могут быть изменены без создания полностью новой модели. При использовании параметризации перестроение трехмерной модели происходит автоматически. Электронный эскиз может быть создан на основе бумажных чертежей, если они выполнены с достаточной точностью и на них проставлены все необходимые размеры, или по натурному образцу. Второй способ является более трудоемким методом, так как точность данного метода зависит как от измерительного инструмента, так и от человеческого фактора.

Построение 3D модели камеры сгорания которую предстоит в дальнейшем рассчитать выполняем в пакете Siemens PLM NX. Построение модели камеры сгорания производится подетально,

впоследствии детали объединяются в общую модель. Так, отдельно создаются корпус камеры сгорания, втулка завихрителя, форсунка, система топливной подачи, корпус камеры сгорания. Для их создания применяются элементарные операции: вращения, втягивание, объединение (вычитание) тел.

После создания точной геометрической модели встает задача расчета. Для каждого конкретного типа задач необходима своя расчётная область. Например для расчета течения потока – внутренняя область течения без стенок, для сопряженных тепловых задач – область течения вместе с твердыми стенками.

При определении расчетной области в нашем случае создаются поверхности, ограничивающие вход и выход модели КС, а также выделяются внутренние поверхности внешнего корпуса камеры сгорания. Перечисленные поверхности должны образовывать замкнутый контур, который после операции «Сшивка» становится твердым телом. Далее из полученного тела вырезаются все внутренние компоненты: жаровая труба, форсунки, пистоны, воздушные карманы, крепежные элементы и т.д, таким образом для наших расчетов происходит выделение газодинамической области.

Основной проблемой, встречающейся при численных расчетах задач на ЭВМ, является нехватка вычислительных ресурсов машин. Поэтому для сокращения объема используемой памяти ЭВМ широко используется метод, в котором расчет проводится только для части расчетной области. Одним из требований к этой части расчетной области является ее периодичность относительно какой-либо оси или плоскости симметрии. То есть, имеет место ситуация сходная с тем, что ранее в стендовых условиях испытания проводились не для камер сгорания целиком, а для их отсеков.

Любую расчетную модель, состоящую из множества элементов, необходимо адаптировать под конкретные задачи. Это позволяет несколько упростить ее, удалив элементы, которые не определяют точность вычислений и в конечном итоге сэкономят не только память компьютера, но и время на расчет. Возможность упрощения геометрической модели напрямую определяется тем, какие цели и задачи ставит перед собой расчет камеры сгорания. Внутренние полости некоторых объектов, таких как топливные каналы форсунок или топливные коллекторы, не участвуют в расчетных процессах, а потому могут быть упрощены без последствий для результата.

Упрощения можно проводить как на геометрической модели, до определения газодинамической области, так и уже для полученной расчетной модели внутренней области [11].

2.2 Генерация трехмерной конечно-элементной модели для расчетной области камеры сгорания ГТД

Генерация конечно-элементной модели является одним из основных этапов, предшествующих проведению численного расчета в САЕ - системе, так как исходная твердотельная модель, построенная средствами CAD, сама по себе не позволяет выполнить расчет, который возможен только при наличии конечно-элементной модели, соответствующей не только геометрии объекта, но и рассматриваемому процессу. Основное назначение конечно-элементной модели – декомпозиция (разделение) расчетной области на подходящее количество подобластей, необходимое для получения точного результата расчёта. В общем случае существуют три стадии в построении конечно-элементной модели:

- задание характеристик элементов;
- установка необходимой дискретности сетки;
- построение узлов и элементов сетки.

После создания конечно-элементной модели необходимо проверить её качество, которое характеризует ее соответствие условиям решаемой задачи. Основными параметрами качества сетки являются:

- скошенность (Skewness);
- соотношение размеров (AspectRatio);
- изменение размеров элементов.

Скошенность является одним из самых основных показателей качества элементов конечно-элементной сетки и определяет отклонение формы элемента от идеальной.

Высокую скошенность использовать не рекомендуется. Обычно значение скошенности составляет не более 0,95. Имеется следующая классификация качества сетки по скошенности:

- 0-0,25 наилучшее;
- 0,25-0,5 очень хорошее;
- 0,5-0,8 хорошее;
- 0,8-0,95 приемлемое;
- 0,95-0,98 плохое;

0,98-1,0 неприемлемое.

Соотношение размеров элемента, определяется отношением размеров самой длинной стороны элемента к самой короткой стороне. Идеальное значение равно 1 (например, для квадрата).

Изменение размеров элементов определяется как отношение объема (или площади для 2D) элемента к объему соседнего.

Отрицательные элементы появляются, если расчетная область имеет вырожденные ячейки. Расчет задачи с отрицательными элементами невозможен.

На качество сетки оказывает влияние множество различных факторов, например: особенности геометрической модели, разрешающая способность сетки, типы методов и функций используемых при генерации сетки, наличие пограничного слоя.

Для расчетов в ANSYS Fluent к элементам конечно-элементной сетки предъявляются следующие требования по качеству:

- по *скошенности*, для шестигранников, трех и четырехугольников - скошенность не должна превышать 0,8, для четырехгранников – 0,9;
- по *соотношению сторон*, значение должно быть менее 40, но это предельное значение зависит от характеристик потока - так, например, для элементов пограничного слоя допускаются значения более 50;
- по изменению размера элемента - от 1 до 2.

Для повышения качества сетки используются следующие стратегии.

CAD очистка. Некоторые программные продукты содержат в себе инструментарий для очистки и упрощения геометрии и позволяют выполнять следующее:

- упрощение геометрии за счёт удаления мелких элементов и объектов, не влияющих на моделируемый процесс.
- объединение (если это возможно) объектов малой размерности,
- объединение поверхностей для уменьшения их количества;
- избегание узких поверхностей;
- удаление несущественных щелей и зазоров;
- декомпозиция геометрии в виде разделения сложной геометрии на несколько более простых с сохранением связи между ними;
- удаление ненужной геометрии;
- добавление геометрии.

Виртуальная топология. Один из самых эффективных методов упрощения геометрии, использующий создание виртуальной

топологии на базе геометрической модели (имеется не во всех пакетах).

Управление сгущением. Сгущение сетки позволяет разрешать мелкие объекты (небольшие линии или узкие поверхности).

Приведем основные рекомендации, когда объемная сетка неприемлема для расчета. Для этого она должна удовлетворять одному или более из следующих условий:

- очень высокая скошенность (>0.98);
- вырожденные элементы (скошенность около 1);
- отрицательные объемы.

Качество сетки может быть увеличено с помощью:

- увеличения качества поверхностной сетки;
 - перемещения узлов сетки;
 - использования CAD пакетов для устранения проблемной геометрии (острые углы, короткие линии), объединение поверхностей, декомпозиции объемов;
 - средств отчистки для упрощения геометрии;
 - различных методов задания общих или локальных размеров элементов и параметров;
 - сгущения сетки для разрешения мелкой геометрии;
 - использования виртуальной топологии для упрощения геометрии
- [10].

Глава 3 ПОДГОТОВКА НЕОБХОДИМЫХ ДАННЫХ ДЛЯ РАСЧЁТА РЕАГИРУЮЩИХ ПОТОКОВ В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ ГТД

Особенности химических процессов в различных зонах камеры сгорания определяют полноту сгорания, эмиссию вредных веществ, бедный срыв и другие её характеристики. Для описания процесса горения необходимо использовать кинетические схемы, формирование которых рассмотрим ниже.

Горение – сложный физико-химический процесс, описывающийся тысячами реакций с участием сотен химических элементов. При этом расчёт концентраций элементов и констант скоростей реакций представляет собой чрезвычайно трудоёмкий процесс. При нахождении скорости образования или расходования каждого компонента, участвующего в химической реакции, необходимо решить своё дифференциальное уравнение (ДУ), в котором учитывается влияние всех остальных химических элементов. Получается, что количество ДУ соответствует числу элементов участвующих во всех реакциях. Ещё более сложным случаем является решение системы «жестких» дифференциальных уравнений, к классу которых относятся задачи химической кинетики. Для её решения необходимо подобрать оптимальный шаг приближения, удовлетворяющий точности решения каждого уравнения. Как правило, максимальные значения у скоростей разных компонентов химической реакции не совпадают друг с другом по времени, и для устойчивого решения системы дифференциальных уравнений её разрешают по самым коротким промежуткам времени, что увеличивает затрачиваемый объём работы.

Создание кинетических схем требует высококвалифицированных специалистов, времени и обширных термодинамических и кинетических данных. Для каждого химического вещества необходимо определить значения его термодинамических данных: стандартную энтальпию образования, зависимость теплоёмкости от температуры, а также знать параметры уравнения Аррениуса (предэкспоненциальный фактор, коэффициент температурной зависимости, энергия активации) для нахождения констант скоростей химических реакций в которых эти химические вещества могут

участвовать. Имеется возможность создать подробный точный механизм, в котором в полном объёме будут описаны все химические реакции, участвующие в процессе горения углеводородных топлив, однако, он будет состоять из более чем сотни тысяч реакций для нескольких тысяч элементов. Для получения достоверных термодинамических и кинетических данных необходимо проводить высокоточные эксперименты в различных лабораторных условиях. Для получения приближенных значений используют разнообразные физико-химические подходы, основанные на молекулярно-кинетической или квантовой теории, что дает удовлетворительную точность вычислений. Имея необходимые данные (полученные с той или иной точностью) по каждой отдельной реакции и элементу, можно разработать детальную схему процесса горения, которую, в свою очередь верифицировать постановкой эксперимента на классических моделях горения. В ходе модельного эксперимента определяют основные физико-химические параметры: скорость распространения пламени, время задержки воспламенения, а также распределения концентраций и температуры. После проделанной работы данные детальной схемы и модельного эксперимента сопоставляют между собой, корректируя изначально полученные константы под определённые условия эксперимента. Кинетическую схему настраивают под конкретную задачу, используя для этого имеющееся программное обеспечение. У большинства научных центров имеется накопленная информационная база по результатам проведённых физико-химических экспериментов на различных моделях горения. Однако, эти данные в каждом источнике хранятся в своём формате и доступ к ним ограничен.

В расчётах камеры сгорания газотурбинного двигателя крайне нецелесообразно учитывать влияние всех возможных веществ и реакций. В зависимости от решаемой задачи имеется возможность сократить количество реакций и элементов, реально участвующих в процессе горения, при этом, ощутимо не теряя в точности расчёта. Кинетический механизм можно сократить несколькими способами:

- исключить из механизма те реакции, в которых участвует некий заранее выбранный элемент, при этом константы скоростей, оставшихся реакций, могут быть скорректированы под конкретную задачу;

- исключить те реакции, к которым исследуемая система наименее чувствительна;

- несколько быстрых реакций объединяют в единый блок, образуя квазиглобальную или глобальную реакцию.

При создании кинетического механизма горения выбирается всего лишь около десятка лимитирующих реакций, учитывая при этом вероятность столкновения и взаимодействия одного химического элемента с другим. Такой механизм, называемый редуцированным, имеет свои ограничения в применении.

Горение одного вида топлива может быть описано различными механизмами в зависимости от поставленной задачи. В общем виде механизм может состоять из одной глобальной реакции. Это вполне допустимо при приближенных расчётах, где необходимо знать лишь теплосодержание в камере сгорания. Для более подробных расчётов применяют схему с использованием системы элементарных реакций, которые восстанавливают радикальные элементы до конечных продуктов CO_2 и H_2O .

3.1 Выбор кинетического механизма описывающего процесс горения

Рассмотрим выбор кинетического механизма на примере горения керосина, наиболее распространенного топлива в авиации. В научной литературе приводятся различные редуцированные механизмы, описывающие процесс его горения. В данном пособии приведены три механизма, широко используемых в настоящее время. Выбор конкретного механизма зависит от поставленной задачи.

Самый короткий редуцированный механизм – это глобальная реакция горения керосина, входящая в программный пакет ANSYS Fluent как стандартная (1 реакция, 4 химических элемента) [12]:

Этот механизм дает среднее значение теплосодержания и применим для оценки распределения основных продуктов сгорания (CO_2 , H_2O) и температурных полей на выходе из КС. Его достоинством является простота и максимальная скорость расчетов с его использованием, но оценить с его помощью образование CO не получится. Образование NO_x оценить можно, включив в расчет соответствующую эмпирическую модель в ANSYS Fluent.

Второй предлагаемый к использованию механизм (рис. 7), это расширенная схема из 23 реакций и 16 химических элементов, по которой производится расчёт процесса горения по квазиглобальным реакциям пропана, метана, керосина, с учетом элементарных промежуточных реакций [13]:

- 1 $\{N_2\} + C_3H_8 \rightarrow 3CH + 5H + \{N_2\}, a=0.8, b=0.8 \text{¶}$
- 2 $\{N_2\} + CH_4 \rightarrow CH + 3H + \{N_2\}, a=0.8, b=0.8 \text{¶}$
- 3 $\{N_2\} + C_{12}H_{23} \rightarrow 12CH + 11H + \{N_2\}, a=0.8, b=0.8 \text{¶}$
- 4 $\{CH\} + H_2 + N_2 \rightarrow 2NH + \{CH\}, a=1.0, b=0.1, c=1.0 \text{¶}$
- 5 $\{CH\} + 2NH \rightarrow N_2 + H_2 + \{CH\}, a=1.0, b=2.0 \text{¶}$
- 6 $\{O\} + N_2 + HO_2 \rightarrow 2NO + 2OH + \{O\}, a=1.0, b=0.1, c=0.5 \text{¶}$
- 7 $2NO + H \rightarrow N_2 + HO_2, a=1.1, b=1.0 \text{¶}$
- 8 $H_2 + OH \rightarrow H_2O + H \text{¶}$
- 9 $H_2 + O \rightarrow H + OH \text{¶}$
- 10 $H + O_2 \rightarrow O + OH \text{¶}$
- 11 $N_2 + O_2 \rightarrow 2O + N_2 \text{¶}$
- 12 $H_2 + 2O \rightarrow O_2 + H_2 \text{¶}$
- 13 $H_2 + 2H \rightarrow 2H_2 \text{¶}$
- 14 $H + O_2 \rightarrow HO_2 \text{¶}$
- 15 $H + HO_2 \rightarrow H_2 + O_2 \text{¶}$
- 16 $O + HO_2 \rightarrow OH + O_2 \text{¶}$
- 17 $CO + OH \rightarrow CO_2 + H \text{¶}$
- 18 $\{N_2\} + 2CH \rightarrow C_2H_2 + \{N_2\} \text{¶}$
- 19 $C_2H_2 + O_2 \rightarrow 2CO + H_2 \text{¶}$
- 20 $CO + HO_2 \rightarrow CO_2 + OH \text{¶}$
- 21 $CH + O \rightarrow CO + H \text{¶}$
- 22 $CH + OH \rightarrow CO + H_2 \text{¶}$
- 23 $CH + NO \rightarrow NH + CO \text{¶}$
- 24 $N_2 + O \rightarrow N + NO \text{¶}$
- 25 $N + O_2 \rightarrow NO + O \text{¶}$
- 26 $N + OH \rightarrow NO + H \text{¶}$
- 27 $NH + O \rightarrow NO + H \text{¶}$
- 28 $NH + NO \rightarrow N_2 + OH \text{¶}$

Рис. 7. Кинетическая схема горения керосина [13]

Этот механизм даёт реалистичные значения времени задержки воспламенения, концентрации NO и CO, теплосодержание всего процесса. Особенностью схемы является разложение керосина по реакциям пиролиза на более легкие составляющие (CH и H).

Третья схема, которую также можно использовать, ещё более расширена и состоит из 28 реакций 18 элементов (рис. 8) [14]. Здесь

процесс горения описывается квазиглобальными реакциями только керосина, а также элементарными промежуточными реакциями в число которых входят реакции соударения с третьим элементом.

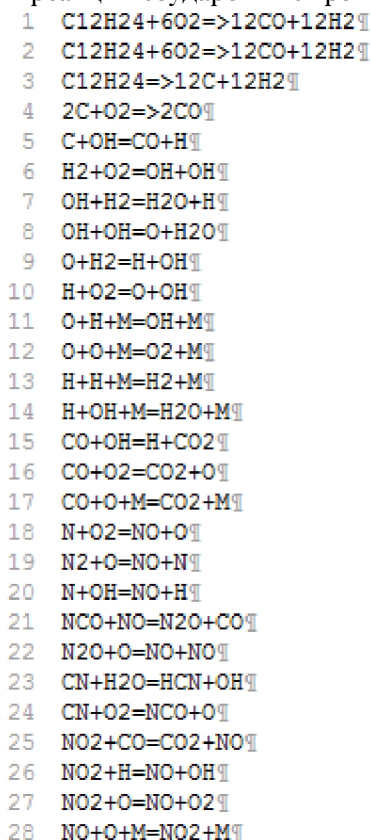


Рис. 8. Кинетическая схема горения керосина [14]

Третий механизм хорошо описывает турбулентное горение и его теплосодержание, дает реалистичное значение времени задержки воспламенения. Особенностью схемы является быстрое разложение керосина на основные элементы горения (CO, H₂) и их дальнейшее выгорание.

Отличие второго и третьего механизмов состоит в основном лишь в продуктах пиролиза исходного топлива, которые в дальнейшем

доокисляются до конечных продуктов сгорания элементарными реакциями необходимыми для описания процессов во фронте пламени.

3.2 Формирование термодинамических и транспортных данных

Для дополнения математической модели, описывающей процесс горения в ANSYS Fluent необходимы три файла [12].

Первый, Gas-Phase CHEMKIN Mechanism File, в котором описаны химические элементы, список веществ и реакций, участвующих в механизме горения, а также указаны кинетические данные для каждой реакции. Файл сохраняется в CHEMKIN формате с расширением *.mec. Важно точно соблюдать оформление файла, так как ANSYS Fluent считывает его позначково, смотри рис. 9.

```
-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----
1 ELEMENTS
2 O H
3 END
4 SPECIES
5 H
6 H2
7 O
8 OH
9 END
10 REACTIONS
11 O+H2=H+OH .....1.80E+010 ... 1.00 ... 8902.7 .....!
12 END
```

Рис. 9. Пример файла Gas-Phase CHEMKIN Mechanism

Отметим основные требования к формату файла данных *.mec. В его составе необходимо наличие ключевых слов ELEMENTS, SPECIES, REACTIONS и END.

В ELEMENTS и SPECIES перечисляются имена элементов и веществ необходимо разделять пробелами, либо абзацами.

В REACTIONS каждое уравнение химической реакции записывается с новой строки; коэффициенты и индексы при химических веществах, а так же знаки « + », « => », « = » указываются без пробелов. Знак « => » показывает прямую реакцию, « = » реакция идёт в обе стороны. Все буквы должны быть заглавными. Десятичные дроби разделяются точкой. Комментарии записывают после знака «! ».

Второй, Gas-Phase Thermodynamic Database File, где указаны термодинамические параметры элементов.

На описание каждого элемента выделено четыре строчки. В первой строке, указываются – имя элемента, источник информации, количество атомов углерода, водорода, азота, кислорода в элементе, агрегатное состояние элемента и интервалы температур аппроксимации констант. Во второй, третьей и четвертой строке указаны термодинамические коэффициенты для двух интервалов температур. Эти коэффициенты входят в полиномы по степеням температуры для теплоёмкости, энтальпии и энтропии [12]:

$$C_p/R = a_1 + a_2T + a_3T^2 + a_4T^3 + a_5T^4;$$

$$H/RT = a_1 + \left(\frac{a_2}{2}\right)T + \left(\frac{a_3}{3}\right)T^2 + \left(\frac{a_4}{4}\right)T^3 + \left(\frac{a_5}{5}\right)T^4 + \left(\frac{a_6}{6}\right)T^5;$$

$$S/R = a_1 \ln T + a_2T + \left(\frac{a_3}{2}\right)T^2 + \left(\frac{a_4}{3}\right)T^3 + \left(\frac{a_5}{4}\right)T^4 + a_7.$$

```

1 THERMO ALL
2 300. .... 1000. .... 6000.
3 O ..... L 1/90C --OH --ON --OO --1G --0300.00 -- 6000.00 --1000.00 ----1
4 -2.5436370E+000-2.7316249E-005-4.1902952E-009 4.9548185E-012-4.7955369E-016 ---2
5 -2.9226012E+004 4.9222946E+000 3.1682671E+000-3.2793188E-003 6.6430640E-006 ---3
6 -6.1280662E-009 2.1126597E-012 2.9122259E+004 2.0519335E+000 2.9968701E+004 ---4
7 H ..... L 6/94C --OH --1N --OO --0G --0300.00 -- 6000.00 --1000.00 ----1
8 -2.5000000E+000 0.0000000E+000 0.0000000E+000 0.0000000E+000 0.0000000E+000 ---2
9 -2.5473660E+004-4.4668285E-001 2.5000000E+000 0.0000000E+000 0.0000000E+000 ---3
10 -0.0000000E+000 0.0000000E+000 2.5473660E+004-4.4668285E-001 2.6219035E+004 ---4
11 H2 ..... RUS 78C --OH --2N --OO --0G --0300.00 -- 6000.00 --1000.00 ----1
12 -2.9328305E+000 8.2659802E-004-1.4640057E-007 1.5409851E-011-6.8879615E-016 ---2
13 -8.1305582E+002-1.0243164E+000 2.3443029E+000 7.9804248E-003-1.9477917E-005 ---3
14 -2.0156967E-008-7.3760289E-012-9.1792413E+002 6.8300218E-001 0.0000000E+000 ---4
15 OH ..... TU3/03C --OH --1N --OO --1G --0300.00 -- 6000.00 --1000.00 ----1
16 -2.8385303E+000 1.1074129E-003-2.9400021E-007 4.2069873E-011-2.4228989E-015 ---2
17 -3.6978081E+003 5.8449465E+000 3.9919842E+000-2.4010665E-003 4.6166403E-006 ---3
18 -3.8791631E-009 1.3631950E-012 3.3688984E+003-1.0399848E-001 4.4861538E+003 ---4
19
20 END
21

```

Рис. 10. Пример файла Gas-Phase Thermodynamic Database

В третьем файле, Transport Property Database File, указаны транспортные данные, описывающие процессы переноса компонентов.

```

1 H ..... 0 -- 145.000 ---- 2.050 ---- 0.000 ---- 0.000 ---- 0.000
2 H2 ..... 1 -- 38.000 ---- 2.920 ---- 0.000 ---- 0.790 ---- 280.000
3 O ..... 0 -- 80.000 ---- 2.750 ---- 0.000 ---- 0.000 ---- 0.000
4 OH ..... 1 -- 80.000 ---- 2.750 ---- 0.000 ---- 0.000 ---- 0.000
5

```

Рис. 11. Пример файла Transport Property Database

Каждая строка познательно содержит с 1 по 15 знаки выделены на название вещества, а с 16 по 80 выделены на молекулярные параметры:

- молекулярное число (0 - атом; 1 - линейная молекула; 2 - нелинейная молекула);
- длина свободного пробега частиц;
- диаметр столкновения частицы;
- дипольный момент;
- поляризуемость;
- число степеней свободы;
- комментарии.

В данном пособии предлагается использовать следующую модель горения, доступную в ANSYS Fluent – Non-premixed combustion (горение предварительно не перемешанной смеси). В модели горения заранее не перемешанных смесей (диффузионное горение), топливо и окислитель подаются в зону горения раздельно.

Согласно данной модели, термохимические параметры могут быть поставлены в зависимость от единственного параметра: смеси доли, обозначаемой как f . Смесевая доля – массовая доля топлива в смеси. Это локальная массовая доля сгоревших и несгоревших топливных элементов (С, Н и других) среди всех компонентов смеси. Такой подход целесообразен, поскольку атомарные элементы сохраняются в химических реакциях. В свою очередь, смесь доля является постоянной скалярной величиной, поэтому управляющее уравнение переноса не имеет переменной-источника. Тогда описание процесса горения сводится к проблеме смешения компонентов, а сложность с определением скорости химической реакции отпадает. Если процесс горения определяется диффузией компонентов реагирующей смеси, то химические процессы могут быть смоделированы как химически равновесные с помощью модели (Equilibrium model). При подключении равновесной модели необходимо добавить основные химические элементы – топливо и окислитель, указав доли их содержания в топливной смеси. Затем рассчитав, сохранить PDF таблицу. При использовании модели устойчивого ламинарного пламени нужно импортировать CHEMKIN

Mechanism, предварительно выполнив расчёт состояний смеси (Calculate Flamelets) и сохранить PDF таблицу [12].

Глава 4 ПРОЦЕДУРА РАСЧЕТА В ПАКЕТЕ ANSYS FLUENT

4.1 Настройка решателя

Работа в программном комплексе ANSYS Fluent состоит из следующих основных этапов:

- проверка качества и редактирования (при необходимости) сетки;
- масштабирование сетки;
- выбора типа решателя и постановки задачи;
- задание свойств рабочего тела;
- выбора физических моделей, используемых при расчете;
- выбора модели турбулентности;
- задание граничных условий;
- настройка параметров расчета;
- расчет задачи;
- визуализация решения и анализ полученных результатов.

4.2 Выбор типа решателя

Программа ANSYS Fluent позволяет использовать четыре алгоритма решения:

Pressure Based Implicit (в отечественной литературе его называют неявный алгоритм установления);

Density Based Implicit – неявный алгоритм расщепления;

Density Based Explicit – явный алгоритм расщепления;

Pressure-based coupled – алгоритм, появившийся в последней версии программы. Используется для поиска полей скоростей и давления в нем используется алгоритм расщепления, а для остальных параметров – алгоритм установления. Алгоритм *Pressure Based* изначально разрабатывался для низкоскоростных потоков ($M \leq 0,8$).

Density Based алгоритм - создавался для расчетов высокоскоростных, транс - и сверхзвуковых потоков. С развитием этих двух решателей границы применения каждого из них размылись, и стало возможным решение большинства задач обоими решателями.

При выборе решателя необходимо указать, будет ли решение стационарным (*Steady*) или нестационарным (*Transient*), будут ли параметры потока изменяться во времени. В данном пособии рассмотрен

расчёт в стационарной постановке (*Steady*). Это допущение принимается для сокращения ресурсов и времени, затрачиваемого на расчёт [12].

4.3 Задание свойств рабочего тела

Переходим к определению компонентов и их свойств, необходимых для расчета. В нашем случае рабочими телами являются воздух и керосин. Керосин полагается находящимся в газовой фазе (испарённым). Тогда, изменение плотности для обоих газов (воздуха и керосина) будет определяться в соответствии с уравнением состояния идеального газа. Зависимость их изобарной теплоемкости от температуры задаем в виде полинома. В стандартной базе данных ANSYS Fluent для воздуха и керосина приведены полиномиальные зависимости изобарной теплоемкости от температуры. Если бы такие зависимости отсутствовали, то их надо было бы задать вручную.

При выборе модели турбулентности следует руководствоваться следующими критериями:

- модель должна быть апробирована для рассматриваемого класса задач;
- модель должна быть относительно простой и удобной в плане выполнения вычислений;
- модель должна характеризоваться высокой вычислительной эффективностью, т.е. она не должна существенно увеличивать время счета.

4.4 Задание граничных условий

Важной составляющей успешного решения системы уравнений Навье – Стокса является корректное задание граничных условий.

Задание граничных условий на непроницаемых стенках не представляет собой значительных затруднений. В этом случае на стенке задается условие равенства нулю всех компонентов вектора скорости, а так же задается температура стенки или тепловой поток через нее (граничные условия первого или второго рода).

Выбор параметров, используемых в качестве граничных условий, произволен. Для дозвуковых внутренних течений, чаще всего на входе в расчетную область задаются полное давление и температура, а также направляющий вектор скорости. На выходной границе задается статическое давление. Если на входе в расчетную область скорость

потока сверхзвуковая, то на входной границе дополнительно задается статическое давление, а давление на выходе не задаётся.

Программа *ANSYS Fluent* поддерживает достаточно большой выбор граничных условий, из которых наиболее часто используются следующие:

Pressure inlet – полное давление и температура на входе в расчетную область;

Velocity inlet – вектор скорости и температура на входе в расчетную область;

Massflow inlet – массовый расход и полная температура потока на входе в расчетную область;

Pressure outlet – статическое давление на выходе;

Outflow – граничное условие, показывающее какая доля расхода выходит через данную границу;

Wall – стенка;

Periodic – периодическое граничное условие;

Symmetry – граничное условие симметрии;

Axis – ось для осесимметричных задач;

Pressure farfield – постоянное давление и направление потока на удалении от объекта (применяется для решения задач внешнего обтекания).

Остальные граничные условия выбираются при решении специализированных задач и редко используются. Граничные условия *Velocity inlet* и *Outflow* можно применять только при исследовании несжимаемых потоков. Использование их в задачах с учетом сжимаемости некорректно.

Параметры, которые необходимо ввести в меню граничных условий зависят от подключенных физических моделей.

При исследовании течения газов в элементах двигателей наиболее часто на входе задаются граничные условия *Pressure inlet* или *Mass flow inlet*, а на выходе *Pressure outlet* [12].

4.5 Обработка данных результатов расчета

Важным этапом является обработка результатов расчёта. Для их обработки строят дополнительные точки, прямые и плоскости, которые дают более наглядную информацию. Создать плоскость можно во вкладке *New Surface*, а при отображении результатов выделять только интересующие нас поверхности.

Отображение контуров различных параметров производится во вкладке *Graphics and Animations* → *Contours*.

Для отображения, например, массовой концентрации CO во вкладке «Contours of» выбираем «Species» и «Mass fraction of CO», остальные опции оставляем по умолчанию. Нажимаем «Display», после чего в графическом окне будет отображено поле распределения массовой концентрации CO, смотри рис. 12.

Аналогичным образом можно отобразить поле массовой концентрации NO, смотри рис. 13.

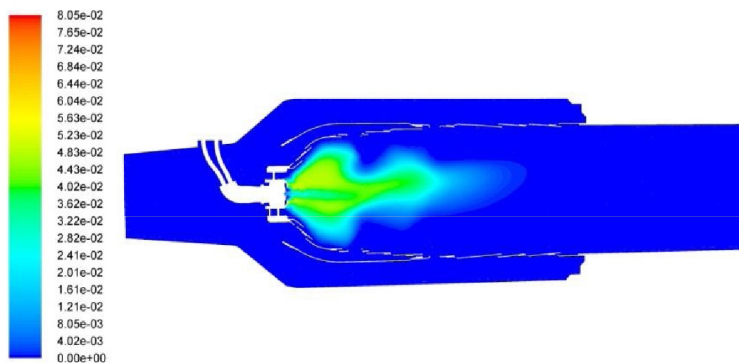


Рис. 12. Пример поля распределения массовой концентрации CO в модели КС ГТД

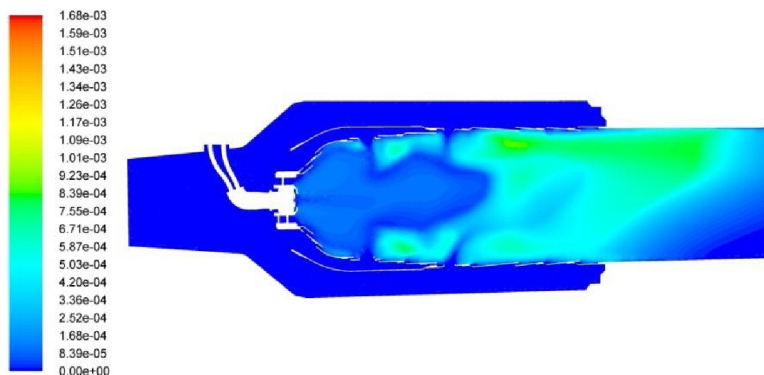


Рис. 13. Пример поля распределения массовой концентрации NO в модели КС ГТД

Для построения графиков изменения параметров вдоль оси модели необходимо выбрать следующий пункт Plots → XY Plots. В качестве функции оси Y (Y Axis Function) выбираем «Species» и «Mass fraction of CO». В качестве поверхности выбираем ось модели axis-5, нажимаем «Plot». При этом в графическом окне должен отобразиться график изменения массовой концентрации CO вдоль оси модели, смотри рис. 14.

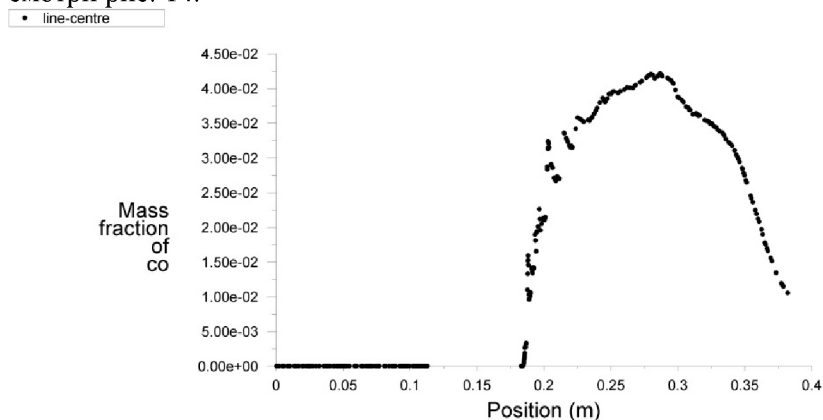


Рис. 14. Пример распределения массовой концентрации CO по оси KC

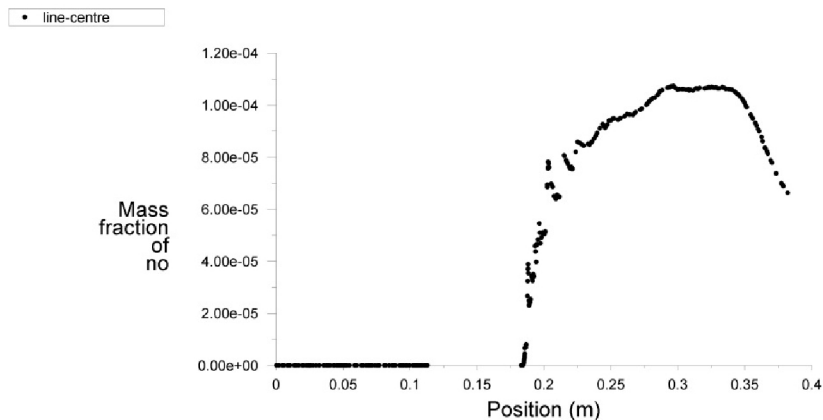


Рис. 15. Пример распределения массовой концентрации NO по оси KC

Аналогичным образом можно отобразить изменения любого параметра вдоль любой кривой/плоскости/стенки. Ниже приведен график распределения массовой концентрации NO вдоль оси, смотри рис. 15.

Во вкладке *Report* можно получить средние значения параметров потока (Fluxes) или сил (Forces), а также средние значения по поверхности (Projected Areas, Surface Integrals) или объему модели (Volume Integrals).

4.6 Анализ результатов расчёта

Анализируя полученные данные расчета для камеры сгорания, в первую очередь обращают внимание на температуру, минимальное значение которой должно быть не ниже температуры воздуха (или топлива) на входе, а максимальное - не выше адиабатической температуры горения данного топлива. Особое значение имеет поле распределения температур в выходном сечении, которое в идеальном случае должно быть равномерным. Большой разброс в распределении значений температур отрицательно влияет на ресурс лопаток турбины.

Затем проверяется газовая динамика, и соответствие полученных значений скорости и давления имеющимся физическим представлениям о рабочем процессе в КС. Если основные параметры процесса горения лежат в интервале возможных экспериментальных и статистических значений, можно переходить к анализу эмиссии вредных веществ в выходном сечении камеры сгорания. Значения выбросов могут быть сопоставлены с имеющимися нормативами для ГТД данного класса.

Глава 5 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ «РАСЧЕТ ОБРАЗОВАНИЯ СО И NOX В КС ГТД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ CAE СИСТЕМ»

Для выполнения лабораторной работы необходимо взять у преподавателя файл сеточной модели формата *.mesh, данные для начальных и граничных условий, файл кинетического механизма формата *.scm и следовать дальнейшим инструкциям:

- Запустить ANSYS Fluent;
- Загрузить сеточную модель;
- Выбрать необходимые параметры решателя;
- Подключить кинетическую схему;
- Указать выбранную модель горения;
- Задать начальные и граничные условия;
- Определить диапазоны изменения давления, температуры и другие известные пределы параметров;
- Установить оптимальные значения коэффициентов по невязкам;
- Проверить наличие и правильность указанных параметров модели, сохранить её в формате *.cas;
- Запустить гибридную инициализацию;
- Сохранить данные расчёта в формате *.dat.
- Запустить расчет;
- По завершению, сохранить данные расчета;
- Снять значения температуры, скорости, концентраций оксида углерода, диоксида углерода, керосина, оксида азота и другие параметры по требованию преподавателя;
- Провести расчет КПД модели, снять поле температур на выходе;
- Оформить лабораторную работу в соответствии с требованиями преподавателя;
- Ответить на контрольные вопросы к отчёту по лабораторной работе.

Все этапы изложены в примере приведенном в приложении 1.

Контрольные вопросы

- Схема устройства ГТД;
- Принцип работы камеры сгорания ГТД;
- Определения процесса горения, стехиометрического коэффициента;
- Определения коэффициента избытка воздуха, низшей и высшей теплоты сгорания;
- Режимы горения пламени;
- Классификация пламён;
- Горение ламинарного пламени;
- Горение турбулентного пламени;
- Типы загрязняющих веществ;
- Образование и выброс «лёгких» углеводородов;
- Образование ПАУ;
- Образование дыма;
- Параметры, характеризующие работу КС ГТД;
- Принцип построения трехмерной модели камеры сгорания в программном пакете NX;
- Типы конечно-элементных сеток;
- Подготовка модели к расчёту в программном пакете ANSYS Fluent;
- Обработка полученных данных и их анализ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном учебном пособии приведена технология численного моделирования образования CO и NO_x в камерах сгорания ГТД. Представлена необходимая последовательность действий и подходы к её реализации в ходе моделирования образования вредных веществ с использованием CAD/CAE систем.

Фундаментом для любого газодинамического расчета является формирование трехмерной геометрической модели камеры сгорания, подходы к созданию которой были разработаны в начале работы. Исходя из особенностей объекта исследования (камеры сгорания) были сформулированы основные принципы выполнения возможных упрощений исходной геометрии, позволяющих в дальнейшем сгенерировать конечно-элементную модель для расчетной области.

Построение конечно-элементной модели является важным элементом технологии, обеспечивающим выполнение достоверного расчёта в целом. Поэтому значительная часть приведенной технологии посвящена описанию требований к её качеству и влиянию сеточного разрешения на результаты численных расчетов.

Важной особенностью, предшествующей численному моделированию вредных выбросов КС ГТД в целом, является подготовка необходимых данных для расчета реагирующих потоков. Данная часть технологии является ключевой и её освоение позволяет получить необходимые знания для выбора, формирования и подготовки кинетических механизмов, термодинамических и транспортных данных позволяющих моделировать образование CO и NO_x с необходимой степенью детализации.

Созданная технология численного моделирования процессов образования CO и NO_x основана на использовании программного комплекса ANSYS Fluent и в ней дан перечень всех необходимых действий, позволяющих выбрать и настроить решатель, правильно задать начальные и граничные условия, произвести расчет и обработать полученные данные.

Разработанная технология может быть использована студентами, магистрами и аспирантами вузов аэрокосмического профиля, а так же специалистами в области проектирования камер сгорания ГТД для

оценки расчётным путём вредных выбросов перспективных камер сгорания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Приложение 16 к Конвенции о международной гражданской авиации. Охрана окружающей среды [Электронный ресурс]. В 2т. Т. II. Эмиссия авиационных двигателей. (1,45 Мб). – ИКАО, 2008.
- 2 Волков, С.А. Анализ существующих и планируемых зарубежных требований к двигателям гражданской авиации по ограничению выбросов вредных веществ [Текст]/С.А. Волков, А.А. Горбатко//Экологические проблемы авиации. – М.: ТОРУС ПРЕСС, 2012.-С. 234-246.
- 3 Лефевр, А. Процессы в камерах сгорания ГТД [Текст]:[пер. с англ.]/А. Лефевр.– М.: Мир, 1986. – 566 с., ил.
- 4 Иноземцев, А.А. Газотурбинные двигатели [Текст]/А.А. Иноземцев, В.Л. Сандрацкий. - ОАО "Авиадвигатель, 2006 – 1202 с.
- 5 Пчелкин, Ю.М. Камеры сгорания газотурбинных двигателей [Текст]: учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Турбиностроение». – 3-е изд., перераб. и доп./Ю.М. Пчёлкин. – М.: Машиностроение, 1984 – 280 с. ил.
- 6 Григорьев, А.В. Теория камеры сгорания [Текст]/А.В. Григорьев, В.А. Митрофанов, О.А. Рудаков, Н.Д. Саливон/ Под ред. О.А. Рудакова. – СПб.: Наука, 2010. – 228 с. 74 ил.
- 7 Ивах, А.Ф. Особенности конвертирования форсированной по скорости камеры сгорания при работе на природном газе [Текст]/А.Ф. Ивах, Г.П. Гребенюк, М.Н. Ишбулатов, В.И. Арефин, Н.И. Фокин//Вестник СГАУ. – 2002. -№2(2).- С. 21-26.
- 8 Старик, А.М. Эмиссия из авиационных двигателей и воздействие авиации на атмосферные процессы и климат [Текст]/А.М. Старик, О.Н. Фаворский//Экологические проблемы авиации. – М.: ТОРУС ПРЕСС, 2012.-С. 207-233.
- 9 Козлов, В.Е. Применение реакторных моделей для расчёта эмиссионных характеристик диффузионных и гомогенных камер сгорания [Текст]/В.Е. Козлов, А.Б. Лебедев, А.Н. Секундов, А.М. Старик, Н.С. Титова//Экологические проблемы авиации. – М.: ТОРУС ПРЕСС, 2012.-С. 321-338.
- 10 Кулагин, В.В. Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок [Текст]: Учебник. 2-е

изд., исправл. Кн. 1. Рабочий процесс и термогазодинамический анализ. Кн. 2. Совместная работа узлов выполненного двигателя и его характеристики/В.В. Кулагин. - М.: Машиностроение, 2003. - 616 с.: ил.

- 11 Матвеев, С.Г. Расчет характеристик струйных течений газовых сред в камерах сгорания ГТД [Текст]: учеб. пособие / С.Г. Матвеев, М.Ю. Орлов, В.Ю. Абрашкин, М.Ю. Анисимов, Н.С. Макаров, С.С. Матвеев. – Самара: Самар. гос. Аэрокосм. Ун-т, 2011. – 109 с.
- 12 ANSYS FLUENT 14.0.Theory Guide. 2011. ANSYS, Inc.
- 13 Kundu, K.P. Simplified Jet-A/Air Combustion Mechanisms for Calculation of NO_x Emissions [Text]/K.P. Kundu, P.F. Penko, S.L. Yang//ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power – 1998.- P. 535-545.
Wang, T.-S. Thermophysics Characterization of Kerosene Combustion [Text]/T.-S. Wang//Journal of Thermophysics and Heat Transfer – 2001. - №2.- P. 140-147.