Нормативные ссылки

В настоящей пояснительной записке использованы ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 7.1—84 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическое описание документа. Общие требования и правила составления

ГОСТ 8.417—81 Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы физических величин

ГОСТ 7.32—2001 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления

ГОСТ 7.54 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Представление численных данных о свойствах веществ и материалов в научно-технических документах. Общие требования.

Список условных обозначений

Сп – условная теплоёмкость, [кДж/кгК];

gт – относительный расход топлива;

Gк.с. – расход воздуха через камеру сгорания, [кг/с];

GвI – первичный воздух;

GвII – вторичный воздух;

H – удельная полная энтальпия;

Hu – теплопроводность топлива;

L – количество воздуха, необходимого для полного сгорания одного килограмма топлива;

Тк – температура на входе в камеру сгорания;

Тг – температура на выходе из камеры сгорания;

– коэффициент избытка воздуха;

– коэффициент восстановления полного давления;

– коэффициент полноты сгорания;

Содержание

1.Введение…………………………………………………………………………5

2.Каммеры сгорания ГТД………………………………………………………...9

2.1.Назначение камер сгорания и основные требования к ним…………….9

2.2.Основные параметры камер сгорания ГТД……………………………..10

2.3.Основные закономерности процесса горения топлива………………...12

2.4.Типы основных камер сгорания ГТД и организация процесса горения в них………………………………………………………………………………..16

2.5.Характеристики камер сгорания авиационных ГТД…………………...20

2.6.Потери полного давления в камерах сгорания ГТД……………………23

2.7.Определение расхода топлива в камерах сгорания…………………….24

3.Численный эксперимент ……………………………………………………...25

3.1.Математическая модель ………………………………………………….25

4.Моделирование предварительно не перемешанных смесей………………..27

4.1.Описание фракции равновесной смеси………………………………….28

4.2.Преимущества и ограничения……………………………………………28

4.3.Ограничения для non-primixed метода…………………………………..29

4.4.Описание массовых фракций…………………………………………….29

4.5.Уравнения переноса для фракции смеси………………………………..31

4.6.Модели, описывающие химические процессы………………………….33

5.Постановка задачи…………………………………………………………….36

6.Заключение……………………………………………………………………..41

7. Список использованной литературы………………………………………...42

1.Введение

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 молекулярнокинетической 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 СО2 и Н2О.

2.КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ГТД

2.1.НАЗНАЧЕНИЕ КАМЕР СГОРАНИЯ И ОСНОВНЫЕ

ТРЕБОВАНИЯ К НИМ

Камеры сгорания ГТД (рис.1) предназначены для подвода теплоты к рабочему телу в двигателе за счет преобразования химической энергии топлива в тепловую при его сгорании с участием кислорода, содержащегося в воздухе.

Камера сгорания − один из важнейших элементов ГТД, от совершенства которого в значительной мере зависят надежность двигателя и его экономичность. Соответственно к камерам сгорания предъявляются нижеследующие основные требования.

1. Высокая полнота сгорания топлива. Потери теплоты в процессе горения связаны, в основном, с неполным сгоранием. Теплоотдача через стенки камеры сгорания во внешнюю по отношению к двигателю среду обычно пренебрежимо мала.
2. Возможно малые потери полного давления. Снижение полного давления потока, проходящего через камеру, из-за наличия гидравлических и других потерь отрицательно сказывается как на тяге, так и на экономичности дви­гателя.
3. Минимально возможные габариты при данном количестве выделяемой при сгорании топлива теплоты.
4. Устойчивый процесс горения в широком диапазоне режимов работы и условий полета. Иначе возможно самовыключение двигателя из-за «срыва» пламени.
5. Обеспечение необходимого и стабильного поля температур на входе в турбину. Нестабильность и окружная неравномерность температурного поля отрицательно сказываются на тепловом режиме сопловых и рабочих лопаток турбины и, следовательно, на их надежности и ресурсе.
6. Низкий уровень выброса твердых частиц (сажи) и вредных (токсичных) веществ в продуктах сгорания. «Дымление» двигателей приводит к загрязнению атмосферы, к нарушению нормального теплового режима деталей газового тракта (при отложении сажи на их поверхности) и т. д.
7. Надежный запуск («розжиг») на земле и в воздухе. Камеры сгорания ТРД должны обеспечивать надежное воспламенение топлива в них на высотах по крайней мере до 6 …10 км.

|  |
| --- |
| **Рис** |
| Рисунок 1 – Схема камеры сгорания ГТД |

2.2.ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ КАМЕР СГОРАНИЯ ГТД

Для оценки совершенства камер сгорания и эффективности их рабочего процесса используются следующие основные параметры камер сгорания:

1. **Коэффициент полноты сгорания**. Он представляет собой отношение количества теплоты , реально подведенной к единице массы воздушно-газового потока в камере сгорания, к теоретически возможному его значению, которое выделилось бы в камере при полном сгорании топлива и при отсутствии потерь теплоты через её стенки.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1) |

Если теплотворность топлива равна (для авиационных керосинов она составляет 42900…43100 кДж/кг), то

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2) |

где – расход воздуха через камеру сгорания, – расход топлива и – относительный расход топлива.

На расчётном режиме обычно

1. **Коэффициент восстановления полного давления** – так называется отношение осредненного полного давления на выходе из камеры сгорания к полному давлению на входе в неё

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3) |

Обычно .

1. **Коэффициент избытка воздуха**  , равный отношению действительно по-ступающего в камеру сгорания в единицу времени количества воздуха к теоретически необходимому для полного сгорания топлива , поступающего в камеру за то же время. Количество воздуха, теоретически необходимое для полного сгорания одного килограмма топлива, обозначается . Тогда:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4) |

Для авиационного керосина .

При смесь топлива с воздухом называется ***стехиометрической.*** При , т.е. когда воздуха не хватает для полного сгорания (топливо содержится в избытке) смесь называется ***богатой***, а если – бедной. Смесь может быть ***однородной***, если во всех микрообъемах занимаемого ею пространства значение коэффициента α одинаково, и ***неоднородной*** в противном случае.

Температура продуктов сгорания однородной смеси керосина с воздухом зависит, главным образом, от её состава (т.е. коэффициента избытка воздуха α). При сгорании стехиометрической смеси (т.е. при 1) температура продуктов сгорания достигает 2500 … 2600К. В камерах сгорания современных авиационных ГТД температура газа перед турбиной (на выходе из камеры сгорания) составляет 1500…1800 К, что соответствует коэффициенту избытка воздуха примерно 2…2,5.

2.3.ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОЦЕССА

ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА

Горение топливо-воздушной смеси в двигателе представляет собой сложный физико-химический процесс, который можно условно рассматривать состоящим из последовательно протекающих процессов:

1. распыливания топлива;
2. его испарения;
3. смешения паров топлива с воздухом;
4. воспламенения образовавшейся горючей смеси, т.е. химической реакции окисления (горения).

В действительности указанные процессы протекают не строго последовательно, а в значительной степени одновременно. Но такое разделение позволяет лучше уяснить сущность сложного процесса горения и проанализировать достаточно полно влияние на него различных факторов. Рассмотрим подробнее эти процессы.

***Распыливание*** представляет собой процесс дробления жидкого топлива на мелкие капли. При уменьшении среднего диаметра капель общая их поверхность увеличивается, что ускоряет прогрев и испарение жидкости и облегчает последующий процесс смешения. В ГТД распыливание происходит в процессе впрыска топлива под давлением через форсунки. Вытекающая из форсунки струя топлива распадается на капли под воздействием сил сопротивления среды, в которую производится впрыск, а также внутренних сил, обусловленных турбулентным движением, возникающим в самой струе при ее течении. Распыл улучшается при увеличении перепада давления на форсунке и при повышении плотности среды. В ГТД применяются как струйные форсунки, так и центробежные форсунки, в которых поток топлива до выброса его в камеру сгорания предварительно закручивается, чтобы потом в распаде струи на капли приняли участие центробежные силы. Применяются также форсунки, в которых распыл происходит под воздействием сжатого воздуха (эмульсионные форсунки, работающие по принципу пульверизатора).

***Испарение*** распыленного топлива сопровождается поглощением теплоты. Скорость испарения распыленного топлива определяется интенсивностью подвода теплоты от воздуха к каплям и скоростью отвода от них образовавшегося пара, т.е. температурой и давлением воздуха, скоростью его движения относительно капли, размером капель и их температурой.

***Смешение*** паров топлива с воздухом происходит путем диффузии и в значительной мере вследствие турбулентного перемешивания. Скорость протекания процесса смешения определяются распределением капель топлива в воздушном потоке и интенсивностью турбулентного перемешивания.

***Воспламенение*** горючей смеси топлива с воздухом происходит от факела пламени, непрерывно существующего в работающих камерах сгорания. Возможно также образование в смеси начального очага пламени в результате воздействия постороннего источника высокой температуры (струи горящей смеси, электрической искры и т.п.). Но образование начального очага пламени не всегда ведет к воспламенению всей смеси. При слишком богатой и слишком бедной смеси местное тепловыделение оказывается недостаточным для нагревания соседних слоев до температуры воспламенения. В результате пламя, возникшее у источника зажигания, гаснет. Предельные значения коэффициента избытка воздуха (), при которых пламя от источника зажигания еще может распространяться по всему объему смеси, называют ***пределами воспламеняемости смеси***. Понижение давления и особенно температуры смеси сужает эти пределы. Обычно пределы воспламеняемости однородных гомогенных смесей авиационных керосинов с воздухом составляют от до.

***Горение*** топливо-воздушной смеси представляет собой химическую реакцию окисления горючих веществ кислородом воздуха, сопровождающуюся выделением большого количества теплоты и образованием видимого пламени. В неподвижной ***однородной*** топливо-воздушной смеси процесс горения происходит в очень узкой светящейся зоне, перемещающейся в сторону еще не сгоревшей части объема смеси и называемой ***фронтом пламени***. Перемещение фронта пламени при этом происходит с так называемой ***нормальной*** скоростью горения (скорости перемещения фронта пламени по нормали к нему). Значение определяется во многом кинетикой химических реакций (поэтому такое горение однородной смеси часто называют ***кинетическим***). Оно зависят, главным образом, от состава смеси (т.е. от рода топлива и коэффициента избытка воздуха) и ее температуры. Максимальная скорость распространения пламени достигается при значениях примерно 0.8…0.9, а с увеличением или уменьшением значительно падает. С увеличением температуры смеси существенно возрастает, а при повышении давления несколько падает.

Но при этом важно отметить, что нормальная скорость горения керосино-воздушных смесей не превышает примерно 2 м/с. И если горючая смесь движется, то до тех пор, пока её течение имеет ламинарный характер, скорость распространения пламени относительно смеси остается практически такой же. Но, если поток турбулентный, то картина существенно изменяется. Турбулентность, искривляя фронт пламени, резко увеличивает его поверхность, повышая тем самым объем смеси, вовлекаемый в процесс горения в единицу времени. При большой степени турбулентости фронт пламени разрывается, и от него отделяются небольшие объемы, которые, проникая в свежую смесь, воспламеняют ее, еще больше ускоряя процесс. Горение идет уже в некотором объеме, называемом зоной горения. Скорость распространения пламени в турбулентном потоке зависит не столько от физико-химических свойств смеси, определяющих, сколько от степени турбулентности потока. Эта степень турбулентности в камерах сгорания ГТД такова, что скорость турбулентного распространения пламени в них во много раз больше. Но с понижением давления в потоке топливной смеси (например, при увеличении высоты полета) его турбулентность снижается из-за уменьшения числа Re. Это отрицательно сказывается на скорости горения.

В камерах сгорания ГТД топливо-воздушная смесь образуется непосредственно вблизи зоны горения. При этом в общем случае в зону горения поступает ***неоднородная*** топливо-воздушная смесь с частично не успевшими испариться каплями топлива, т.е. гетерогенная смесь. При горении такой смеси большую роль играет процесс диффузии паров топлива в воздушный поток (***диффузионное*** горение). Исследования показывают, что скорость распространения пламени в таких смесях имеет тот же порядок, что и. Однако пределы значений коэффициента избытка воздуха α (среднего по всему объему смеси), в которых возможно устойчивое горение, в этом случае расширяются, так как, например, при общем обеднении смеси местные концентрации паров топлива вокруг испаряющихся капель могут быть более благоприятными для воспламенения и сгорания.

2.4.ТИПЫ ОСНОВНЫХ КАМЕР СГОРАНИЯ ГТД

И ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ В НИХ

Практически применяются камеры сгорания трех основных типов (рис.2): *а −* трубчатые (индивидуальные), *б* − трубчато-кольцевые и *в −* кольцевые.

|  |
| --- |
| Рис9_2а |
| Рисунок 2 – Типы камер сгорания |

***Трубчатая*** камера сгорания (рис.2 *а*) состоит из жаровой трубы *1,* внутри которой организуется процесс горения, и корпуса *2.*

В ***трубчато-кольцевой*** камере (рис.2*б*) все жаровые трубы заключены в общий корпус, имеющий внутреннюю и наружную поверхности, охватывающие вал двигателя.

В ***кольцевой*** камере сгорания (рис.2*в*) жаровая труба имеет в сечении форму кольца, также охватывающего вал двигателя.

Однако, несмотря на большое разнообразие схем и конструктивных форм камер сгорания, процесс горения в них организуется практически одинаково.

Одной из важнейших особенностей организации процесса горения в основных камерах сгорания ГТД является то, что он должен протекать ***при сравнительно больших коэффициентах избытка воздуха***. При реализуемых в настоящее время температурах газа перед турбиной порядка и ниже, как уже отмечалось, значение коэффициента избытка воздуха (среднее для всей камеры) должно составлять 2.0…30 и более. При таких значениях однородная топливо-воздушная смесь, как было указано выше, не воспламеняется и не горит. При резком уменьшении подачи топлива в двигатель, которое может иметь место в условиях эксплуатации, коэффициент избытка воздуха может достигать еще существенно больших значений (до 20…30 и более).

Вторая важная особенность этих камер состоит в том, что скорость потока воздуха или топливо-воздушной смеси в них существенно превышает скорость распространения пламени. И, если не принять специальных мер, пламя будет унесено потоком за пределы камеры сгорания

Поэтому организация процесса горения топлива в основных камерах ГТД основывается на следующих двух принципах, позволяющих обеспечить устойчивое горение топлива при больших значениях и высоких скоростях движения потока в них:

1. Весь поток воздуха, поступающий в камеру сгорания, разделяешься ***на две части***, из которых только одна часть (обычно меньшая) подается непосредственно в ***зону горения*** (где за счет этого создается необходимый для устой­чивого горения состав смеси). А другая часть направляется в обход зоны горения (охлаждая снаружи жаровую трубу) в так называемую ***зону смешения*** (пе­ред турбиной), где смешивается с продуктами сгорания, понижая в нужной мере их температуру;
2. Стабилизация пламени в зоне горения обеспечивается путем создания в ней ***зоны обратных токов***, заполненной горячими продуктами сгорания, непрерывно поджигающими свежую горючую смесь.

Для примера на рис.3 показана схема трубчато-кольцевой камеры сгорания. Камера состоит из жаровой трубы и корпуса*.* В передней части жаровой трубы, которую называют ***фронтовым устройством****,* размещаются форсунка для подачи топлива и лопаточныйзавихритель*.* Для уменьшения скорости воздуха в камере на входе в нее (за компрессором) выполняется диффузор, благодаря которому скорость воздуха перед фронтовым устройством обычно не превышает 50 м/с.

Воздух, поступающий в камеру сгорания из компрессора, делится на две части и. Одна частьнаправляется в зону горения, а вторая часть− в зону смешения. Первая часть, так называемый ***первичный*** воздух , поступает непосредственно через фронтовое устройство к месту расположения факела распыла топливной форсунки и используется для формирования богатой топливной смеси такого состава, который обеспечивал бы на всех режимах достаточно быстрое и устойчивое сгорание.

Вторая его часть (так называемый ***вторичный*** воздух) через боковые отверстия в жаровой трубе поступает в камеру для завершения процесса горения (первичного воздуха для этого недостаточно). Общее количество воздуха, поступающего в зоны горения, обеспечивает в ней коэффициент избытка воздуха порядка = 1.6…1.7, что соответствует устойчивому горению, полному сгоранию и температуре порядка 1800…1900К.

Если допустимая температура газов перед турбиной ниже этой величины, необходимая для её уменьшения часть воздуха поступает в жаровую трубу через задние ряды отверстий или щелей, быстро снижая их температуру до допустимой. При этом важно подчеркнуть, что, если какая-то часть топлива не успеет сгореть до попадания в зону смешения, то дальнейшее ее догорание практически уже не произойдет, так как коэффициент избытка воздуха возрастает до значений, превышающих предел устойчивого горения.

|  |
| --- |
| H:\АУК СМ констр ПС-90А2 для ИТС\Р030201.2.JPG |
| Рисунок 3 – Зона обратных токов  в основной камере сгорания |

Структура потока в передней части жаровой трубы камеры сгорания с так называемым лопаточным завихрителем показана схематично на рис.3. Воздух поступает сюда через лопаточный завихритель, лопатки которого закручивают поток (подобно лопаткам входного направляющего аппарата компрессора). Далее воздух движется вдоль поверхности жаровой трубы в виде конической вихревой струи. Вихревое движения воздуха приводит к понижению давления в области за завихрителем, вследствие чего в эту область устремляется газ из расположенных дальше от фронтового устройства участков жаровой трубы. В результате здесь возникает зона обратных токов. Топливо-воздушная смесь, образовавшаяся за фронтовым устройством, при запуске двигателя поджигается огненной струей, создаваемой пусковым воспламенителем (рис.). Но в последующем горячие продукты сгорания вовлекаются в зону обратных токов и обеспечивают непрерывное поджигание свежей смеси. Кроме того, горячие газы, циркулирующие в этой зоне, являются источником теплоты, необходимой для быстрого испарения топлива.

2.5.ХАРАКТЕРИСТИКИ КАМЕР СГОРАНИЯ

АВИАЦИОННЫХ ГТД

Зависимости, показывающие, как изменяется коэффициент полноты сгорания при изменении режима работы камеры (т.е. коэффициента избытка воздуха, давления и температуры на входе в камеру) называются ***характеристикой камеры сгорания*** (по полноте сгорания). А зависимости пределов устойчивого горения (и ) от параметров потока на входе в камеру называются ***срывной характеристикой камеры сгорания***.

В связи со сложностью процессов испарения, смешения, воспламенения и сгорания, в особенности при диффузионном горении, инженерных методов расчета этих характеристик пока что не существует. Они определяются в эксперименте.

Рассмотрим вначале характеристики ***основных*** камер сгорания. На рис. приведена типовая характеристика основной камеры сгорания ***по составу смеси*** (т.е. зависимость коэффициента полноты сгорания от) при двух значениях температуры воздуха на входе в камеру. Как видно, максимальное значение достигается здесь при, а при больших и меньших значениях  коэффициент полноты сгорания заметно снижается.

|  |
| --- |
|  |
| Рисунок 4 – Типовая характеристика камеры сгорания по |

Уменьшение полноты сгорания при пониженных значениях объясняется следующими причинами. В зоне горения коэффициент избытка воздуха (при оптимальном для всей камеры значении) близок к единице. Поэтому при снижении происходит переобогащение зоны горения, в результате которого из-за недостатка кислорода топливо сгорает в ней не полностью и пары его частично выносятся в зону смешения, где из-за резкого снижения температуры горение прекращается.

При увеличении среднего для всей камеры значения зона горения обедняется. И, хотя она содержит достаточное количество кислорода для обеспечения полного сгорания, температура и соответственно скорость горения в ней падают, в результате чего часть горючей смеси не успевает прореагировать полностью в зоне горения и выносится в зону смешения, где опять из-за резкого снижения температуры горение прекращается.

***Уменьшение температуры воздуха на входе в камеру***  приводит к снижению вследствие замедления процессов испарения топлива и горения, особенно при больших отклонениях от оптимального значения.

|  |
| --- |
|  |
| Рисунок 5 – Влияние давления на  коэффициент полноты сгорания топлива |
|  |
| Рисунок 6 – Срывная характеристика камеры сгорания |

***Влияние давления воздуха на входе в камеру***. При давлениях, превышающих 120…140кПа, полнота сгорания сохраняет высокое значение. Но при давлениях, меньших 100 кПа (что может наблюдаться, например, с подъемом на высоту), полнота сгорания топлива значительно снижается. Это объясняется снижением пропорциональных чисел Re, с которыми обтекаются элементы камеры, что ведет к снижению степени турбулентности потока. В результате этого ухудшается процесс смешения паров топлива с воздухом, снижается скорость распространения пламени. Кроме того, при снижении уменьшается плотность воздуха за компрессором, а вместе с ней и расход воздуха через камеру сгорания. Соответственно снижается и расход топлива. Но перепад давления на форсунках при прочих равных условиях пропорционален квадрату расхода топлива. Поэтому уменьшение расхода топлива ведет к резкому снижению перепада давления на форсунках и качества распыла. Для улучшения качества распыла при малых расходах топлива могут применяться двухканальные форсунки с автоматическим отключением одного из каналов при малых расходах. Может вообще ограничиваться минимально допустимое значение перепада давления на форсунках.

На рис.6 показан примерный вид ***срывной*** характеристики камеры сгорания в виде зависимости пределов устойчивого горения по составу смеси (и ) от давления на входе в камеру. Как видно, диапазон устойчивой работы камеры с уменьшением давления в ней резко снижается и при устойчивое горение в ней вообще становится невозможным.

2.6.ПОТЕРИ ПОЛНОГО ДАВЛЕНИЯ В КАМЕРАХ

СГОРАНИЯ ГТД

Потери полного давления в камерах сгорания вызываются их гид­равлическим и тепловым сопротивлениями.

***Гидравлическое сопротивление***, обусловленное вязкостью воздуха и продуктов сгорания, складывается из сопротивлений диффузора, фронтового устройства и сопротивления, возникающего при прохождении через обводные каналы и смешении струй первичного и вторичного воздуха. Потери полного давления, вызванные гидравлическим сопротивлением, обычно определяются экспериментальным путем. Для камер сгорания обычно = 0.93…0.96.

***Тепловое сопротивление*** является следствием подвода теплоты к потоку газа и увеличивается с ростом скорости потока и степени его подогрева. Для выяснения его природы рассмотрим, например, изменение полного давления при подводе теплоты в изобарном процессе при отсутствии гидравлических сопротивлений (как в идеальном цикле Брайтона),

Реально в камерах сгорания ГТД давление воздушно-газового потока не остается строго постоянным, а несколько изменяется (в основном, снижается). Но природа теплового сопротивления, вызванного подводом теплоты к потоку газа в канале, остается такой же.

Тепловые потери в камере сгорания можно определить по следующей эмпирической формуле:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5) |

Где – температуры на входе в камеру сгорания и на выходе из неё соответственно, а Мк – число Маха на входе в камеру сгорания.

|  |
| --- |
|  |
| Рисунок 7 – Условная теплоемкость  процесса подвода теплоты  в камере сгорания ГТД |

Общие потери полного давления в камерах сгорания ГТД определяются суммой потерь, вызванных гидравлическим и тепловым сопротивлениями. Тогда.

2.7.ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДА ТОПЛИВА В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ

Действительный процесс горения топлива в камере сгорания сопровождается изменением как количества, так и химического состава газа, что делает за­дачу определения потребного расхода топлива сложной. Расход топлива в этом случае может быть определен по следующей формуле

|  |  |
| --- | --- |
|  | (6) |

где *с*п − условная теплоемкость процесса подвода теплоты в камере сгорания, которая должна быть определена с учетом состава продуктов сгорания, зависимости теплоемкости воздуха и продуктов сгорания от температуры и условий проведения опытов по определению теплотворности топлива. Результаты таких расчетов для случая, когда топливом является авиационный керосин и.

Они получены при условии, что значения *с*п соответствуют полному сгоранию топлива, т.е. все поправки на неполноту сгорания учитываются коэффициентом и могут быть с достаточной для инженерных расчетов точностью аппроксимированы формулой:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (7) |

3.Численный эксперимент

3.1.Математическая модель

Система уравнений газовой динамики представляет собой уравнения Навье-Стокса (RANS) в консервативной форме:

|  |  |
| --- | --- |
|  | ((8) |
|  | ((9) |
|  | ((10) |

где – статическое давление, и – молекулярная и турбулентная (полученная путем осреднения различных функционалов от мелкомасштабных пульсаций) компоненты тензора вязких напряжений, – гравитационная сила, – внешние силы, - эффективный коэффициент теплоотдачи, - диффузионный член, - источниковый член энергии.

Уравнение энергии (10), решаемое при использовании модели горения с предварительно не перемешанными горючим и окислителем в условии неадиабатичности течения, заменяется уравнением относительно полной энтальпии *H:*

|  |  |
| --- | --- |
|  | (11) |

где – удельная полная энтальпия, – удельная полная энергия газа, – удельная внутренняя энергия газа, турбулентная вязкость, =0.85.

Уравнения модели турбулентности имеют вид:

В данной системе уравнений представляет турбулентную кинетическую энергию, образованную от средних градиентов скорости.

– вклад переменного расширения турбулентности сжатия в общую скорость диссипации. Данную величину использовать при большом числе Маха, обязательно учитывается при моделировании сжимаемого идеального газа.

S – инвариант тензора деформаций.

– кинетическая энергия выталкивающей силы.

– константа, определяющая степень воздействия выталкивающей силы на

– удельная диссипация

– кинетическая энергия турбулентности

Остальные компоненты определены из экспериментов для фундаментальных турбулентных жидкостей и имеют следующие значения:

4.Моделирование предварительно не перемешанных смесей

При моделировании горения предварительно не перемешанных смесей, топливо и окислитель подаются в зону реакции по раздельным каналам. Примеры предварительно не перемешанных смесей:

* Горение метана
* Горение измельчённого угля
* Дизельные двигатели внутреннего сгорания

При некоторых допущениях термохимия может быть сведена к одному параметру – фракция смеси. Фракция смеси (f) представляет собой массовую долю, возникшую из топливного потока. Другими словами – это локальная массовая доля сгоревших и не сгоревших химических элементов (С, Н и др.). Подход простой, потому что элементы сохраняются в химических реакциях. В свою очередь, фракция смеси является постоянной скалярной величиной, и поэтому его уравнение переноса не имеет источника. Горение упрощается до решения проблемы перемешивания, а трудности, возникают с закрытием нелинейных средних скоростей реакции. После перемешивания компонентов, химию можно моделировать как в химическом равновесии или в состоянии близком к нему с моделью ламинарного пламени.

4.1.Описание фракции равновесной смеси

Моделирование предварительно не перемешанных смесей включает в себя решение уравнения переноса для одного или двух постоянных скаляров (фракции смеси). Концентрации получены из предсказанных полей фракции смеси. Вычисление термохимии предварительно обработано в prePDF и сведено в таблицу для FLUENT. Также учитывается взаимодействие турбулентности и химических реакций с функцией плотности вероятности.

4.2.Преимущества и ограничения

Подход моделирования предварительно не перемешанных смесей был разработан для моделирования турбулентного диффузионного пламени с быстрыми химическими реакциями. Non–premixed модель позволяет прогнозировать эффекты диссоциации, связь турбулентности и химии. Метод вычислительно эффективен тем, что не требует решения большого количества видов уравнения переноса. Когда основные допущения действительны, то non–premixed метод предпочтительнее, чем формулировка с конечной скоростью.

4.3.Ограничения для Non–premixed метода

1. Течение должно быть турбулентным
2. Отдельный вход топлива и окислителя
3. Другой не реагирующий поток топлива или окислителя
4. Химическая кинетика должна быть быстрой, чтобы поток был близок к химическому равновесию

4.4.Описание массовых фракций

Основой подхода, non-premixed метода, является то, что при определенном множестве упрощающих предположений, мгновенное термохимическое состояние жидкости связано с сохраняемой скалярной величиной, известной как фракция смеси f. Смесь может быть записана в виде атомных массовых долей:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (13) |

Где – элементарная массовая доля некоторого элемента i. Подстрочный индекс ox обозначает вход окислителя, а подстрочный индекс fuel – вход топлива. Если диффузионные коэффициенты одинаковы, то выражение (1) идентично для всех элементов, а определение фракции смеси является уникальным. Таким образом, фракция смеси представляет собой элементарную массовую фракцию, которая происходит из потока топлива. Обратите внимание, что эта массовая доля включает все элементы из потока топлива, включая инертные виды, такие как N2, и любые виды окисления, смешанные с топливом, такое как O2. Если вторичный поток учтён, то он представляет собой массовые доли топлива или окислителя этого потока. Сумма всех массовых долей системы (топливо, вторичный поток и окислитель) всегда равна единице:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (14) |

Это означает, что действительны только точки на плоскости ABC в пространстве фракций смеси. Из этого следует, что две массовые доли не могут изменяться независимо друг от друга. Их значения верны только в том случае, если они находятся в треугольнике ОВС.

|  |
| --- |
|  |
| Рисунок 8 – ­­­­Связь |

Доля первичной смеси может варьироваться между 0 и 1, как для случая с одной фракцией смеси, тогда как вторичная фракция смеси находится на линии:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (15) |

Где - нормированная фракция вторичной смеси и находится на пересечении линии с осью вторичной смеси.

|  |
| --- |
|  |
| Рисунок 9 – Связь |

Обратим внимание, что находится между 0 и 1, независимо от значения .

Важной характеристикой фракции нормализованной вторичной смеси, psec, является его предполагаемой статистической независимостью от топливной смеси фракции, ffuel. Обратим внимание: в отличие от fsec, psec не является сохраняемым скаляром. Определение нормированной фракции смеси для второй скалярной переменной используется везде, за исключением случаев, когда определяется богатый предел для вторичного топливного потока, который определяется в терминах fsec.

4.5.Уравнения переноса для фракции смеси

В предположении равных дифференциалов уравнения могут сводятся к одному уравнению для фракции смеси f. Хотя предположение о равномерной диффузии проблематично для ламинарных течений, оно обычно приемлемо для турбулентных потоков, где турбулентная конвекция подавляет молекулярную диффузию. Уравнение фракции смеси:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (16) |

обусловлен исключительно переносом массы в газовую фазу из жидких капель топлива или реагирующих частиц. – любой задаваемый пользователем параметр. В дополнение к решению для средней фракции смеси FLUENT решает уравнение сохранения дисперсии средней смеси

|  |  |
| --- | --- |
|  | ((17) |

Где , константы , и равны 0.85, 2.86 и 2.0 соответственно и – любой задаваемый пользователем параметр. Дисперсия фракции смеси используется в модели закрытия, описывающей взаимодействия турбулентности и химии.

Для задачи с двумя компонентами и получают из уравнения 16 и 17 путём подстановки и

получают из уравнения 16 путём подстановки , затем высчитывается из уравнения 15 и получается решая уравнение \_ с , подставленный вместо . Решение для вместо оправдано тем фактом, что количество вторичного потока относительно мала по сравнению с общим массовым расходом. В первом порядкеприближения, дисперсии в , и , относительно нечувствительны к , и поэтому по существу то же самое, что и .

Моделирование горения жидкого топлива non-premixed методом

Горение жидкого топлива может быть смоделировано non-premixed моделью. В prePDF топливный пар, который образуется при испарении жидкого топлива, определяется как поток топлива и вход окислителя (например, воздуха) композиция определяется как поток окислителя. Жидкое топливо, которое испаряется внутри домена, определяется как источник фракции топливной смеси, f, когда используется не перемешанная модель.

Внутри FLUENT определяется модель жидкого топлива обычным способом. Впуск для газофазного потока моделируется с использованием доли впускной смеси, равной нулю, а капли топлива вводятся в виде дискретно-фазных инъекций. Входы свойств для капель жидкого топлива не изменяются и должны вводиться как обычно. При вводе вида газа для испаряющейся жидкости, нужно ввести газ, как и в prePDF. Следует отметить, что, если поток топлива определялся как смесь компонентов в prePDF, следует просто выбрать один из этих компонентов в качестве испаряющиеся. FLUENT гарантирует, что испаряемая масса из жидкой капли поступает в газовую фазу в качестве источника топливной смеси, которая определена в prePDF.

4.6.Модели, описывающие химические процессы

FLUENT предоставляет три варианта описания системной химии, когда используется подход, не связанный с предварительным смешением. Эти параметры:

* Flame Sheet Approximation (перемешивание в горении) – простейшая схема реакции. Этот подход предполагает, что химия находится в бесконечно быстром и необратимом состоянии, а виды топлива и окислителя никогда не сосуществуют в космосе и не заканчиваются одноступенчатой ​​конверсией в продукты. Этот подход предполагает, что химия находится в бесконечно быстром и необратимом состоянии. Это описание позволяет определить массовые фракции видов непосредственно из данной реакционной стехиометрии без необходимой скорости реакции или информации о химическом равновесии. Это простое описание системы дает прямые связи между массовыми фракциями видов и фракцией смеси. Поскольку не требуются скорости реакции или равновесные расчеты, приближение пламенного листа легко вычисляется и дает быстрый расчет. Однако модель листа пламени ограничена предсказанием одностадийных реакций и не может предсказать промежуточные виды или диссоциации. Это часто приводит к серьезному завышению температуры пламени.
* Предположение равновесия: Модель равновесия предполагает, что химия достаточно быстрая, чтобы химическое равновесие всегда существовало на молекулярном уровне. Алгоритм, основанный на минимизации свободной энергии Гиббса, используется для вычисления мольных фракций из f. Модель равновесия является мощной, поскольку она может предсказывать образование промежуточных видов и не требует знания подробных данных о химической кинетической скорости. Вместо определения механизма многоступенчатой реакции вы просто определяете важные химические вещества, которые будут присутствовать в системе. Затем FLUENT прогнозирует мольную долю каждого вида на основе химического равновесия. FLUENT позволяет ограничить расчет полного равновесия теми ситуациями, в которых мгновенная фракция смеси ниже определенного богатого предела. В богатых топливом регионах, когда мгновенная фракция смеси превышает frich, FLUENT предполагает, что реакция горения гаснет и что несгоревшее топливо сосуществует с реагируемым материалом. В таких богатых топливом областях композиция при заданной величине фракции смеси рассчитывается из состава предельной смеси (f = frich) и состава входного потока топлива (f = 1) на основе известной стехиометрии. Стехиометрия либо предоставляется вами, либо автоматически определяется из химического равновесия на богатом лимите (f = frich). Этот подход, известный как подход с частичным равновесием, позволяет обойти сложные равновесные расчеты в области богатого пламени. Последние занимают много времени, чтобы вычислить и не могут быть репрезентативными для реального процесса горения. Когда требуется подход с полным равновесием, вы можете просто определить богатый предел как frich = 1.0. Следует отметить, что виды, включенные в расчет равновесия, вероятно, не должны включать виды NOx, так как скорости реакции NOx являются медленными и не должны обрабатываться с использованием равновесного предположения. Вместо этого концентрация NOx наиболее точно прогнозируется с использованием постпроцессора FLUENT NOx, в который включена химическая кинетика с конечной скоростью.
* Неравновесная химия (модель пламени): в моделях сжигания, где важны неравновесные эффекты, предположение о локальном химическом равновесии может привести к нереалистичным результатам. Типичные случаи, в которых ломается равновесное предположение, моделируют богатую сторону углеводородных пламен, предсказывая промежуточные видов, которые регулируют образование NOx, а также моделируют явления отрыва и сдувания в струйных пламенях. Существует несколько подходов для преодоления этих трудностей моделирования в каждом конкретном случае; в FLUENT приближение насыщенного предела частичного равновесия (описанное выше) можно использовать для моделирования богатой топливом стороны пламени углеводородов. Модели пламени были предложены как более общее решение проблемы умеренной неравновесной химики пламени.

5.Постановка задачи

Задачей курсового проекта является модельная задача горения топливовоздушной смеси в цилиндрической камере сгорания. Подача топлива осуществляется через 4 отверстия. В качестве топлива используется керосин. Расчётная область выбрана простая с целью отработки non-premixed модели горения.

Для решения поставленной задачи используется пакет программ инженерного анализа, который включает в себя модуль препроцессора, в котором задаются начальные и граничные условия и особенности моделируемого процесса решателя, в котором запрограммированы наиболее эффективные численные методы решения, а также постпроцессор, позволяющий обрабатывать полученные результаты и представлять их в наглядном виде.

Габаритные размеры для поставленной задачи представлены на рисунках ниже.

|  |
| --- |
|  |
| Рисунок 10 – Геометрия |
|  |
| Рисунок 11 – Геометрия |

Задача решена в трехмерной стационарной постановке. Расчетная сетка является неструктурированной, содержит 64 тыс. элементов ячеек.

|  |
| --- |
|  |
| Рисунок 12 – Сетка |

Задача решена в пакете Ansys с использованием граничных условий (на поверхности циилиндра заданы условия твердости стенки, включающие условия непротекания и прилипания). На входе в форсунки задан массовый расход керосина G = 0.0004 кг/c, температура топлива Т = 300К. На входной границе воздуха задан массовый расход воздуха G = 0.00001 кг/с, температура воздуха Т=680К.

Для моделирования горения использовалась модель Non-premixed combustion. В качестве топлива используется керосин.

Результаты расчёта представлены на рисунках 13-17.

|  |
| --- |
|  |
| Рисунок 13 – Распределение температуры |

|  |
| --- |
|  |
| Рисунок 14 – Распределение температуры |
|  |
| Рисунок 15 ­– Массовая доля CO2 |
|  |
| Рисунок 16 ­– Массовая доля СО2 |

|  |
| --- |
|  |
| Рисунок 17 –Массовая доля керосина |

Выводы: по результатам расчёта можно увидеть, что происходит перемешивание и горение керосина в цилиндре. Также заметен значительный рост температуры в зоне горения. Видно положение пламени и 4 зоны интенсивного горения.

6.Заключение

Поставленные цели и задачи выполнены в полном объёме. Был произведён обзор non-premixed метода горения, поставлена и решена модельная задача горения топливовоздушной смеси.

7.Список использованной литературы

1. ANSYS FLUENT 6.3. Theory Manual. 2005. Fluent Inc. Central Source Park, 10 Cavendish Court, Lebanon, NH 03766, USA;
2. Масленников М.М., Шальман Ю.Н. Авиационные газотурбинные двигатели. – М.: Машиностроение, 1975.
3. Я.А. Коркодинов.: Обзор семейства моделей для моделирования турбулентности.
4. Бирюк В.В., Горшкалёв А.А., Орлов М.Ю., Угланов Д.А.: Моделирование газодинамических течений в камере сгорания ДВС с помощью программы «FLUENT»