**«Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»**

**(БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»)**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Факультет |  | «А» |  | ракетно-космической техники |
|  |  |  |
| Кафедра |  | «А9» |  | плазмогазодинамика и теплотехника |
|  |  |  |  |  |
| Дисциплина |  | Внутренняя газодинамика энергоустановок | | |

КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

на тему

Моделирование горения в камере сгорания ГТД

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Выполнил студент группы: | | | |  | | А9М41 |
| Лаптинский А.И. | | | | | | |
|  | | | | | | |
| РУКОВОДИТЕЛЬ | | | | | | |
| к.т.н. Тетерина И.В. | |  |  | | | |
| Подпись | | | | | | |
| Оценка |  | | | |  | |
| «\_\_\_\_\_» |  | | | | 2019 г. | |

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

2019г.

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

Латинские символы:

𝐶 – теплоемкость, Дж/(кг·К);

𝐸 – энергия, Дж;

𝐹 – внешние силы;

𝑓 − переменная смешения;

ℎ − энтальпия, Дж;

𝐽 – диффузионный член;

𝑘 − кинетическая энергия турбулентности, Дж;

M – число Маха;

𝜇𝑚 – молярная масса газа, кг/моль;

𝑁 – количество химических реакций;

𝑝 − давление, Па;

𝑅 – газовая постоянная, Дж/(К·моль);

𝑆 – источниковый член;

𝑠 – тензор скоростей деформации;

𝑇– температура, К;

𝑡 – время, с;

𝑢, 𝑣, 𝑤 − компоненты вектора скорости, м/c;

𝑧 – массовая доля компонента.

Греческие символы:

𝛼 – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м2∙К);

𝛽 – коэффициент температурного расширения, 1/К;

𝜆 – теплопроводность, Вт / (м·К);

𝜏 – тензор вязких напряжений;

𝜇 – вязкость, Па⁄с;

𝜀 − скорость диссипации кинетической энергии турбулентности, м/c;

ρ – плотность, кг/м3;

𝜔 – удельная скорость диссипации кинетической энергии, м/c.

Содержание

[1. Обзор метода Non-Premixed combustion 6](#_Toc10108829)

[1.1 Взаимодействие f с массовыми долями, плотностью и температурой 6](#_Toc10108830)

[1.2. Модели, описывающие химические процессы 8](#_Toc10108831)

[1.3. Описание функции плотности 9](#_Toc10108832)

[1.4. Вывод средних скалярных значений. 10](#_Toc10108833)

[2. PDF 11](#_Toc10108834)

[2.1. Ограничения для фракций смеси 13](#_Toc10108835)

[2.2. Моделирование химического равновесия в non-premixed модели 16](#_Toc10108836)

[2.3. Данные, необходимые для постановки задачи. 18](#_Toc10108837)

[3. DPM 19](#_Toc10108838)

[3.1. Частицы в турбулентном потоке 20](#_Toc10108839)

[3.2. Ограничение на моделирование непрерывных суспензий частиц 21](#_Toc10108840)

[3.3. Обзор процедур дискретного фазового моделирования 21](#_Toc10108841)

[3.4. Вычисление траекторий 21](#_Toc10108842)

[4. Численное моделирование 23](#_Toc10108843)

[4.1. 25](#_Toc10108844)

[4.2. 25](#_Toc10108845)

[5. Постановка задачи 26](#_Toc10108846)

[5.1. Результаты расчётов 28](#_Toc10108847)

[6. Заключение 36](#_Toc10108848)

[7. СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ 37](#_Toc10108849)

# Обзор метода Non-Premixed combustion

## 1.1 Взаимодействие f с массовыми долями, плотностью и температурой

Принцип моделирования массовой доли смеси заключается в том, что химический состав сводится к одной или двум фракциям смеси. Все термохимические величины (массовая доля, плотность, температура) однозначно связаны со смесевой фракцией. Данное описание взаимодействующих систем и некоторые другие ограничения, вычисленные значения которых могут быть использованы для вычисления мгновенных значений массовых долей, плотности и температуры.

Если система адиабатическая, то мгновенные значения массовых долей, плотности и температуры зависят исключительно от мгновенной массовой доли f:

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

Если вторичный поток включен, то мгновенные значения будут зависеть от мгновенных топливных массовых долей ffuel и вторичной фракции psec:

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

В данных выражениях означает мгновенные массовые доли, плотность и температуру. В случае неадибатическиой системы — это выражение имеет вид:

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

Для одиночной массовой системы, где – мгновенная энтальпия:

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

Если вторичный поток включен, то:

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

Примеры неадибатических течений: системы с излучением, теплообменом через стенку, теплопередача от капель.

В таких неадиабатических системах турбулентные флуктуации должны учитываться с помощью совместного PDF p (f, H\*). Однако вычисление p (f, H\*) непрактично для большинства инженерных приложений. Проблема может быть значительно упрощена, если предположить, что флуктуации энтальпии не зависят от уровня энтальпии (то есть тепловые потери не оказывают существенного влияния на турбулентные флуктуации энтальпии). Когда это предполагается, мы снова имеем p = p (f) и

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

Таким образом, для определения φi в неадиабатической системе требуется решение смоделированного уравнения переноса для усредненной по времени энтальпии:

Детали взаимодействия между (массовая доля, плотность, температура) и массовой фракцией зависят от описания системы химии. Можно выбрать механизм, описывающий взаимоотношение, используя flame sheet (перемешивание в процессе горения), химическое равновесие или химическое неравновесие (flamelet) модель, что описано ниже.

## 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. Этот подход предполагает, что химия находится в бесконечно быстром и необратимом состоянии. Это описание позволяет определить массовые фракции компонентов непосредственно из данной реакционной стехиометрии без необходимой скорости реакции или информации о химическом равновесии. Это простое описание системы даёт прямые связи между массовыми фракциями компонентов и фракцией смеси. Поскольку не требуются скорости реакции или равновесные расчеты, приближение Flame Sheet легко вычисляется и дает быстрый расчет. Однако данная модель ограничена предсказанием одностадийных реакций и не может предсказать промежуточные компоненты или диссоциации. Это часто приводит к серьезному завышению температуры пламени.
* Предположение равновесия: Модель равновесия предполагает, что химия достаточно быстрая, чтобы химическое равновесие всегда существовала 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 определяются 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. Этот подход, известный как подход с частичным равновесием, позволяет обойти сложные равновесные расчеты в области богатого пламени.
* Неравновесная химия (модель пламени): в моделях горения, где важны неравновесные эффекты, предположение о локальном химическом равновесии может привести к нереалистичным результатам. 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.
  1. Описание функции плотности

Функцию плотности p(f) можно рассматривать как долю времени, которое жидкость проводит в состоянии f. На рисунке \_\_ показан этот принцип. Колеблющееся значение f построено на правой части рисунка, проводит некоторую часть времени в промежутке, обозначенном как . P(f) построено на левой части рисунка, значения подобраны так, что площадь под кривой, обозначенной , равна части времени, которую f проводит в этом промежутке. Запишем математически:

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

Где T – количество времени, которое f проводит в диапазоне. Форма функции p(f) зависит от природы турбулентных колебаний в f. На практике p(f) выражается как математическая функция, которая аппроксимирует форму PDF, которая была получена экспериментально.

* 1. Вывод средних скалярных значений.

Функция плотности p(f), описывающая колебания f в турбулентном течении обладает очень полезным свойством, которое может использоваться для вычисления усредненных по времени значений переменных, которые зависят от f. Средние по времени значения мольных долей и температуры могут быть вычислены (в адиабатических системах) как:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (8) |

Для системы фракций с одной смесью. Когда подключен вторичный поток, средние значения рассчитываются как:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (9) |

Где p1 – PDF от ffuel и p2 – PDF от psec. Здесь предполагается статистическая независимость ffuel и psec так что p(ffuel, psec)=p1(ffuel)p2(psec).

Аналогично, усредненная по времени плотность жидкости, может быть рассчитана как

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

Для системы с одной фракцией смеси:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (10) |

Для системы, где подключен вторичный поток является мгновенной плотностью, полученной с использованием мольных долей мгновенных частиц и температуры в уравнении закона газа. Уравнения 9 и 10 обеспечивают более точное описание усредненной по времени плотности, чем альтернативный подход применения закона газа с использованием усредненных по времени видов и температуры.

Используя уравнения 7 и 9, остается только указать форму функции p (f) (или p1 (ffuel) и p2 (psec)), чтобы определить локальное усредненное по времени состояние жидкость во всех точках в поле потока.

# PDF

Вид PDF описан во Fluent одной из двух математических функций:

* Double delta function
* β function

Double delta функция наиболее легко вычисляема, в то время когда β функция наиболее точно описывает экспериментальные данные в PDF. Форма, создаваемая этими функциями, зависит исключительно от средней доли смеси, и её производная . Выбор этих функций основывается на экспериментальных измерениях флуктуаций концентрации. Полное описание каждой из функций представлено ниже.

Double delta function

Получена из

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

с подходящим ограничением вблизи f = 1 и f = 0. Как отмечалось выше, PDF с двойной дельта-функцией очень легко вычислить, но она неизменно менее точна, чем PDF с альтернативной функцией. По этой причине его следует применять только в особых обстоятельствах.

The β -Function PDF

Описывается данными функциями

|  |  |
| --- | --- |
|  | (12) |

Где

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

И

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

Важно отметить, что форма PDF p(f) может быть вычислена во всех точках течения с точки зрения его первых двух моментов, а именно среднего значения, . Таким образом предсказанные Флюентом в каждой точке течения известную форму PDF можно вычислить и использовать в качестве весовой функции для определения усредненных по времени средних значений массовой доли видов, плотности и температуры. Эта логическая зависимость визуально изображена на рисунке 1 для одной фракции смеси. Если включен вторичный поток, форма PDF будет вычислена для доли топливной смеси, ffuel, и для вторичной частичной доли, psec, и порядок вычислений будет другим, как показано на рисунке 2)

* 1. Ограничения для фракций смеси

Зависимость от f требует, чтобы реагирующая система отвечала следующим требованиям:

* Химическая система должна быть диффузионного типа с дискретными входами топлива и окислителя (горение распылённых топлив тоже попадает в эту категорию)
* Число Левиса должно быть одинаковым (Из этого следует, что диффузионные коэффициенты и энтальпия для всех химических элементов одинаковы, а также должна быть хорошая аппроксимация в турбулентном потоке)
* Когда используется одиночная смесевая фракция, то должны быть выполнены следующие условия:

1. Используется только один тип топлива. Топливо может состоять из прореагировавшей смеси веществ (например, 90% CH4 и 10% СО) и можно включить несколько входов для топлива. Однако, входы для топлива должны быть с одинаковым составом топливной смеси. Запрещены два или более входа с различным составом топливной смеси (например, один вход СН4 и один вход СО). Также при горении распылённых топлив или в системах, включающих в себя реагирующие компоненты, разрешён только один выход газа.
2. Разрешён только один тип окислителя. Окислитель может состоять из нескольких компонент (например, 21% О2 и 79% N2) и разрешается несколько входов для окислителя. Состав окислителя должен быть одинаков для всех входов. Запрещается использование различных составов окислителя в одной задаче (например, один вход воздуха, а второй вход – чистый кислород).
3. В случае с двухкомпонентной смесевой фракцией, может использоваться 3 потока. Допустимые условия для задачи:
4. Два топливных потока с различным составом и одним типом окислителя. Каждый топливный поток может состоять из смеси реагирующих элементов (например, 90% СН4 и 10% СО). Разрешается использовать несколько входов для каждого топливного потока, но каждый вход топлива должен иметь один из двух типов заданных композиций топливной смеси (например, один вход для СН4 и один вход для СО)
5. Реагирующая система включает в себя: газ-жидкость, газ-уголь или жидкость-уголь, при одном типе окислителя. В газ-угольных системах или жидкостно-угольных, летучие вещества угля рассматриваются как одиночный топливный поток.
6. Два потока окислителя с различным составом и один топливный поток. Каждый поток окислителя может состоять из смеси компонент (например, 21% О2 и 79% N2). Разрешается раздельная подача каждого компонента, но каждый вход окислителя должен состоять только из одного из компонент (например, один вход воздуха и второй вход с чистым кислородом).
7. Топливный поток, поток окислителя и нереагирующий вторичный поток.
8. Течение должно быть турбулентным.

Важно отметить, что эти ограничения исключают использование подхода без предварительного смешивания для непосредственного моделирования процесса предварительного смешивания. Потому что не горящие перемешанные топливные потоки далеки от химического равновесия.

На рисунках показаны типичные реагирующие системы, которые могут быть обработаны non-premixed моделью Fluent’a. Рисунок 3 показывает состав, который не может быть использован в non-premixed модели.

|  |
| --- |
|  |
| Рисунок 1 – Химические системы, которые могут быть смоделированы, используя одиночную смесь |

|  |
| --- |
|  |
| Рисунок 2 – Химические системы, которые могут быть смоделированы, используя двух смесевую модель |

|  |
| --- |
|  |
| Рисунок 3 – Система, которая не может быть смоделирована |

* 1. Моделирование химического равновесия в non-premixed модели

Fluent имеет два подхода для моделирования химического равновесия. Можно выбрать одну или двух компонентную смесь в зависимости от того сколько потоков в задаче. prePDF хранит информацию о потоках в “look-up tables”, которые потом используются Fluent’ом для нахождения массовой фракции, энтальпии и скалярных величин.

Одиночная смесевая фракция

Чтобы сократить вычислительное время до минимума, многие решатели требуют написание химических реакций вне FLUENT’a, которые потом импортируются в него. В prePDF химическая модель используется в сочетании с принятой формой PDF, чтобы выполнить итерации, описанные в выражениях 7, 9. Эти интеграции выполняются в prePDF и хранятся в look-up tables, которые относятся к главным термохимическим значениям (температура, плотность и массовые фракции) к значениям f, f’2 и H\*. Заметим, что дисперсия взвешенной фракции смеси используется для табулирования, где f02 s определяется как

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

Двухсмесевая фракция

Для двух смесевых фракций (включен вторичный поток) препроцессор высчитывает мгновенные значения температуры, плотности и массовых фракций и сохраняет их в look-up tables. Для адиабатических задач с двумя смесевыми фракциями look-up tables сохраняет как функции смесевых фракций и вторичную частичную фракцию. Для неадиабатических задач с двумя смесевыми фракциями 3D look-up table сохраняет физические свойства как функции смесевых фракций, вторичный поток и мгновенную энтальпию.

P1 и p2 смесевой фракции рассчитываются непосредственно во Fluent’e из значений решённых смесевых фракций и их производных. Интеграции PDF для вычисления средних значений для свойств также выполняются внутри Fluent. Мгновенные значения взяты из look-up tables.

Стоит отметить, что вычислительное время fluent для двух смесевых фракций будет намного больше, чем для односмесевых фракций, поскольку интеграция в PDF выполняется во FLUENT, а не в prePDF. Эти затраты должны быть тщательно рассмотрены, прежде чем выбрать модель с двумя смесями. Кроме того, обычно целесообразно начинать симуляцию с двумя фракциями из конвергентного раствора с одной фракцией смеси.

Химия в этом методе описывается одним параметром - массовая доля смеси, подробной кинетики нет, т.к. используется приближение о быстрой химической реакции. Поскольку вероятностная функция плотности сообщает нам, сколько времени жидкость проводит в каждом состоянии, средние величины (такие как средняя скорость реакции) могут быть вычислены из PDF как среднее значение для всех состояний. Решено из производного уравнения переноса.

* 1. Данные, необходимые для постановки задачи.

Для одиночных смесевых фракций нужно сделать следующие шаги:

* Определить химические вещества, которые будут учитываться в модели, выбрать описание системы. Условие химического равновесия должно использоваться всегда. Если при моделировании задачи решение с помощью метода химического равновесия не может быть получено, а альтернативные компоненты не подходят, то нужно выбрать модель бесконечно быстрой химической реакции.
* Указать тип системы (адиабатическая или нет)
* Выбрать PDF (вероятностная плотностаня функция) которая будет использоваться для описания турбулентностных колебаний.
* Сгенерировать справочную таблицу, содержащую средние значения массовых долей компонентов, значения массовых фракций и энтальпию. Содержимое этой справочной таблицы будет отражать ваши предыдущие входные данные, описывающие реагирующую систему.

Справочные таблицы – отображение значений, введённых в prePDF. Это сохраненный результат интеграции уравнений 7 и 9. Справочные таблицы будут использованы флюентом для определения массовых долей компонентов, плотности и температуры из значений массовых фракций (f), смесевой фракции (f’2) и энтальпии (H\*)

1. DPM

Помимо решения транспортных уравнений для непрерывной фазы Fluent позволяет моделировать дискретную вторичную фракцию в Лагранжевой постановке. Вторичная фаза содержит сферические частицы (которые могут быть взяты, чтобы смоделировать капли или пузыри) рассеянные в непрерывной фазе. Fluent высчитывает траектории дискретных фазовых объектов, а также тепломассоперенос к ним. Связь между фазами и ее влияние как на дискретные фазовые траектории, так и на непрерывный фазовый поток могут быть включены. FLUENT предоставляет следующие варианты дискретного фазового моделирования:

* Вычисление траектории для дискретной фазы, используя Лагранжевую постановку, которая включает в себя инерцию, гидродинамические силы и силу притяжения, для стационарных и нестационарных потоков.
* Прогнозирование эффектов турбулентности распылённых частиц из-за турбулентных вихрей, присутствующих в непрерывной фазе
* Нагрев/охлаждение дискретной фазы
* Испарение и кипение жидких капель
* Горение частиц, для моделирования сгорания угля
* Распад и слияние капель

Эти допущения позволяют Fluent моделировать большое количество задач, связанных с дискретной фазой, включая распад и слияние частиц, распыление аэрозоля, перемешивание пузырьков жидкостей, сжигание жидкого топлива и угля. Физические уравнения, используемые для моделирования описаны ниже.

* 1. Частицы в турбулентном потоке

Дисперсия частиц из-за турбулентности в жидкой фазе может быть предсказана с использованием модели стохастического отслеживания или модели облака частиц. Стохастическое отслеживание включает эффект мгновенной турбулентной флуктуации скорости на траекториях частиц с помощью стохастических методов. Модель облака частиц отслеживает статистическую эволюцию облака частиц относительно средней траектории. Концентрация частиц в облаке представлена гауссовой функцией плотности вероятности относительно средней траектории. В обеих моделях частицы не оказывают непосредственного влияния на генерацию или рассеяние турбулентности в непрерывной фазе.

Ограничение на долю объема частиц

Формулировка дискретной фазы содержит предположение, что вторичная фаза достаточно разбавлена для взаимодействия частиц и эффектов и влияние объемной доли частиц на газовую фазу незначительно. На практике эти задачи подразумевают, что дискретная фаза должна быть представлена при довольно низкой объёмной доле, обычно меньше, чем 10-12%. Стоит отметить, что масса нагрузки дискретной фазы может значительно превышать 10-12%: Вы можете решить проблемы, в которых массовый расход дискретной фазы равен или превышает поток непрерывной фазы.

* 1. Ограничение на моделирование непрерывных суспензий частиц

Лагранжева дискретная фазовая модель стационарных частиц подходит для потоков, в которых потоки частиц вводятся в непрерывный фазовый поток с четко определенными условиями входа и выхода. Лагранжева модель не позволяет эффективно моделировать потоки, в которых частицы подвешены на неопределенное время в континууме, как это происходит в твердых суспензиях в закрытых системах, таких как резервуары с мешалкой, сосуды для смешивания, или псевдоожиженные слои. Однако модель дискретной фазы нестационарных частиц способна моделировать непрерывные суспензии частиц.

* 1. Обзор процедур дискретного фазового моделирования

Можно включить дискретную фазу в модель FLUENT, определив начальное положение, скорость, размер и температуру отдельных частиц. Эти начальные условия, наряду с входными данными, определяющими физические свойства дискретной фазы, используются для инициирования расчетов траектории и тепломассопереноса. Расчеты траектории и тепломассопереноса основаны на балансе сил на частице и на конвективном / радиационном тепломассопереносе от частицы с использованием условий локальной непрерывной фазы, когда частица движется в потоке.

Прогнозируемые траектории и связанный с ними тепломассоперенос можно рассматривать графически и/или численно. Можно использовать FLUENT для прогнозирования дискретных фазовых диаграмм на основе фиксированного поля непрерывного фазового потока (несвязанный подход).

* 1. Вычисление траекторий

Силовой баланс

Fluent прогнозирует траектории частиц интегрированием уравнения силового баланса частицы, которая записана в Лагранжевой постановке. Этот баланс сил приравнивает инерцию частицы к силам, действующим на частицу, и может быть записан (для х координаты в картезиановых координатах) как:

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

Где сила сопротивления на единицу массы частиц и

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

u – Скорость потока, – скорость частицы, – молекулярная вязкость жидкости, – плотность жидкости, – плотность частицы, – диаметр частицы. Re – число Рейнольдса, который записывается:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (18) |

Коэффициент может быть вычислен из выражения:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (19) |

– константы, которые применяются для гладких сферических частиц в нескольких диапазонах Re.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (20) |

Где

|  |  |
| --- | --- |
|  | (21) |

Фактор формы определяется:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (22) |

s – площадь поверхности сферы, имеющей такой же объем, что и частица, S – площадь поверхности частицы. Для субмикронных частиц доступна форма закона сопротивления Стокса. В этом случае определяется как

|  |  |
| --- | --- |
|  | (23) |

|  |  |
| --- | --- |
|  | (24) |

– средняя длина свободного пробега молекулы.

1. Численное моделирование

Математическая модель

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

|  |  |
| --- | --- |
|  | ((25) |
|  | ((26) |
|  | ((27) |

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

|  |  |
| --- | --- |
|  | (28) |

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:

## 

Уравнения модели турбулентности имеют вид:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (30) |

– представляет генерацию

– представляет генерацию кинетической энергии турбулентности из-за градиентов средней скорости

– представляют собой эффективный коэффициент диффузии

– представляют собой диссипацию

– пользовательские данные

## 

Уравнения модели турбулентности имеют вид:

– представляет генерацию

– представляет генерацию кинетической энергии турбулентности из-за градиентов средней скорости

– представляют собой эффективный коэффициент диффузии

– представляют собой диссипацию

– пользовательские данные

1. Постановка задачи

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.

Целью данной работы является: построение 3D модели камеры сгорания и сравнение наиболее популярных моделей турбулентности, используемых при расчёте горения, и выбор наиболее оптимальной.

Габаритные размеры для поставленной задачи представлены на рисунках ниже.

|  |
| --- |
|  |
| Рисунок 4 – Геометрия |

Задача решена в трехмерной стационарной постановке. Расчетная сетка является неструктурированной, тетраэдальной, содержит 1200000. элементов ячеек.

|  |
| --- |
|  |
| Рисунок 5 – Сетка |

Задача решена в пакете Ansys с использованием граничных условий (на поверхности камеры сгорания заданы условия твердости стенки, включающие условия непротекания и прилипания). На входе в форсунку задан массовый расход керосина G = 0.15 кг/c, температура топлива Т = 300К. На входной границе воздуха задан массовый расход воздуха G = 1.5 кг/с, температура воздуха Т=300К, диаметр капель керосина d=1е-6 м.

Для моделирования горения использовалась модель Non-premixed combustion. Течение является адиабатическим. Интенсивность турбулентности 1%. В качестве топлива используется керосин.

* 1. Результаты расчётов

Результаты расчётов с использованием SST модели турбулентности представлены на рисунках 6 – 9:

|  |
| --- |
|  |
| Рисунок 6 – Распределение температуры |

|  |
| --- |
|  |
| Рисунок 7 – Распределение массовой доли керосина |
|  |
| Рисунок 8 – Распределение скорости |
|  |
| Рисунок 9 – Распределение массовой доли О2 |

По результатам расчёта можно увидеть, что происходит перемешивание и горение керосина в камере сгорания. Также заметен значительный рост температуры в зоне горения. Видно положение пламени и зону интенсивного горения.

Модель турбулентности обеспечивает равномерность распределения топлива, окислителя и продуктов сгорания.

Результаты расчётов с использованием модели турбулентности представлены на рисунках 10 – 14:

|  |
| --- |
|  |
| Рисунок 10 – Температура |
|  |
| Рисунок 11 – Распределение массовой доли керосина |
|  |
| Рисунок 12 – Распределение массовой доли СО2 |
|  |
| Рисунок 13 – Распределение скорости |
|  |
| Рисунок 14 – Распределение О2 |

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 зону интенсивного горения.

Результаты расчётов с использованием standart модели турбулентности представлены на рисунках 15 –19

|  |
| --- |
|  |
| Рисунок 15 – Распределение температуры |
|  |
| Рисунок 16 – Массовая доля керосина |
|  |
| Рисунок 17 – Распределение СО2 |
|  |
| Рисунок 18 – Распределение скорости |
|  |
| Рисунок 19 – Распределение О2 |

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 зону интенсивного горения.

1. Заключение

Поставленные цели и задачи выполнены в полном объёме. Был дополнен обзор non-premixed метода горения, DPM модели, поставлена и решена модельная задача горения топливовоздушной смеси в камере сгорания ГТД, сравнены 3 модели турбулентности и выбрана оптимальная модель для дальнейшей работы и сравнением с экспериментом (верификация модели).

По рисункам, представленным выше, следует, что оптимальная модель турбулентности – SST, т.к. она обеспечивает равномерное распределение компонентов топлива, окислителя и продуктов сгорания. Также данная модель является наиболее экономичной.

В дальнейшем планируется составление рекомендаций по выбору моделей турбулентности для решения задач моделирования горения в камерах сгорания.

1. СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
2. ANSYS FLUENT 6.3. Theory Manual. 2005. Fluent Inc. Central Source Park, 10 Cavendish Court, Lebanon, NH 03766, USA;
3. Масленников М.М., Шальман Ю.Н. Авиационные газотурбинные двигатели. – М.: Машиностроение, 1975;
4. Я.А. Коркодинов.: Обзор семейства моделей для моделирования турбулентности.