**УДК 629.7.036.2**

**Подходы численного моделирования процессов в камере сгорания**

**П. В. Сизов**

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

Целью работы является численное моделирование, в камере сгорания модельной установки ПВРД(ГПВРД), в проточной части которого расположена система форсунок подачи топлива, процессов течения и горения для нескольких режимов работы (в зону реакции поступает воздух в разным массовым содержание кислорода). Моделирование выполняется средствами пакета программ ANSYS Fluent и Solidworks.

В работе исследуется влияние массового содержание кислорода в воздухе(окислитель) на полноту сгорания топлива(керосин) и энерговыделение в модельном тракте камеры сгорания ПВРД.

Вычислительное моделирование процесса горения топливно-воздушной смеси в камере сгорания проточного тракта энергоустановки проводилось для двух режимов:

1) режим горения смеси керосин + воздух (мольная доля кислорода 21%);

2) режим горения смеси керосин + обогащенный кислородом воздух (мольная доля кислорода 25%)

Для моделирования процессов в камере сгорания модельной установки, имитирующей проточный тракт ГПВРД, используется модель турбулентного течения химически реагирующей многокомпонентной смеси. Задача решается в стационарной постановке.

Уравнения модели включают в себя уравнения газовой динамики и теплообмена, уравнения модели турбулентности и уравнения, описывающие модель горения многокомпонентной смеси.

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







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, энтальпия образования -того элемента , - диффузионный член,  - источниковый член энергии.

Уравнение энергии (1.3), решаемое при использовании модели горения с предварительно не перемешанными горючим и окислителем в условии неадиабатичности течения, заменяется уравнением относительно полной энтальпии *H:*



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

В качестве модели турбулентности используется двухслойная модель переноса сдвиговых напряжений SST k-omega model (наиболее гибкая модель), позволяющая хорошо считать, как пристеночные течения, так и течения внутри большой расчетной области. Данная модель хорошо зарекомендовала себя за более чем 20-ти летнюю историю применения и позволяет использовать ее для большинства течений, в том числе реагирующих течений в каналах.

Уравнения модели турбулентности имеют вид:





где  и  – эффективная диффузия кинетической энергии турбулентности *k* и ω соответственно, - отвечает за производство кинетической энергии турбулентности *k* за счет градиента скорости,  – отвечает за производство ω,  и  – отвечают за диссипацию *k* и ω за счет турбулентности,  – перекрестный диффузионный член,  и  - источниковые члены, задаваемые пользователем исходя из условий задачи.

Для моделирования процесса горения используется равновесная **модель предварительно не перемешанных компонент (**Non-Premixed Equilibrium Model**). Она была разработана для моделирования диффузионных турбулентных племён и основана на использовании понятия переменной смешения f.**

**Переменная смешения f используется для характеристики диффузионных племён и представляет собой отношение массового расхода горючего компонента**  **к суммарному массовому расходу компонентов горючего и окислителя:**

|  |  |
| --- | --- |
|  | **(1.7)** |

**На входной границе горючего компонента f=1, на входной границе окислителя f=0, а в других областях переменная смешения показывает, какую долю в точке пространства занимает поток горючего компонента.**

**При построении такой равновесной модели вводится ряд допущений и условий, в рамках которых она может быть использована. К ним относятся:**

**- потоки горючего и окислителя подаются раздельно в камеру сгорания;**

**- равенство коэффициентов диффузии (это условие является приемлемым для турбулентных потоков);**

**- число Льюиса** **, где D – коэффициент диффузии, a – коэффициент температуропроводности. В рамках данного допущения интенсивности переноса массы примеси диффузией и переноса теплоты теплопроводностью одного порядка, уравнения диффузии и теплопроводности становятся идентичными, а профили избыточных концентраций и температур оказываются подобными;**

**В рамках принятых допущений уравнения переноса компонентов можно свести к единственному уравнению относительно сохраняющейся скалярной величины – переменной смешения f. В этом уравнении отсутствуют нелинейные источниковые члены, т.к. переменная смешения по своему определению привязана не к компонентам (CO, CO2 и т.д.), а к атомам веществ (C, H, O и т.д.). И поскольку при химических реакциях меняются массы веществ, а атомы остаются неизменными, то и переменная смешения является скалярной величиной без источника. Однако, бывают и исключения, например, испарение газообразной компоненты с поверхности частицы. В этом случае переменная смешения не является скалярной величиной.**

**Уравнение переноса, осредненное по Фавру, имеет вид:**



**где**  - турбулентная вязкость,  - турбулентное число Прандтля.

**В рамках данной модели все массовые доли компонент Yi, плотность****и температура T являются функциями только переменной смешения, т.е.**



**В случае, когда рассматривается не адиабатный процесс, искомые параметры будут зависеть еще и от энтальпии h:**



**Рассматривая турбулентные течения, необходимо учитывать, что любая скалярная величина претерпевает некоторые изменения(колеблется), которые могут приводить к значительным колебаниям значений искомых параметров, например, приводить к значениям температуры выше энергии активации. Поэтому при моделировании горения необходимо учитывать турбулентно-химическое взаимодействие.**

**В данной модели это взаимодействие учитывается статистическим образом при помощи функции плотности вероятности. В пакете** ANSYS Fluent **имеется две ее разновидности: β-функция и двойная δ-функция Дирака. Они зависят от значений своих матожидания и дисперсии. Наиболее часто при описании флуктуаций турбулентности встречается β-функция.**

**Уравнение переноса дисперсии переменной смешения:**



**где**  , .

**Таким образом, система уравнений, решаемых в рассматриваемой модели горения, состоит из двух уравнений (1.8) - (1.9).**

**В качестве искомого решения используется осредненное значение параметра, которое получается следующим образом: из термодинамического расчета (без кинетики) определяются зависимости параметров равновесия (массовые доли и концентрации компонент, температура и др.) от параметра смешения, затем используя известную (заданную) функцию плотности вероятности** , интегрируем и получаем осредненную величину параметра:



**Еще одной особенностью данной модели является то, что значения осредненных параметров для определенной химической модели (например, равновесной) и функции плотности вероятности можно занести в справочную таблицу и при необходимости обращаться к ней в процессе счета, что позволяет сократить счетное время решения задачи. В программном комплексе имеется возможность посмотреть данные этой таблицы.**

**Таким образом, математическая модель** турбулентного течения химически реагирующей многокомпонентной смеси**, описывающая процессы в** камере сгорания модельной установки, имитирующей проточный тракт ГПВРД, состоит из уравнений (1.1) - (1.2), (1.4) - (1.6), **(1.8) - (1.9). Данная система дополняется уравнениями состояния совершенного газа для каждого компонента топливно-воздушной смеси.**

В качестве геометрической модели расчетной области рассматривается камера сгорания модельной установки, имитирующей проточный тракт ГПВРД. В центральном сечении камеры сгорания расположены пилоны с отверстиями для подачи топлива. Продукты сгорания вытекают в специальный раструб.

Геометрия расчетной области представляет собой тракт прямоугольного переменного поперечного сечения протяженностью 1225 мм с тремя пилонами в центре канала и последующего раструба цилиндрической формы протяженностью 600 мм и диаметром 240 мм (рис.1).

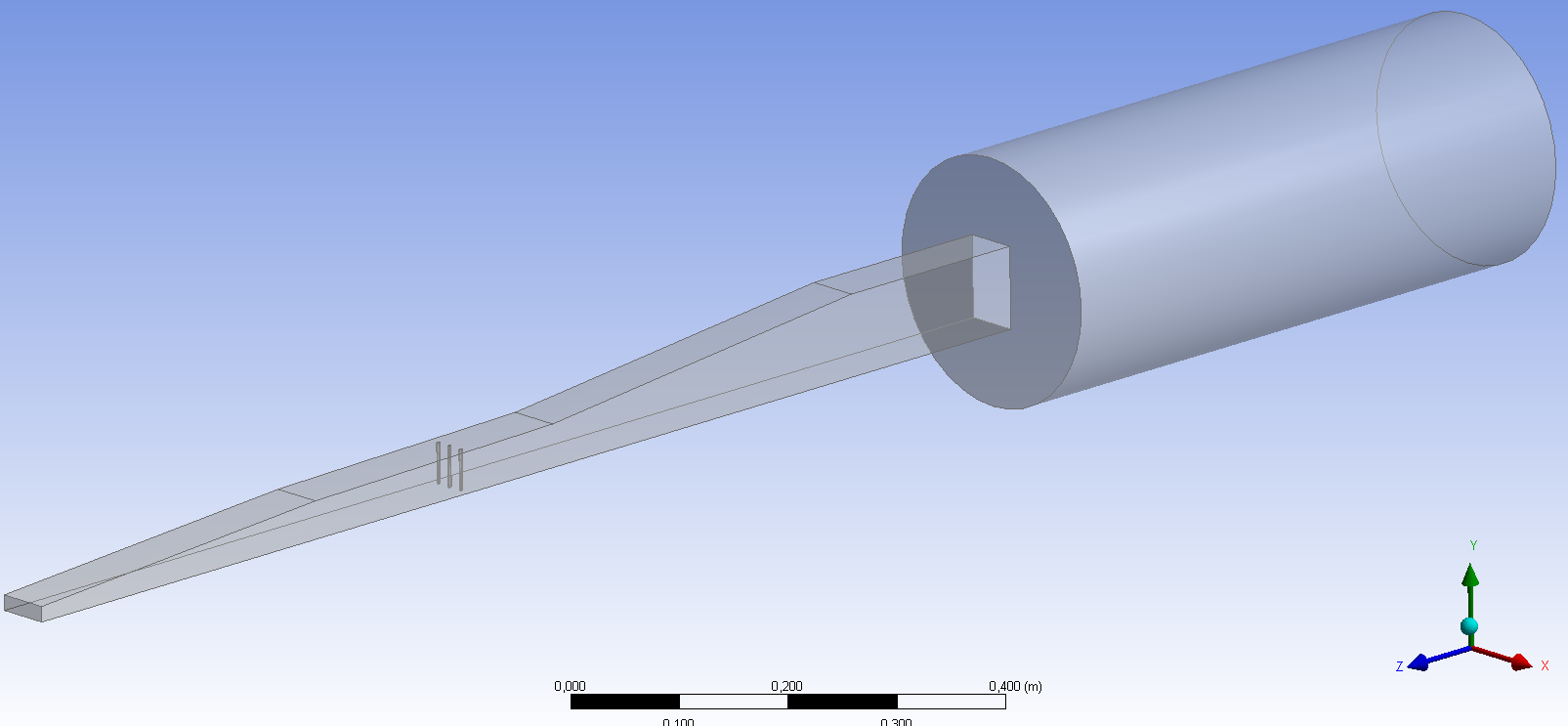
****

Рисунок 1 – Общий вид расчетной геометрии

Пилоны представляют собой столбы высотой 40 мм ромбовидного сечения с диагоналями 4 мм и 2 мм. На стыке граней каждого пилона расположены по 5 отверстий диаметром 0.8 мм с шагом 9 мм. Эти отверстия имитируют форсунки для подачи топлива (рис. 2).

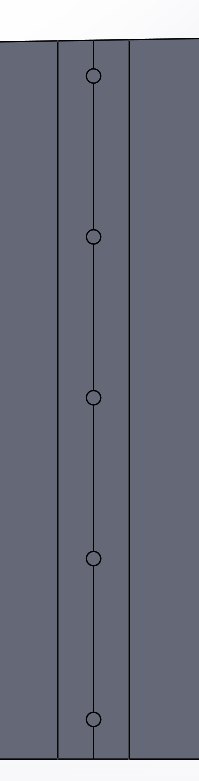
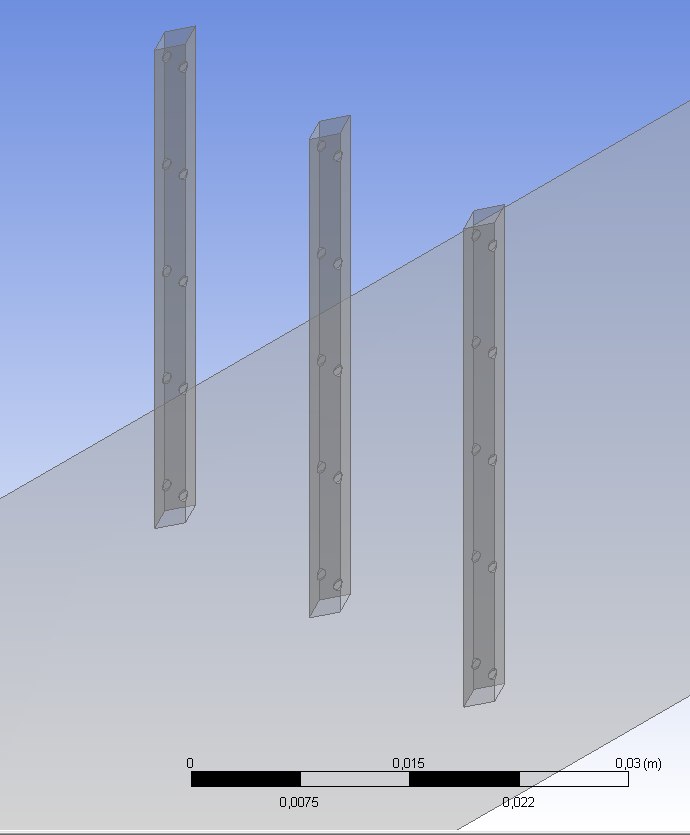


Рисунок 2 – Общий вид геометрии пилонов (слева) и вид в сечении (справа)

В расчетах использовалась тетраэдральная сетка с полным числом элементов, равным 12500000.

Граничными условиями, необходимыми нам для решения поставленной задачи и задаваемыми нами в Ansys Fluent, будут (рис.3):

1). Для задания расхода керосина из форсунок - Mass flowinlet. Расход 25 г/сек при температуре 300 К (граница F).

2). Для задания расхода подогретого воздуха на входной границе - Mass flow inlet. Расход 380 г/сек при температуре 700 К (граница B).

3). Pressure outlet – статическое давление на выходе (граница C).

4). Wall – стенка тракта, пилоны, раструб (границы D, E, A).

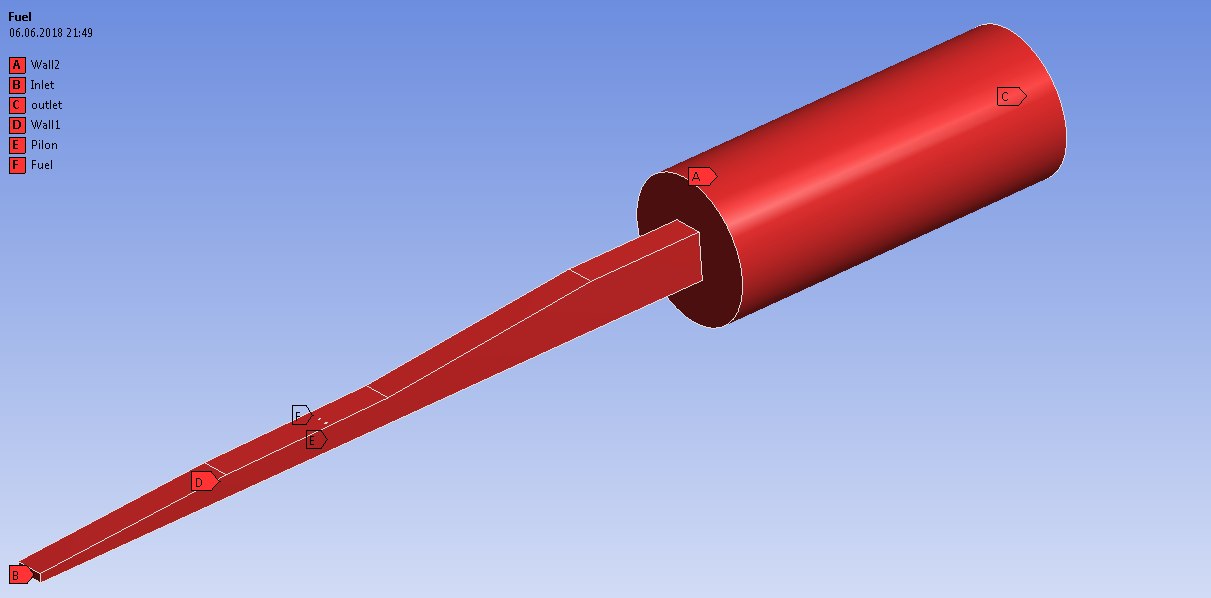


Рисунок 3 – Зоны для задания граничных условий.

На рисунках 4-5 представлены результаты расчета для режима горения воздух+керосин.

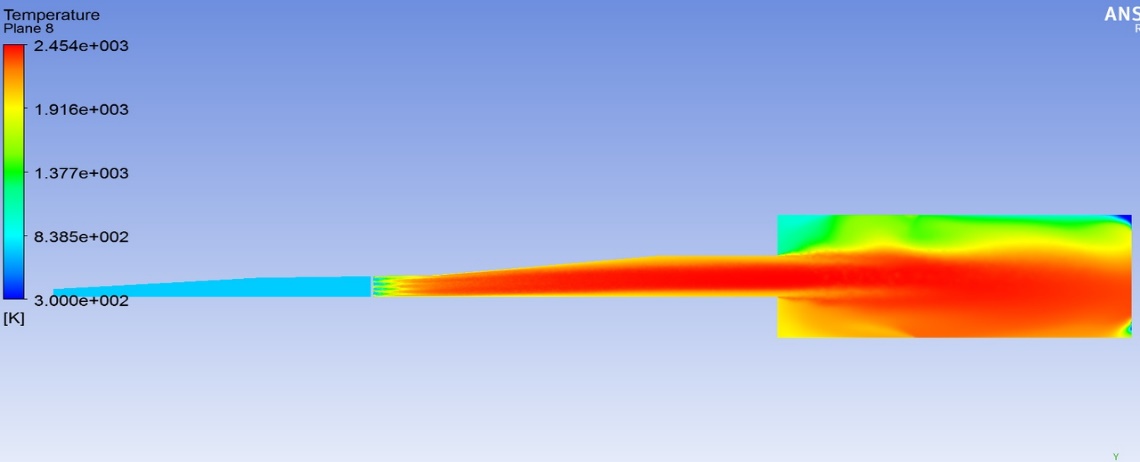
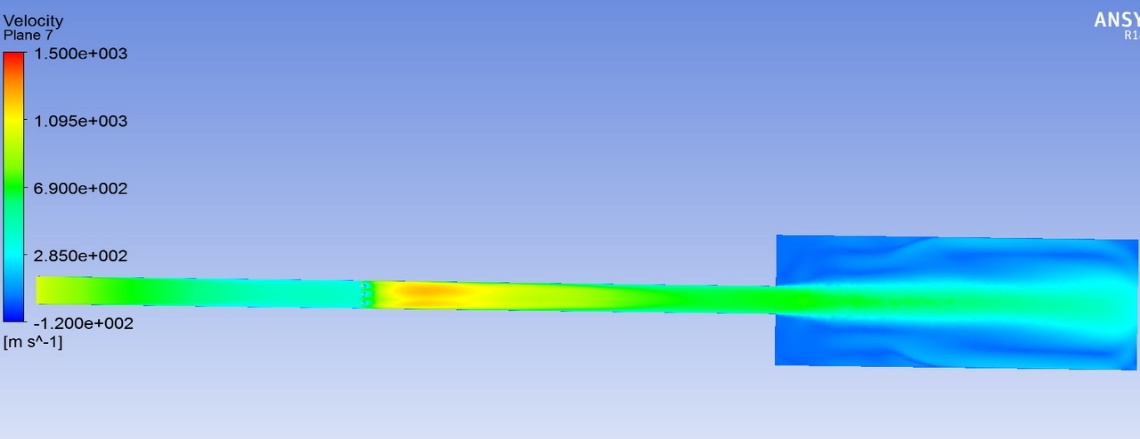
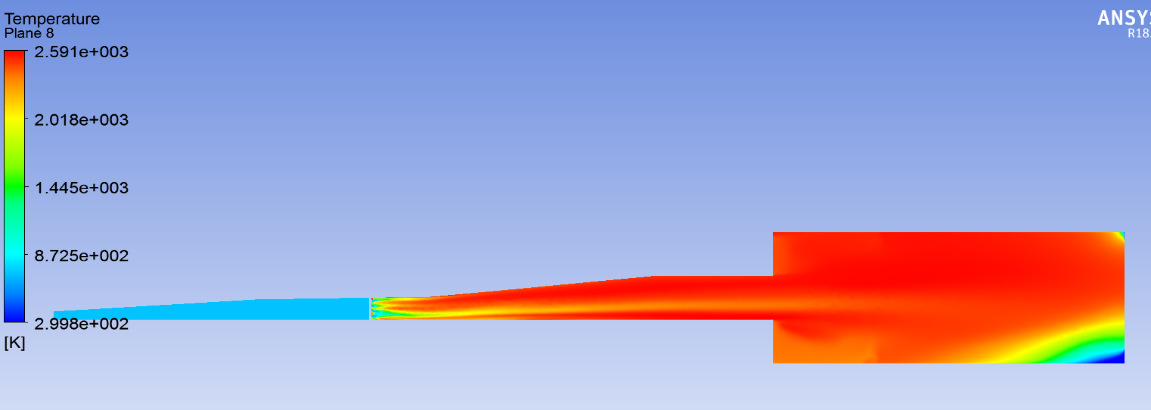


Рисунок 4 - Распределение температуры в тракте камеры энергоустановки (продольное сечение).

Рисунок 5 - Картина распределения скорости в тракте камеры энергоустановки (вид сверху)

На рисунках 6-7 представлены результаты расчета для режима горения обогащенный кислородом воздух+керосин.

Рисунок 6 - Температура в тракте камеры энергоустановки 2й режим (продольное сечение).

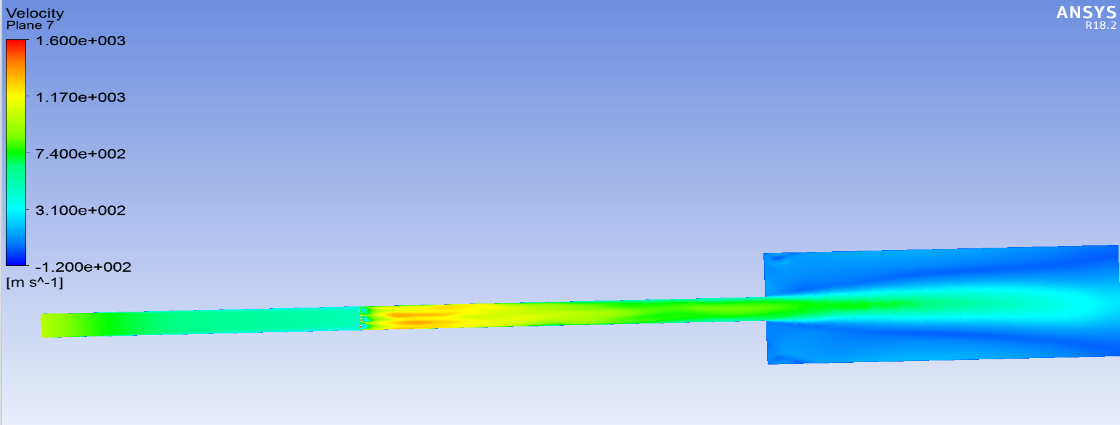


Рисунок 7 - Распределения скорости в тракте камеры энергоустановки 2й режим (вид сверху)

Исходя из представленных выше графических результатов численного расчета двух режимов горения можно сделать вывод, что при повышении содержания кислорода (окислителя) в воздушной смеси на 4%, увеличивается температура в самом тракте камеры сгорания энергоустановки за счет большей полноты сгорания топлива. Таким образом, режим горения, обогащенный кислородом воздух+керосин является наиболее выгодным с точки зрения эффективности преобразования химической энергии за счет увеличения полноты сгорания топлива. При анализе тепловыделения разница между обычным режимом и обогащенным составила порядка 11(кВатт) энергии.

**Библиографический список**

1. Бондарюк М.М., Ильюшенко С.М. Прямоточные воздушно-реактивные двигатели. М.: Государственное издательство оборонной промышленности, 1958.

2. Гарбарук А.В., М.Х. Стрелец, М.Л. Шур. / Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений / Изд-во Политех. Ун-та, СПБ, 2012, 88 с.

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