

УДК 621.452.3+536.38

АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ МОДЕЛЕЙ ГОРЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЁТА МНОГОФОРСУНОЧНОЙ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ГТД

© 2011 Б. Г. Мингазов, В. Б. Явкин, А. Н. Сабирзянов, А. В. Бакланов

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А. Н. Туполева (КАИ)

Рассмотрены вопросы применимости моделей горения для прогнозирования параметров внутрикамерного процесса ГТД. Показаны характерные результаты моделирования для различных моделей горения.

Камера сгорания, моделирование, горение, турбулентность.

Корректное моделирование процессов горения в камере сгорания ГТД актуально при оптимальном проектировании камер сгорания и рассмотрении вопросов диагностирования. В настоящее время достаточно распространено моделирование рабочих процессов с применением современных средств вычислительной газодинамики. Существующие проблемы адекватного моделирования определены вопросами полного взаимосвязного описания всех физико-химических процессов, протекающих в камере сгорания ГТД. Детальное моделирование всей совокупности протекающих процессов, например с помощью прямого численного моделирования, на данный момент представляется невозможным. Реализуемым вариантом моделирования процессов горения в турбулентном потоке является рассмотрение их с позиции статистических моделей турбулентности [1, 2]. Наиболее характерные подходы к включению процессов горения в модели турбулентных потоков применительно к камерам сгорания ГТД на современном этапе следующие.

Наиболее простой моделью, имеющей широкое распространение, является модель распада турбулентного вихря с учётом кинетики химических реакций. Модели разрушения вихрей представляют собой эмпирические модели для усреднённых скоростей «брутто» реакций, где скорость химической реакции определя-

ется временным масштабом вихревого перемешивания, в результате чего перемешанная смесь мгновенно сгорает [1]. На фоне большого количества недостатков (несопоставимые временные масштабы смешения и кинетического взаимодействия; не предсказывает промежуточных состояний компонентов и явлений диссоциации; невозможно реалистично моделировать явления детальной кинетики и т.п.) данный подход имеет определённое преимущество: модель применима для неперемешанного, частично перемешанного и перемешанного горения.

Другие модели горения представляют собой модели турбулентных пламён предварительно не перемешанной смеси [1]: модель, основанная на предположении о локальном термодинамическом равновесии в результате смешения горючего и окислителя, и модель тонкого фронта пламени, позволяющая учитывать детальный механизм химических реакций. Обе модели основаны на применении функции плотности вероятности распределения скалярных переменных (температура, массовые доли и плотность) от переменной смешения x , определяемой моделью турбулентности. Модель горения с равновесной химией позволяет определять размеры пламени и пространственное изменение основных параметров (температуру и концентрации устойчивых к диссоциации компонентов

смеси). В модели тонкого фронта пламени дополнительно к переменной x добавляется скорость скалярной диссипации s как мера скорости перемешивания. Данная модель представляет собой ансамбль элементарных пламен и может предсказывать неравновесные концентрации компонентов. Эта модель более совершенна, но имеет существенный недостаток – некорректное описание химических процессов вне зоны пламени.

Модель горения определяет точность и качество получаемых результатов. В данной работе проведён анализ применимости вышеописанных моделей горения для прогнозирования параметров в камере сгорания ГТД, работающего на газообразном метане. Критерием пригодности модели являлось корректное предсказание зоны тепловыделения и адекватный расчёт компонентного состава продуктов сгорания.

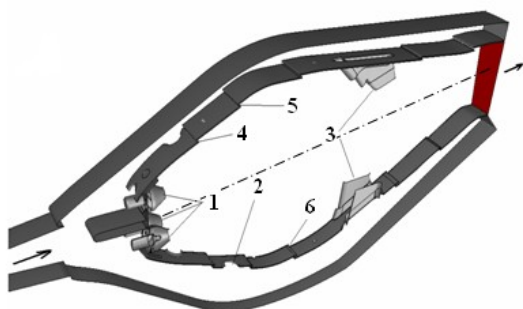


Рис.1. Сектор камеры сгорания:
1 – газовая горелка; 2 – отверстия подвода воздуха; 3 – патрубки подвода воздуха в зону смешения; 4,5,6 – щели подвода охлаждающего воздуха

Анализ моделей горения проводился при прогнозировании параметров рабочего процесса в многофорсунной прямоточной камере сгорания кольцевого типа. Расчётной областью камеры сгорания служил сегмент 1/70 её части (рис.1). Конструктивные особенности исследуемой камеры сгорания: фронтальная плита, имеющая 136 горелочных устройств, расположенных в два яруса; ряды воздухоподводящих отверстий на стенках жаровой трубы; смесительные патрубки в зоне смешения, обеспечивающие подвод необходимого количества воздуха для выравнивания температурного поля; щели

для подвода воздуха в целях охлаждения жаровой трубы.

Исходные данные моделирования: рабочее давление $p_{к0}$ составляло 0,507 МПа; суммарный коэффициент избытка воздуха $\alpha=6$; температура воздуха на входе в камеру сгорания 494 К; температура метана – 320 К.

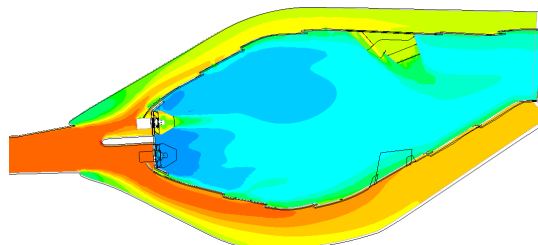


Рис.2. Распределение полного давления

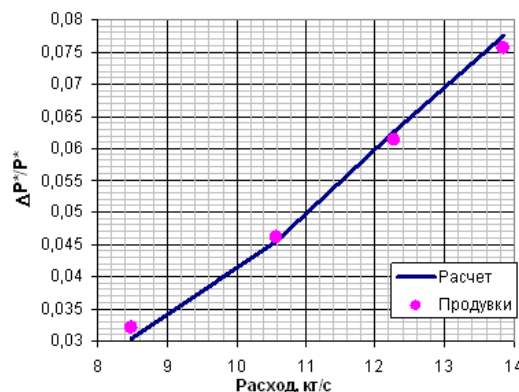


Рис.3. Зависимость потерь полного давления от расхода воздуха: точки – экспериментальные данные; линия – расчёт

Исследования проводились средствами программного продукта ANSYS-Fluent. Моделируемый объём проточной части рассматриваемого сектора покрывался расчётной сеткой, адаптированной к геометрии камеры сгорания и содержащей порядка 50 000 элементов. Моделирование процессов теплообмена с твёрдыми элементами конструкции и теплопроводности через стенки жаровой трубы, горелочных устройств (одна целая форсунка и две половинки в рассматриваемом секторе), патрубков подвода воздуха и других элементов в данной задаче не рассматривалось, и, соответственно, объём твёрдых элементов не подвергался дискретизации. На границах сектора, ограничивающих выделенный объём

ём камеры сгорания от смежных областей, задавались условия периодического подвода, позволяющие воспроизводить закрутку потока продуктов сгорания горелочными устройствами. В качестве граничных условий на входе в камеру сгорания задавался массовый расход воздуха и метана в соответствующих сечениях. На выходе ставилось условие постоянства давления в поперечном сечении. Все стенки моделируемой области обеспечивали условия прилипания и непротекания.

Для замыкания системы уравнений газовой динамики, включающей уравнения неразрывности и движения вязкой жидкости Навье-Стокса, использовалась стандартная $k-\epsilon$ модель турбулентности, хорошо зарекомендовавшая себя для решения широкого класса инженерных задач, со стандартным набором модельных констант. Используемая расчётная сетка определяла необходимость применения стандартной пристеночной функции. В качестве граничных условий для уравне-

ний переноса кинетической энергии турбулентности и скорости её диссипации задавались интенсивность турбулентных пульсаций скорости и гидравлический диаметр. Моделирование осуществлялось с использованием схем I порядка аппроксимации исходных уравнений.

Перед анализом моделей горения проведено сравнительное сопоставление результатов моделирования течения без горения с экспериментальными данными холодной продувки. На рис.2 представлена характерная картина распределения полного давления в плоскости симметрии рассматриваемого сегмента для течения без горения. Сравнительное сопоставление расчётных и экспериментальных данных по относительным потерям полного давления отображено на рис.3. Представленная иллюстрация свидетельствует об удовлетворительном совпадении результатов моделирования по стандартной $k-\epsilon$ модели турбулентности с экспериментальными данными.

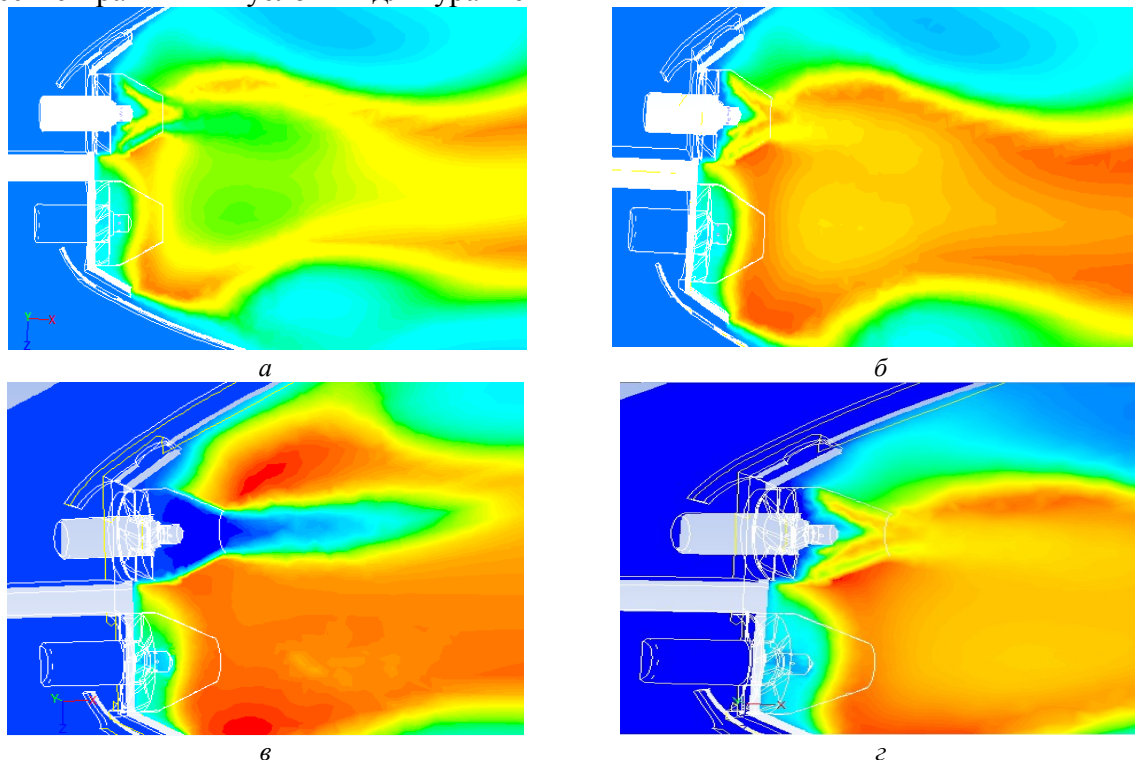


Рис.4. Структура температурного поля: а - по модели локального термодинамического равновесия (37 компонентов); б - по модели тонких пламен (37 компонентов, 130 реакций); в - по модели распада вихря с конечной скоростью двухстадийной реакции окисления метана; г - по модели распада вихря с двухстадийной реакцией окисления метана

Недостатком данных моделей является горение внутри горелочного устройства. Для модели, основанной на локальном термодинамическом равновесии, отчетливо видно, что оно менее интенсивно. На рис.4 в представлена структура температурного поля по модели распада вихря с конечной скоростью двухстадийной реакции окисления метана: $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$; $\text{CH}_4 + 1,5\text{O}_2 \rightarrow \text{CO} + 2\text{H}_2\text{O}$. Рис.4 г отражает результаты расчёта по модели вихревой диссипации для этой же реакции. Данное сопоставление показывает влияние учёта скорости химических реакций в рамках модели распада вихря. Отличительным моментом модели горения, учитывающей скорость химической реакции, является то, что отсутствует горение в горелочном устройстве и непосредственно за ним. Структура пламени по модели вихревой диссипации близка к структуре, полученной по модели тонкого фронта пламени. В целом модели распада вихря прогнозируют завышенные температуры горения.

Распределение температуры, рассчитанной по исследуемым моделям горения, по длине жаровой трубы вдоль оси (линия на рис.1), лежащей в плоскости симметрии и проходящей через центр фронтальной плиты, представлено на рис.5. Модели вихревой диссипации с одно- и двухстадийными реакциями окисления метана прогнозируют одинаковое распределение температуры. Модель горения, основанная на термодинамическом равновесии («быстрая химия»), также обеспечивает распределение температуры, которое не зависит от компонентного состава. Для этой модели следует отметить существенный провал температуры за форсуночным устройством. Распределение температуры, рассчитываемой по модели тонкого фрон-

та пламени, зависит от компонентного состава и числа химических реакций между ними. На рис.5 отражены результаты моделирования с учётом механизма Кее для окисления метана (18 компонентов смеси и 58 химических реакций) [3] и представленного ранее. Показано для этих механизмов различие в определённых областях.

Сравнительное сопоставление распределения температуры, рассчитываемой по модели распада вихря с учётом скорости химических реакций и без них, показано на рис.6. Модель вихревой диссипации с учётом скорости для одно- и двухстадийной реакций определяет одинаковое распределение температуры. Показано характерное распределение температуры при учёте скорости химических реакций.

Распределение компонентов в продуктах сгорания по длине жаровой трубы, рассчитанное по исследуемым моделям турбулентности, отражено на рис.7. Как и следовало ожидать, при использовании термодинамического подхода для прогнозирования мольной доли устойчивых к диссоциации соединений CO и H_2O детальный компонентный состав моделируемой смеси качественно не влияет. Однако для прогнозирования распределения концентраций атомарного кислорода и радикала OH по длине камеры сгорания более расширенный компонентный состав обеспечивает их пониженные значения.

Модель тонкого фронта пламени существенно по-разному определяет концентрацию как устойчивых, так и неустойчивых соединений в продуктах сгорания в зависимости от химических механизмов взаимодействия компонентов смеси.

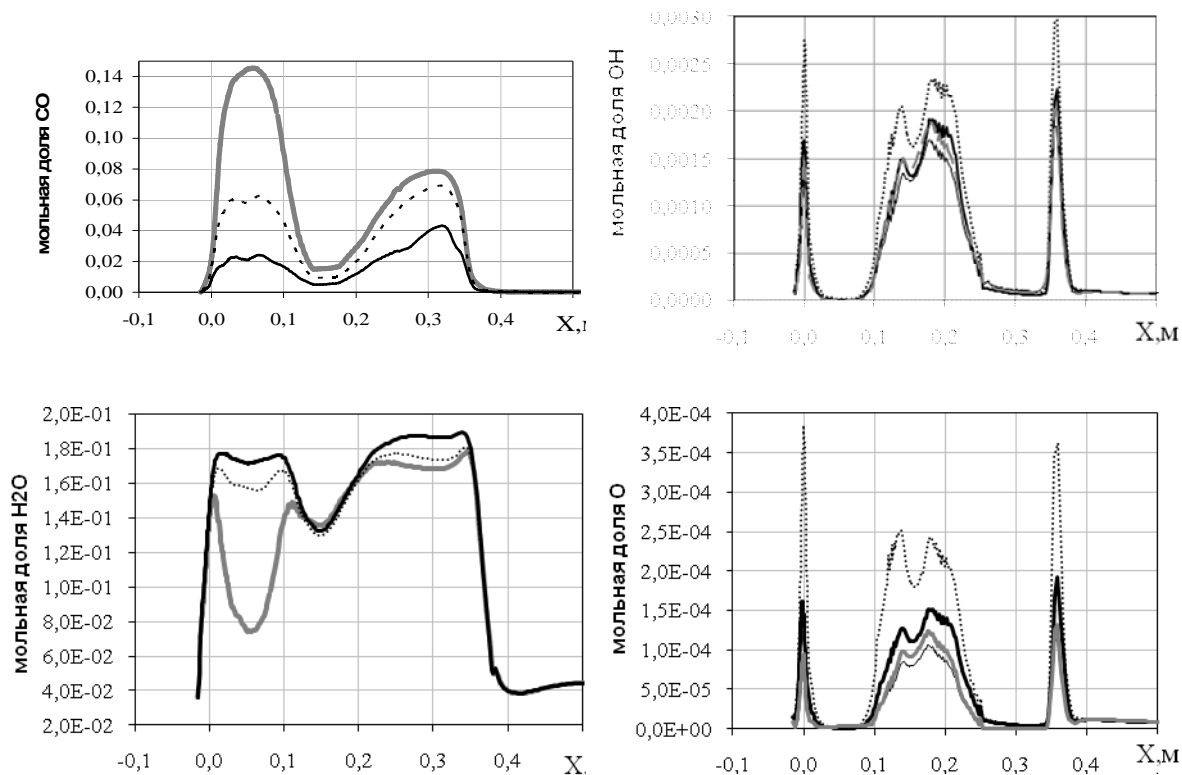


Рис.7. Мольная доля компонентов по длине жаровой трубы: ———— – модель локального термодинамического равновесия (37 компонентов); ———— – модель локального термодинамического равновесия (18 компонентов); ———— – модель тонкого фронта пламени (37-130); – модель тонкого фронта пламени (18 -58)

Все рассмотренные подходы к моделированию процессов горения в камере сгорания ГТД дают различное распределение параметров в объёме жаровой трубы. Проведённые исследования показали, что модель тонкого фронта пламени позволяет достаточно корректно предсказывать структуру пламени и компонентный состав продуктов сгорания для прогнозирования эмиссионных характеристик камер сгорания ГТД. Но в то же время другие модели горения имеют определённые преимущества. Следует сделать вывод о необходимости корректного моделирования процессов воспламенения во фронтном устройстве. Окончательные выводы по применению той или иной модели возможны после тщательного сопоставления расчётных и экспериментальных данных.

Библиографический список

1. Варнатц, Ю. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ [Текст] / Ю. Варнатц, У. Маас, Р. Диббл; Пер. с англ. Г.Л. Агафонова. Под ред. П.А. Власова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 352 с.
2. Куценко, Ю.Г. Численные методы оценки эмиссионных характеристик камер сгорания газотурбинных двигателей [Текст]. Ю.Г. Куценко.- Екатеринбург-Пермь: УрО РАН, 2006. – 140 с.
3. Peeters, T. Numerical Modeling of Turbulence Natural-Gas Diffusion Flames [Текст]/ T. Peeters, PhD thesis, Delft Technical University, Delft, The Netherlands, 1995, p.263

ANALYSIS OF COMBUSTION MODELS APPLICABILITY FOR DESIGNING COMBUSTION CHAMBER WITH A LARGE NUMBER OF NOZZLES

© 2011 B. G. Mingazov, V. B. Yavkin, A. N. Sabirzyanov, A. V. Baklanov

Kazan state technical university

Applications of models for predicting the parameters of gas-turbine engine combustion chamber process are discussed in the paper. Characteristic simulation results for different models of combustion are presented.

Combustion chamber, modeling, burning, turbulence.

Информация об авторах

Мингазов Биалал Галавтдинович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой АДиЭУ, Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева; e-mail: adeu@adeu.kstu-kai.ru. Область научных интересов: термодинамика, горение в турбулентном потоке, газодинамика, моделирование, авиационные двигатели, энергосиловые установки.

Явкин Владимир Борисович, кандидат технических наук, доцент кафедры АДиЭУ, Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева, e-mail: vb.yavkin@gmail.com. Область научных интересов: термодинамика, горение, газодинамика, турбулентность, моделирование, энергосиловые установки.

Сабирзянов Андрей Наилевич, кандидат технических наук, доцент кафедры специальных двигателей, Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева, e-mail: sabirzan@sd.kstu-kai.ru. Область научных интересов: термодинамика, горение, кинетика, теплофизические свойства, моделирование, энергосиловые установки.

Бакланов Андрей Владимирович, аспирант кафедры АДиЭУ, Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева, e-mail: andreybaklanov@bk.ru. Область научных интересов: горение в турбулентном потоке, моделирование, исследование.

Mingazov Bilal Galavtdinovich – head of the department of aircraft engines and power plants. Doctor of Technical Sciences., professor, Kazan state technical university. E-mail: adeu@adeu.kstu-kai.ru. Area of research: thermodynamics, combustion in a turbulent flow, gas dynamics, simulation, aircraft engines, power plants.

Yavkin Vladimir Borisovich – candidate of technical sciences, Associate Professor of the department of aircraft engines and power plants, Kazan state technical university. E-mail: vb.yavkin@gmail.com. Area of research: thermodynamics, combustion, gas dynamics, turbulence modeling, power plants.

Sabirzyanov Andrey Nailevich – candidate of technical sciences, Associate Professor of the department of special engines, Kazan state technical university. E-mail: sabirzan@sd.kstu-kai.ru. Area of research: thermodynamics, combustion, kinetics, thermal properties, modeling, power plants.

Baklanov Andrey Vladimirovich – post-graduate student of the department of aircraft engines and power plants, Kazan state technical university. E-mail: andreybaklanov@bk.ru. Area of research: Burning in a turbulent stream, modeling.