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

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

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Факультет |  | А |  | Ракетно-космической техники |
|  |  | шифр |  | наименование |
| Кафедра |  | А9 |  | Плазмогазодинамика и теплотехника |
|  |  | шифр |  | наименование |
| Дисциплина |  | Внутренняя газодинамика энергоустановок | | |

КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

на тему

Моделирование процессов горения в камере сгорания воздушно-реактивного двигателя

|  |
| --- |
|  |

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Выполнил студент группы | | | |  | | А9М41 |
| Вихрова И.А. | | | | | | |
| Фамилия И.О. | | | | | | |
| **РУКОВОДИТЕЛЬ** | | | | | | |
| Брыков Н.А. | |  |  | | | |
| Фамилия И.О. Подпись | | | | | | |
| Оценка |  | | | |  | |
| «\_\_\_\_\_» |  | | | | 20\_\_\_\_ г. | |

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

2019 г.

СОДЕРЖАНИЕ

|  |  |
| --- | --- |
| СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ…………………………………... | 3 |
| ВВЕДЕНИЕ……………………………………………………………………. | 5 |
| 2 Математическая модель…………………………………………………….. | 6 |
| 2.1 Уравнения RANS………………………………………………………….. | 6 |
| 2.2 Модели турбулентности………………………………………………….. | 8 |
| 2.2.1 Модель Standart…………………………………………………… | 8 |
| 2.2.2 Модель RNG (Re –Normalisation Group) ……………………….. | 9 |
| 2.2.3 Модель Realizable………………………………………………… | 11 |
| 2.2.4 Модель ………………………….. | 12 |
| 2.3 Модель горения Non-Premixed Equilibrium……………………………... | 14 |
| 2.4 Вывод………………………………………………………………………. | 17 |
| 3 Постановка задачи…………………………………………………………... | 18 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ……………………………………………………………….. | 28 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ…………………………. | 29 |

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

Латинские символы:

*–* теплоемкость, Дж/(кг·К);

– энергия, Дж;

– внешние силы;

переменная смешения;

энтальпия, Дж;

*–* диффузионный член;

кинетическая энергия турбулентности, Дж;

– число Маха;

 – молярная масса газа, кг/моль;

– количество химических реакций;

давление, Па;

– газовая постоянная, Дж/(К·моль);

– источниковый член;

– тензор скоростей деформации;

– температура, К;

– время, с;

компоненты вектора скорости, м/c;

– массовая доля компонента.

Греческие символы:

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

– коэффициент температурного расширения, 1/К;

–  теплопроводность, Вт / (м·К);

𝜏 – тензор вязких напряжений;

– вязкость, ;

скорость диссипации кинетической энергии турбулентности, м/c;

*ρ* – плотность.

– удельная скорость диссипации кинетической энергии, м/c.

ВВЕДЕНИЕ

Воздушно-реактивный двигатель (ВРД) относится к классу двигателей, в которых тяга создается за счёт реактивной струи, истекающей из сопла. В ВРД для сжигания горючего используется кислород, который содержится в атмосферном воздухе. Воздух, поступая в воздухозаборник двигателя со скоростью полёта, проходя через ряд скачков уплотнения, затормаживается, в результате его [кинетическая энергия](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%B8%D0%BD%D0%B5%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F_%D1%8D%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%B8%D1%8F) преобразуется во [внутреннюю энергию](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%BD%D1%83%D1%82%D1%80%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F%D1%8F_%D1%8D%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%B8%D1%8F), а температура и давление повышаются.

В работе рассматривается равномерный прямолинейный поток воздуха, давление и температура которого определяются воздухозаборником. Вообще воздух является многокомпонентным газом, но есть преобладающие компоненты, такие, как – азот и кислород. Поэтому в работе воздух принимается, как двухкомпонентный газ.

Так же рассматривается однокомпонентное подогретое горючее, которое поступает в камеру сгорания двигателя через форсунки в виде капель, проходя предварительно через какой-либо охладительный элемент (например, охладитель стенок летательного аппарата), забирая часть энергии и тепла.

По итогу в камере сгорания происходит смешение компонентов, их нагрев, газификация и горение. В работе исследуется газодинамика и процессы горения в камере сгорания.

2 Математическая модель

Для численного моделирования рассматриваемых явлений, объединяющих процессы смешения, горения и газодинамики, необходимо составить математическую модель, учитывающую эффекты этих процессов.

2.1 Уравнения RANS

В основе моделирования – осредненные уравнения Навье-Стокса для сжимаемого совершенного газа (знаки осреднения опущены), которые представлены в системе (1) и состоят из уравнений сохранения массы, импульса и энергии.

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

где  – вектор скорости осредненного течения с компонентами  – молекулярная и турбулентная составляющие тензора вязких напряжений,   – полная энергия газа,   – его полная энтальпия,  – температура,  – удельная теплоемкость газа при постоянном объеме,  – удельная теплоемкость газа при постоянном давлении, – газовая постоянная, – гравитационная сила, – внешние силы, – эффективный коэффициент теплоотдачи, – диффузионный член, – энтальпия образования компонента, – источниковый член энергии (позволяет учесть процесс образования и поглощения тепловой энергии).

При моделировании потока воздуха необходимо учитывать его многокомпонентность Уравнение изменения концентрации *i*-ой компоненты смеси записывается в следующем виде:

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

где – диффузионный поток *i*-ой компоненты, – скорость образования *i*-й компоненты за счет наличия дополнительных источников, – скорость образования *i*-й компоненты в химических реакциях, определяется по формуле (3).

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

где – мольная масса *i*-й компоненты смеси, – количество химических реакций, – мольная скорость образования/распада *i*-й компоненты в реакции , вычисленная по уравнению (4) химической кинетики скорости образования *i*-ой компоненты в ходе неравновесной химической реакции:

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

где – коэффициент, учитывающий влияние третьих тел на скорость химических реакций, – показатель степени для продукта в реакции ,  – стехиометрический коэффициент для реагента в реакции , – константы скорости прямой и обратной реакций соответственно, – мольная концентрация компонента в реакции , – показатель степени для реагента в реакции , – эффективность компонента в реакции как третьего тела.

Константы скорости прямой и обратной реакций вычисляются по закону Аррениуса:

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

2.2 Модели турбулентности

Определим связь между турбулентными напряжениями и параметрами осредненного течения. Эту связь определяют с помощью различных моделей турбулентности. В этих моделях принимаются определенные допущения, на основе которых вводится недостающее число уравнений, что позволяет найти все неизвестные.

2.2.1 Модель Standart

В пакете ANSYS Fluent уравнения стандартной модели представлены в следующем виде:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (6) |
|  | (7) |

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| В данной системе уравнений – удельная диссипация; – кинетическая энергия турбулентности, – представляет турбулентную кинетическую энергию, образованную от средних градиентов скорости, которую можно выразить по формуле:   |  |  | | --- | --- | |  | (8) |   Где   |  |  | | --- | --- | |  | (9) |   где – плотность газа, , – кинетическая энергия выталкивающей силы,   |  |  | | --- | --- | |  | (10) |   где – турбулентная постоянная Прандтля для энергии, – компонента вектора гравитации в *i*-м направлении; – коэффициент температурного расширения,   |  |  | | --- | --- | |  | (11) |   где – температура. – константа, определяющая степень воздействия выталкивающей силы на , для слоев жидкости, для которых направление скорости жидкости параллельно вектору гравитации, для слоев жидкости, для которых направление скорости жидкости перпендикулярно вектору гравитации. – вклад переменного расширения при турбулентности сжатия в общую скорость диссипации, которая находится по формуле (12). Данную величину следует учитывать при большом числе Маха. Ее обязательно учитывать, когда моделируется сжимаемый идеальный газ.   |  |  | | --- | --- | | , | (12) |   где – число Маха для турбулентной жидкости,   |  |  | | --- | --- | |  | (13) |   где скорость звука, .  Остальные константы определены из экспериментов для фундаментальных турбулентных жидкостей и имеют следующие значения: , , , , . |

2.2.2 Модель RNG (Re –Normalisation Group)

Модель имеет схожую форму со стандартной моделью , но включает в себя следующие улучшения:

1. имеет дополнительный член в уравнении для , который улучшает точность вычислений для жидкостей с высокими скоростями деформаций;
2. в модели учтено влияние завихренности на турбулентность, что увеличивает точность для высокозавихренных жидкостей;
3. данная теория предлагает аналитические формулы для турбулентных чисел Прандтля, тогда как стандартная модель использует заданные пользователем постоянные значения;
4. данная модель предлагает аналитически полученные формулы для эффективной вязкости, которая предназначена для жидкостей с низкими числами Рейнольдса.

Улучшения делают RNG модель более точной и надежной, позволяя эффективно применять ее для более широкого класса жидкостей по сравнению со стандартной моделью

Уравнения RNG модели имеют следующий вид:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (14) |
|  | (15) |

где , – обратные эффективные числа Прандтля для и соответственно, – эффективная вязкость. Данная вязкость приблизительно равна из стандартной модели для высоких чисел Рейнольдса. Для низких чисел Рейнольдса создателями модели предлагается дополнительное дифференциальное уравнение, позволяющее более точно вычислить .

Величины, входящие в эту модель рассчитываются из приведённых ниже уравнений:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (16) |
|  | (17) |

Константы модели

.

2.2.3 Модель Realizable

По сравнению со стандартной моделью данная модель имеет два существенно важных отличия:

1. реальная модель содержит альтернативную формулировку для турбулентной вязкости;
2. модифицированное уравнение переноса для скорости диссипации было получено из точного уравнения для переноса среднеквадратичных колебаний завихренности.

Данная модель удовлетворяет точным математическим ограничениям по напряжениям Рейнольдса, вытекающим из физики турбулентной жидкости.

Реальная модель учитывает недостатки других моделей с помощью следующих улучшений: во-первых, предлагается новая формула для определения турбулентной вязкости, первоначально предложенная еще Рейнольдсом; во-вторых, используется новое уравнение для диссипации , основанное на динамическом уравнении среднеквадратичных колебаний завихренности.

Ограничением является то, что можно получить нефизичные турбулентные вязкости в ситуациях, когда вычислительная область содержит как зоны с турбулентностью, так и зоны со стационарной жидкостью.

Уравнения реальной модели имеют следующий вид:

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

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

При этом

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

В реальной модели уравнение для такое же, как и в стандартной модели. В то же время уравнение для отличается существенно. Одной положительной чертой является то, что правая сторона уравнения для не содержит .

В данной модели является функцией средней скорости вращения и средней скорости деформаций, угловой скорости и переменных турбулентности и . Остальные константы имеют следующие значения: , , = 1,0, = 1,2 [1].

2.2.4 Модель

SST модель является некой комбинированной моделью турбулентности, основанной на использовании модели в пристеночных областях и модели в областях, находящихся на достаточном удалении от стенки. Этот комбинированный метод заключается в преобразовании уравнений модели к формулировке. Уравнения видоизмененной модели, дополняются стыковочной функцией . Функция принимает значение вблизи поверхности и обращается в ноль за пределами пограничного слоя, то есть на линии границы пограничного слоя и за его пределами модель возвращается к первоначальной, стандартной формулировке.

Для преобразования уравнений стандартной – модели к уравнениям в формулировке существует формула

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

где – удельная скорость диссипации кинетической энергии.

Откуда

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

Подставляя, эти формулы в уравнения стандартной модели получаются:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (23) |
|  | (24) |

где числовые константы равны: *, ,.*

Основная идея SST модели турбулентности состоит в том, что с помощью стыковочной функции получается линейная комбинация уравнений из модели и уравнений из преобразованной стандартной модели турбулентности :

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

где коэффициенты новой модели – линейная комбинация соответствующих коэффициентов моделей, лежащих в основе метода:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (28) |
|  | (29) |

Стыковочная функция в модели Ментера строится таким образом, чтобы наиболее адекватно учитывать перенос напряжения трения в пограничном слое [2].

2.3 Модель горения Non-Premixed Equilibrium

В качестве модели горения используется Non-Premixed Equilibrium Model, подразумевающую горение без предварительного смешивания. С учетом этой модели топливо и окислитель попадают в зону реакции в виде отдельных потоков (диффузионное горение), в отличие от предварительно смешанного горения, в котором реагенты смешиваются на молекулярном уровне перед сжиганием. Одним из допущений этой модели – является равенство единице числа Льюиса, которое определяется как отношение коэффициента температуропроводности к коэффициенту диффузии. Так же эта модель работает при низких числах Маха.

При этих допущениях уравнение переноса компонентов можно свести к одному уравнению – переноса переменной смешения (), определяемой по формуле:

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

где – массовая доля *i*-го элемента, индекс «ок» и «т» – массовая доля *i*-го элемента окислителя и топлива, соответственно.

Переменная смешения привязана не к отдельным компонентам (CO2, H2O и т.д.), а к атомам (С, O, H и т.д.). При химической реакции компоненты меняются, а атомы нет, поэтому атомный состав остается постоянным. Переменная смешения сохраняется постоянной скалярной величиной без источников. Источники появляются только в том случае, если моделируется испарение газообразных компонентов.

Уравнение переноса осредненное по Фавру выглядит так:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (31) |

где =0,85, – турбулентная вязкость.

При химическом равновесии все скаляры (, и ) зависят только от переменной смешения (). Если пламя неадибатное, то скаляры так же зависят от энтальпии ():

1. Адиабатное пламя: ,
2. Неадиабатное пламя: .

В турбулентном течении все скаляры претерпевают определенные флуктуации, которые можно учитывать с помощью функции плотности вероятности . Существует две разновидности *β* – функция и двойная – функция. Чаще используется *β* – функция, которая зависит от математического ожидания и дисперсии.

Поэтому требуется сформулировать уравнение переноса дисперсии переменной смешения:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (32) |

где = 2,86, = 2, –  ламинарная теплопроводность смеси,  – характеризует пологость графика распределения функции плотности вероятности, то есть, чем больше дисперсия, тем более пологим будет график слева на рисунке 1. Если дисперсия равна нулю, то функция плотности вероятности вырождается в единственный пик.

|  |
| --- |
|  |
| Рисунок 1 – Зависимость плотности вероятности от математического ожидания |

Интерес при решении представляют осредненные значения массовых долей компонентов или температуры, при использовании этой модели производится интегрирование по функции плотности вероятности:

|  |  |
| --- | --- |
| . | (33) |

Алгоритм расчета по данной модели представлен на рисунке 2 и состоит в следующем:

1. Сначала определяются параметры химического равновесия, то есть зависимость концентрации каждого компонента от переменной смешения, то же самое делается для температуры;
2. Во – вторых, есть функция плотности вероятности, которая зависит от переменной смешения и дисперсии;
3. В совокупности эти два пункта дают интеграл, в результате решения которого получается осредненные значения скалярных величин.

|  |
| --- |
|  |
| Рисунок 2 – Схема расчета модели горения Non-Premixed Equilibrium |

Средние значения для определенной химической модели и функции плотности вероятности можно занести в справочную таблицу и при необходимости обращаться к ней в процессе расчета.

Недостатком Non-Premixed Model является то, что она не учитывает неравновесность и химическую кинетику. В реальных случаях турбулентность в результате растяжений и деформаций влияет на структуру пламени, в свою очередь растяжения и деформации влияют на градиенты компонентов и температуры поперек фронта пламени, на время достижения химического равновесия и т.д. [3].

2.4 Вывод

Таким образом, составлена математическая модель, позволяющая исследовать процессы, протекающие в камере сгорания двигателей летательных аппаратов. Модель основывается на решении уравнений RANS для многокомпонентного потока с использованием высокорейнольдсовых моделей турбулентности.

3 Постановка задачи и анализ результатов

В работе решается трехмерная задача о смешении и горении топливной смеси (керосин – воздух) в камере сгорания реактивного двигателя. Расчётная область представляет собой камеру сгорания (рисунок 3), с геометрическими размерами, показанными на рисунке 4. Поток воздуха (состоящий из 77 % азота, 23 % кислорода) при температуре 350 К с массовым расходом 1,2 кг/с поступает в камеру сгорания ВРД через входное сечение, где смешивается с керосином (C12H23), который впрыскивается в камеру через форсунки при температуре 450 К с массовым расходом 0,15 кг/с. Далее происходит смешение горючего с окислителем и последующее горение этой смеси. Продукты сгорания выходят через выходное отверстие. На рисунке 5 представлена декомпозиция расчетной области.

|  |
| --- |
| https://pp.userapi.com/c844416/v844416490/1e308e/mX8EYVbObvQ.jpg |
| Рисунок 3 – Форма камеры сгорания |

|  |
| --- |
| https://pp.userapi.com/c844416/v844416490/1e308e/mX8EYVbObvQ.jpg |
| Рисунок 4 – Геометрия с характерными размерами |

|  |
| --- |
| https://pp.userapi.com/c844720/v844720013/1d8c73/qVtUXQ0p22k.jpg |
| Рисунок 5 – Расчетная сетка |

Моделирование горения керосина в воздухе произведено с применением модели Non-Premixed и разных моделей турбулентности:

1) SST (Shear Stress Transport) модель;

2) Standart модель;

3) Realizable модель;

4) RNG (Re –Normalisation Group) модель.

На рисунке 6 представлены картины распределения скорости с применением разных моделей, анализируя которые, можно сказать, что при использовании модели RNG за ступенькой образуются завихрения, чего нет при применении других моделей.

|  |  |
| --- | --- |
| Standart_V.png | SST_V.png |
| a) | b) |
| RNG_V.png | Real_V.png |
| c) | d) |
| Рисунок 6 – Картины распределения скорости по камере сгорания с применением разных моделей (а – Standart, b – SST, c – RNG, d – Realizable) | |

Сравнение различных моделей турбулентности на результат расчёта теплового поля представлены на рисунке 7 и 8. Анализируя данные картины можно сказать, что происходит смешивание керосина с воздухом и последующее горение этой смеси с выделением тепла. Максимальная температура равна 2200 К.

|  |  |
| --- | --- |
| Standart_T_0.35.png | SST_T_0.35.png |
| a) | b) |
| RNG_T_0.35.png | Real_T_0.35.png |
| c) | d) |
| Рисунок 7 – Картины распределения температуры по камере сгорания с применением разных моделей (а – Standart, b – SST, c – RNG, d – Realizable)  По картине распределения температуры с использованием модели RNG, заметно, что горение происходит неравномерно. Также можно увидеть, что при применении модели Realizable интенсивность горения и температура на выходе меньше, чем при применении других моделей. С использованием модели SST происходит равномерное горение. | |
| Standart_T_poperek.png | SST_T_poperek.png |
| a) | b) |
| RNG_T_poperek.png | Real_T_poperek.png |
| c) | d) |
| Рисунок 8 – Картины распределения температуры по камере сгорания с применением разных моделей (а – Standart, b – SST, c – RNG, d – Realizable) | |

На рисунке 10 показаны графики распределения концентраций различных компонентов по линии, проходящей посередине камеры сгорания и показанной на рисунке 9. По данным графикам видно, что в ходе реакции горения керосина в воздухе образуются различные вещества, такие, как CO2 и H2O.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| line2.png | | |
| Рисунок 9 – Геометрия с средней линией | | |
| Standart_Mass Fraction_0.35.png | SST_Mass Fraction_0.35.png |
| a) | b) |
| SST_Mass Fraction_0.15.png | |
| RNG_Mass Fraction_0.35.png | Real_Mass Fraction_0.35.png |
| c) | d) |
| Рисунок 10 – Графики распределения концентраций компонентов с применением разных моделей (а – Standart, b – SST, c – RNG, d – Realizable) | |

Так же в работе исследуется влияние изменения температуры воздуха на распределение параметров потока по длине камеры сгорания.  
Начальные условия второй задачи точно такие же, как и в первой, отличие только в температуре потока воздуха, здесь температура равна 250 К.

На рисунке 11 представлены картины распределения скорости с применением разных моделей. По данным картинам видно, что при применении модели Standart образуются сильные вихри.

|  |  |
| --- | --- |
| Standart_V.jpg | SST_V.png |
| a) | b) |
| RNG_V.png | Real_V.png |
| c) | d) |
| Рисунок 11 – Картины распределения скорости по камере сгорания с применением разных моделей (а – Standart, b – SST, c – RNG, d – Realizable)  Картины распределения температуры по длине камеры показаны на рисунках 12 и 13. Видно, что при изменении температуры потока воздуха, характер течения при применении разных моделей меняется. Наиболее, это заметно по картине с применением модели Standart. | |
| Standart_T_0,35.png | SST_T_0.35.png |
| a) | b) |
| RNG_T_0.35.png | Real_T_0.35.png |
| c) | d) |
| Рисунок 14 – Картины распределения температуры по камере сгорания с применением разных моделей (а – Standart, b – SST, c – RNG, d – Realizable) | |

|  |  |
| --- | --- |
| Standart_T_poperek.png | SST_T_poperek.png |
| a) | b) |
| RNG_T_poperek.png | Real_T_poperek.png |
| c) | d) |
| Рисунок 15 – Картины распределения температуры по камере сгорания с применением разных моделей (а – Standart, b – SST, c – RNG, d – Realizable) | |

На рисунке 16 показаны графики распределения концентраций различных компонентов по линии, показанной на рисунке 7.

|  |  |
| --- | --- |
| Standart_MassFraction_0.35.png | SST_MassFraction_0.35.png |
| a) | b) |
| SST_Mass Fraction_0.15.png | |
| RNG_MassFraction_0.35.png | Real_MassFraction_0.35.png |
| c) | d) |
| Рисунок 16 – Графики распределения концентраций компонентов с применением разных моделей (а – Standart, b – SST, c – RNG, d – Realizable) | |

Проанализировав работы в этой области [4, 5, 6], наиболее часто для решения данного круга задач применяется модель SST, так как она объединяет преимущества и моделей турбулентности и дает хороший результат. Исследование, проведенное в данной работе, показывает, что наиболее отличные от остальных результаты дает модель RNG, а результаты других моделей схожи. Следовательно, можно сделать вывод, что для решения задач горения и смешивания подойдут те модели, которые дают похожий на модель SST результат, а именно Standart и Realizable.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе составлена математическая модель, позволяющая исследовать процессы, протекающие в камере сгорания двигателей летательных аппаратов с высокой скоростью движения. Модель основывается на решении уравнений RANS для многокомпонентного потока с использованием высокорейнольдсовой модели турбулентности и учитывает эффекты смешения, горения и турбулентности.

Исследование, проведенное в данной работе, показывает, что для моделирование задач горения и смешения наиболее подходящие модели турбулентности те, которые дают похожий на модель SST результат, а именно - Standart и Realizable.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Коркодинов Я. А. Обзор семейства моделей для моделирования турбулентности / Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. – 2013. – Т. 15, № 2. – c. 5 –16.;
2. Носов М.А.Введение в теорию турбулентности: [лекции] / – М.: Янус-К, 2004. – 118 с.;
3. Ansys Help. Fluent. Theory Guide. Chapter 8, 15, 16;
4. Москвичев А. В. Применимость моделей турбулентности, реализованных в ANSYS CFX, для исследования газодинамики в щелевом канале ТНА ЖРД / Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2013. – Т. 9, № 5–1. – c. 82–85;
5. Снегирев А.Ю., Фролов А.С. Расчёты турбулентного диффузионного горения с помощью многопроцессорных высокопроизводительных систем / СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. с. 318–319;
6. Гарбарук А.В., Стрелец М.Х., Шур М.Л., Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений: учебное пособие / СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 88 с.