

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ имени
академика С.П. КОРОЛЁВА (национальный
исследовательский университет)» (СГАУ)

Численное исследование процессов в камере сгорания
ГТД

Электронное учебное пособие

Работа выполнена по мероприятию блока 2 «Развитие и повышение эффективности научно-инновационной деятельности» и блока 3 «Развитие информационной научно-образовательной среды и инфраструктуры» Программы развития СГАУ на 2009 – 2018 годы по проекту «Разработка технологии создания виртуального ГТД и проектирование на ее основе микрогазотурбинного двигателя
Соглашение № 2/12 от 03.06.2013 г.

САМАРА 2013

УДК 621.452.3(075)

ББК 39.55я7

Ч-671

Авторы: Матвеев Сергей Геннадьевич,

Орлов Михаил Юрьевич,

Матвеев Сергей Сергеевич,

Зубрилин Иван Александрович,

Макаров Никита Сергеевич,

Чечет Иван Викторович.

Численное исследование процессов в камере сгорания ГТД
[Электронный ресурс] электрон. учеб. Пособие / С.Г.

Матвеев, М. Ю. Орлов, С.С. Матвеев, И. А. Зубрилин, Н.С.

Макаров, И.В. Чечет; М-во образования и науки РФ,

Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед.

ун-т). - Электрон. текстовые и граф. дан. (1,05 Мбайт). -

Самара, 2013. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

В электронном учебном пособии рассмотрено численное исследование процессов в камере сгорания ГТД.

Учебное пособие предназначено для бакалавров и магистрантов, изучающих курс «Моделирование процессов в камере сгорания», специальность 160301 - Авиационные двигатели и энергетические установки.

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2013

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1 численное исследование процессов в камере сгорания ГТД.....	5
1.1 Общие подходы к моделированию процессов в КС ГТД.....	5
1.2 Основы моделирования рабочего процесса камер сгорания ГТД.....	8
2. Технология моделирования рабочего процесса ГТД.....	12
2.1. Построение геометрической модели КС.....	14
2.2. Внесение упрощений в геометрическую модель.....	16
2.3. Выделение расчетной области.....	17
2.4 Определение граничных областей.....	19
2.5. Построение конечно-элементной модели.....	20
2.6. Формирование математических моделей физических явлений.....	22
2.7. Настройка решателя и расчёт.....	28
2.8. Обработка результатов расчёта и их анализ.....	28
Заключение.....	31
Список использованных источников.....	32

ВВЕДЕНИЕ

Камера сгорания ГТД является одной из самых ответственных его частей, так как устойчивость и характеристики процесса горения определяют в конечном итоге надежность и основные характеристики работы двигателя (экономичность, экология и т.д.). Вместе с тем особенностью камеры сгорания как элемента двигателя является трудность предварительного анализа и последующего расчёта. Это объясняется большим количеством одновременно протекающих в ней при работе двигателя процессов и низкой степенью изученности некоторых из них. В результате, большинство существующих камер сгорания были созданы на основе большого числа экспериментальных исследований, выполненных как при их проектировании, так и при доводке. В последние десятилетия сложилась ситуация, когда срок создания нового авиадвигателя на три – пять лет больше, чем срок создания летательного аппарата, для которого он предназначен. Отсюда следует закономерность ситуации, в которой двигатель должен проектироваться опережающими темпами. На пути достижения этой цели применительно к камере сгорания стоит много проблем, ряд из которых еще только начинает находить пути их решения. Одним из инструментов способствующих её достижению является численное моделирование рабочего процесса камер сгорания ГТД. Это пособие предназначено для ознакомления студентов и инженеров с этой областью исследования процессов в камерах сгорания ГТД.

1 Численное исследование процессов в камере сгорания ГТД

1.1 Общие подходы к моделированию процессов в КС ГТД

Проектирование камер сгорания (КС) представляет собой сложную инженерную задачу, решение которой направлено на обеспечение достижения заданных характеристик разрабатываемого объекта за счёт оптимизации его рабочего процесса путем выбора определенных режимных и геометрических параметров, а также их взаимного согласования. К камерам сгорания выдвигается ряд следующих основных требований:

- высокое значение коэффициента полноты сгорания;
- малые потери полного давления;
- малые габариты камеры сгорания;
- работоспособность в широком диапазоне изменения расходов воздуха и топлива при изменении режима работы двигателя;
- требуемое поле температур на входе в турбину;
- надежный запуск при низких температурах и в высотных условиях;
- низкий уровень выброса токсичных веществ (CO , NO_x , C_nH_m и ряд других);
- отсутствие вибрационного горения;
- достаточный ресурс.

При этом основная проблема обеспечения выполнения этих требований заключается в том, что подходы к выполнению каждого из них не только отличаются по методам реали-

зации для каждого из показателей, но и зачастую противоречат друг другу. Именно этот факт обуславливает необходимость большого объема проектных расчётов и экспериментальной доводки, а следовательно и большой объем временных и материальных затрат.

В последнее время в связи с развитием вычислительной техники и роста её возможностей для проектирования камер сгорания стали активно использоваться инженерные программные пакеты. К сожалению, по крупному, подобные технологии пока находятся на том этапе становления, когда имеющиеся подходы к решению задач еще недостаточно отработаны и не позволяют решить весь круг вопросов, связанных с проектированием КС. Вместе с тем, опыт практического использования численных методов в этой области показал, что они являются мощным инструментом, способным не только сократить время проектирования новых КС, но способствовать выхода их на качественно новый уровень. Так, например, численные методы способны позволить решить задачу комплексного проектирования двигателя с учётом рабочих процессов, протекающих в каждом из его основных узлов.

Основными задачами численного исследования камер сгорания ГТД являются:

- создание математических моделей камер сгорания ГТД, наиболее полно отражающих особенности протекания в них рабочего процесса с учетом наиболее значимых для результата расчёта физических явлений;

- валидация используемых математических моделей;

-решение с помощью численных методов проблемных задач, возникающих при создании КС (определение срывных, ресурсных, экологических и других характеристик).

В данном методическом пособии показано использование инженерного программного продукта ANSYS для моделирования рабочего процесса КС ГТД с целью определения её характеристик.

1.2 Постановка цели и задачи исследования

На этапе начала формирования математической модели рабочего процесса КС ГТД необходимо определиться с тем, какие цели и задачи поставлены для этого конкретного исследования. Дело в том, что даже геометрические модели для одной и той же камеры сгорания могут сильно отличаться в зависимости от того, что будет рассчитываться в конкретно взятом случае. Так, при прочностных расчётах необходимо построение геометрической модели с учётом конструктивных элементов КС, при расчётах газовой динамики геометрическая модель будет являться подобием области, в которой рассматривается течение газа, а при решении задач теплонапряженности будет необходимо построение сопряженной модели. Другим важным вопросом, который должен быть решён на самом первом этапе является вопрос о степени детализации как геометрической модели, так и математического аппарата для расчёта какого-либо определенного процесса, протекающего в КС. И здесь это также решается на основе поставленной цели и задач исследования.

Основные задачи, решаемые при численном моделировании рабочего процесса камер сгорания

Как отмечалось выше, при проектировании КС ГТД имеется широкий круг важных задач, без решения которых невозможно проектировать эти объекты, а также проводить их доводку с целью оптимизации характеристик. Из этих задач можно выделить ряд тех, которые на сегодняшний день с разной степенью точности решаются с помощью инженер-

ных программных продуктов, таких как ANSYS. В общем случае для камеры сгорания с помощью CAE-систем можно определить:

- её аэродинамические характеристики (структуру течения, распределение воздуха по жаровой трубе (ЖТ), потери полного давления в КС и её элементах),
- локальные значения коэффициента избытка воздуха без горения (например, перед запуском) и с учетом горения топлива,
- распределение температуры в объеме ЖТ, на её стенках и характеристики поля температуры на выходе из КС,
- концентрации вредных веществ (NO_x , CO и несгоревших углеводородов) в объеме ЖТ и на выходе из неё,
- характеристики бедного и богатого срыва пламени и воспламенения.

Круг решаемых задач постоянно расширяется. Так уже имеется опыт расчёта совместной работы камеры сгорания и отдельных узлов ГТД, а также расчётов для камеры сгорания в составе газогенератора. Успешность подобных расчётов на сегодняшний день ограничена не столько развитием теории, как возможностями вычислительной техники, практически не позволяющими выполнять расчёты на детальных моделях больших двигателей и ограничивающими их для микроразмерных.

1.3 Основы моделирования рабочего процесса камер сгорания ГТД

Для моделирования рабочего процесса в камере сгорания используют метод конечных объемов, суть которого заклю-

чается в разделении рабочего пространства на конечное число объёмов, для каждого из которых решаются уравнения баланса искомой величины.

При описании рабочего процесса камеры сгорания, работающей на газообразном топливе, возможно решение следующих уравнений:

- *Уравнение сохранения массы:*

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{u}) = S_m$$

где ρ – плотность потока,

\vec{u} – вектор скорости потока,

S_m – источниковое слагаемое (например, приток массы из-за испарения капли),

- *Уравнение сохранения количества движения:*

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{u}) + \nabla(\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla(\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F}$$

где P – статическое давление,

$\rho \vec{g}$ - гравитационные силы,

\vec{F} - внешний источник количества движения,

$\vec{\tau}$ - тензор напряжений, определяемый по формуле:

$$\vec{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{u} + \nabla \vec{u}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{u} \cdot I \right]$$

μ - молекулярная вязкость,

I - единичный тензор.

- *Уравнение сохранения энергии:*

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla(\vec{u}(\rho E + p)) = \nabla(\lambda_{eff} \nabla T - \sum_i h_i \vec{J}_i + \vec{u} \vec{\tau}_{eff}) + S_h$$

Три слагаемых в правой части представляют собой перенос энергии посредством теплопроводности, диффузии компонентов, вязкостного трения, соответственно. Полная энергия E определяется по формуле:

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2},$$

где $h = \sum_j Y_j h_j$ - энтальпия,

Y_j - массовая доля компонента

h_j - энтальпия j -го компонента, определяемая по формуле

$$h_j = \int_{T_{ref}}^T c_{pj} dT,$$

где $T_{ref} = 298,15$ К,

C_{pj} - изобарная теплоёмкость j -го компонента.

Слагаемые S_m , \vec{F} , S_h - определяют влияние на газ внешних факторов (например, дискретных фаз).

- *Уравнения, описывающие турбулентность* (на примере модели k - ε Realizable):

- уравнение переноса кинетической энергии турбулентных пульсаций k записывается как:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \nabla \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon + Y_M + S_k$$

- скорости диссипации кинетической энергии турбулентности ε :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \nabla \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon$$

,

где $C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right]$, $\eta = S \frac{k}{\varepsilon}$, $S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$,

$G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$ - производство турбулентной кинетической энергии из-за градиента средних скоростей,

$G_b = -g \frac{\mu_t}{\rho \text{Pr}_t} \frac{\partial \rho}{\partial x_i}$ - производство турбулентной кинетической энергии вследствие воздействия сил плавучести,

$Y_M = 2\rho\varepsilon \frac{k}{a^2}$ - представляет собой диссипацию турбулентной кинетической энергии вследствие сжимаемости потока (а-скорость звука),

$C_2 = 1.9$; $C_{1\varepsilon} = 1.44$ – модельные константы,

σ_k , σ_ε - турбулентные числа Прандтля для k и ε соответственно.

S_k , S_ε - заданные пользователем источники слагаемые.

В рамках k - ε модели турбулентная вязкость

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon},$$

где C_μ – полуэмпирическая константа модели.

Дополнительно решаются:

- Уравнения переноса концентрации компонентов газа,
- Уравнения, описывающие скорости химических реакций и турбулентно-химическое взаимодействие,
- Уравнения состояния рабочего тела.

2Технология моделирования рабочего процесса ГТД

В самом общем случае моделирование рабочего процесса КС ГТД можно представить состоящим из создания математической модели её рабочего процесса, выполнении расчётов и представлении и анализе полученных результатов.

Если рассмотреть его более детально, то моделирование рабочего процесса в КС ГТД с помощью инженерных программных пакетов включает в себя выполнение следующих основных этапов:

1. *Построение геометрической модели КС.* На этом этапе производится построение 3D модели КС на базе её чертежей, или сформировавшихся на данный момент времени представлений.

2. *Внесение упрощений в геометрическую модель.* Излишняя детализация, присутствующая в исходной конструкторской документации (наличие фасок, сварных швов, элементов крепления, сложных стыков поверхностей и т.д.) при её переносе в 3D модель усложняет построение сеточной модели и увеличивает объем используемой памяти компьютера, что затрудняет проведение последующих расчётов, а в некоторых случаях вообще делает их невозможными. Поэтому проводится упрощение исходной геометрии КС, в ходе которого из неё удаляются мелкие элементы, не влияющие существенным образом на рабочий процесс в КС.

3. *Выделение расчетной области.* Из-за ограничений возможностей современной вычислительной техники только в отдельных случаях возможно проведение расчётов для всего объема КС, поэтому, как правило, из него выделяется как-

либо часть, имеющая как геометрическую периодичность, так и периодичность граничных условий. Поскольку при исследовании рабочего процесса КС моделируются газодинамические процессы, то в качестве расчетной области используется проточная часть КС без твердых («металлических») стенок.

4. *Определение граничных областей.* На этом этапе необходимо определить границы входа воздуха в КС, выхода рабочего тела, границы подачи топлива, периодические границы (если необходимо), границы отбора воздуха для охлаждения соплового аппарата турбины и нужд двигателя.

5. *Построение конечно-элементной модели.* Современные методы численного моделирования, в том числе и метод конечных объемов, базируются на использовании сеточных моделей объектов, поэтому данный этап является одним из наиболее важных и проблемных в реализации. Из-за сложности конструкции КС ГТД, для неё, как правило, применяются неструктурированные сетки.

6. *Формирование математических моделей физических явлений.* В зависимости от поставленной задачи, времени и доступных вычислительных ресурсов моделирование рабочего процесса в КС можно проводиться в следующих постановках:

- расчет однокомпонентного турбулентного течения, в котором определяются гидравлические характеристики КС;
- расчет смешения топлива и окислителя для определения характеристик смесеобразования;
- расчет процессов горения с использованием глобальных реакций окисления топлива для моделирования полей температуры в первом приближении;

- расчет процессов горения с использованием расширенных кинетических механизмов реакций окисления топлива с целью определения полей температур и концентраций компонентов химических реакций, в том числе загрязняющих веществ.

7. *Настройка решателя.* Производится выбор схемы решения дифференциальных уравнений, порядок пространственной и временной дискретизации, настройка критериев сходимости.

8. *Обработка результатов расчета и их анализ.* На этом этапе проводится представление и визуализация результатов расчета в виде графиков, полей и т.д.

Рассмотрим основные этапы численного моделирования камер сгорания подробнее.

2.1 Построение геометрической модели КС.

На этом этапе производится построение 3D модели КС на базе её чертежей или представлений, сформированных в ходе предварительных традиционных (одномерных) расчётов. Первоначально, для формирования математической модели необходимо выбрать пакет программ, в котором она будет создана, и пакет, в котором впоследствии будет проводиться расчёт. Так, например для создания геометрической модели КС может использоваться пакет SimmensPLMNX, а для расчётов - инженерные программные продукты AnsysFluent или AnsysCFX. Для создания геометрии камеры сгорания широко используется метод эскизирования, вращение эскизов различных элементов КС, вытягивание и другие способы

построения 3D моделей. Так, например с помощью операции «Вращение» можно создавать стенки жаровой трубы (рисунок 1), корпуса камеры сгорания, форсунки и т.д.

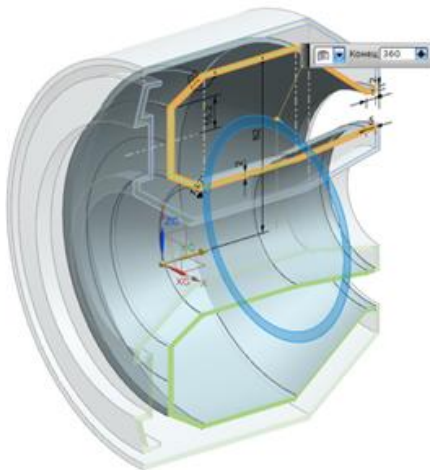


Рисунок 1 - Создание модели жаровой трубы

Построение массива элементов можно использовать при выполнении отверстий подвода воздуха в стенке жаровой трубы (рисунок 2).

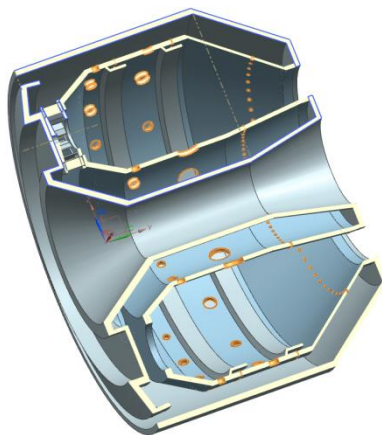


Рисунок 2 - Создание отверстий подвода воздуха в стенке жаровой трубы

На этапе создания геометрической модели необходимо помнить, что излишняя её детализация в последующем осложнит создание конечно-элементной модели. Поэтому её упрощают. Основное действующее при этом правило - вносимые изменения не должны влиять на рабочий процесс КС. Окончательная геометрическая модель КС представлена на рисунке 3.

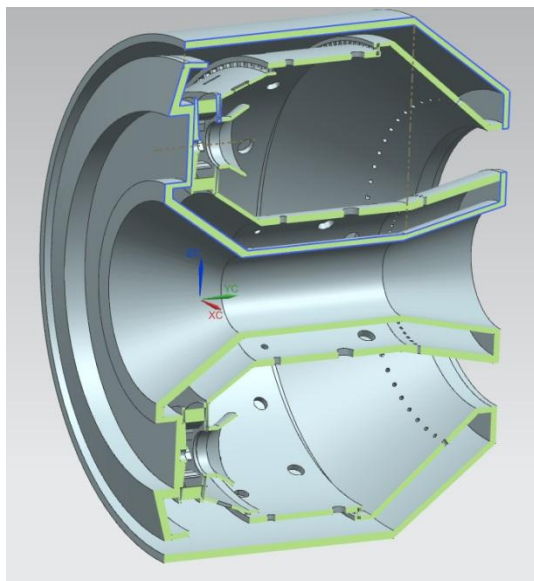


Рисунок 3 - Геометрическая модель камеры сгорания

2.2 Внесение упрощений в геометрическую модель.

Излишняя детализация, присутствующая в исходной конструкторской документации (наличие фасок, сварных швов, элементов крепления, сложных стыков поверхностей и т.д.) при её переносе в 3D модель усложняет построение сеточной модели и увеличивает объем используемой памяти компьютера, что затрудняет проведение последующих расчётов, а в некоторых случаях вообще делает их невозможными. Поэтому проводится упрощение исходной геометрии КС, в ходе которого из неё удаляются мелкие элементы, не влияющие существенным образом на рабочий процесс в КС. Для рассматриваемой в качестве примера КС, при построении,

скругления жаровой трубы были удалены. На рисунке 4 показаны места упрощений.

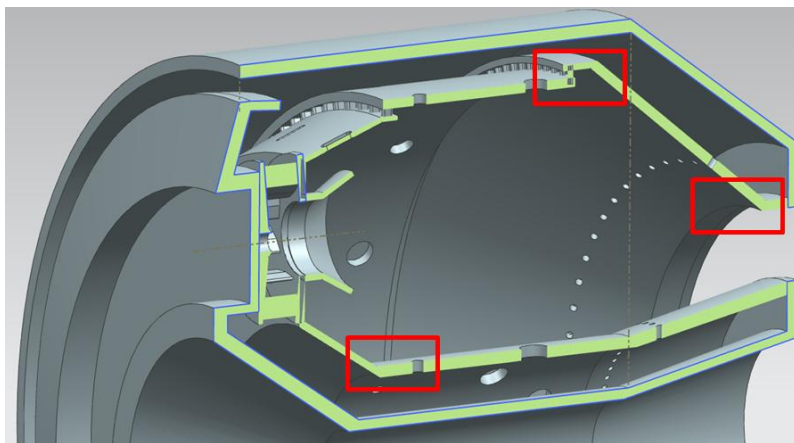


Рисунок 4 - Упрощения геометрической модели.

2.3 Выделение расчетной области.

Из-за ограничений возможностей современной вычислительной техники только в отдельных случаях возможно проведение расчётов для всего объема КС, поэтому, как правило, из него выделяется как-либо часть, имеющая как геометрическую периодичность, так и периодичность граничных условий. Поскольку при исследовании рабочего процесса КС моделируются газодинамические процессы, то в качестве расчетной области используется проточная часть КС без твердых («металлических») стенок, по геометрической форме аналогичная области где происходит течение рабочего тела. Обычно расчётная область для камер сгорания представляет собой выделенную из нее в продольном направлении часть с

поперечным сечением в виде сектора или S-образной фигуры. Расчётная область для КС малоразмерного ГТД представлена на рисунке 5.

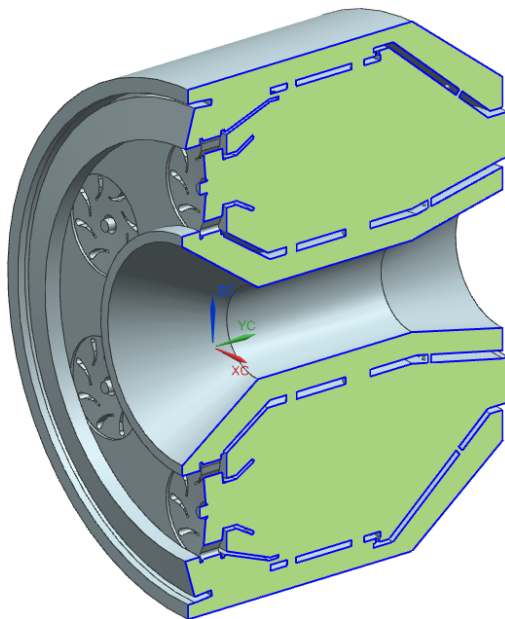


Рисунок 5 - Расчётная область, выделенная из камеры сгорания

Следует отметить, что при некоторых видах расчётов камер сгорания, подходы к построению расчетных моделей могут кардинально отличаться. Так, например, при решении прочностных задач и задач течения газовой среды они качественно различны. При решении прочностных задач превалирующее значение имеет точное моделирование металлических деталей камеры сгорания, тогда как при расчете течения газа важна конфигурация внутреннего объема, где собствен-

но и осуществляется это течение. При расчёте процессов теплообмена основную роль начинают играть сопряженные модели. Следовательно, для решения всего комплекса задач, свойственных камерам сгорания необходимо построение целого ряда сеточных моделей, каждая из которых позволяла бы решать специфичные задачи.

2.4 Определение граничных областей.

На этом этапе необходимо определить границы входа воздуха в КС, выхода рабочего тела, границы подачи топлива, периодические границы (если необходимо), границы отбора воздуха для охлаждения соплового аппарата турбины и нужд двигателя. Результаты выполнения данного этапа для КС малоразмерного ГТД представлены на рисунке 6.

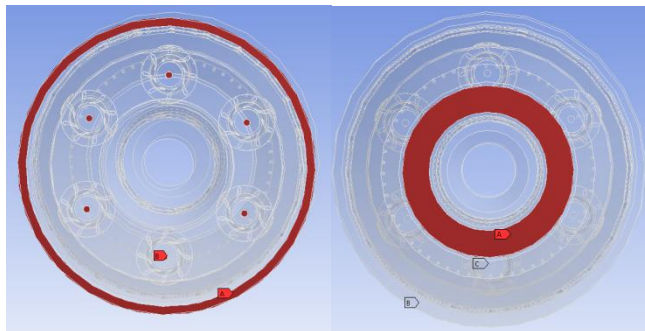


Рисунок 6. Определение граничных областей

2.5 Построение конечно-элементной модели

Современные методы численного моделирования, в том числе и метод конечных объемов, базируются на использовании сеточных моделей объектов, поэтому данный

этап является одним из наиболее важных и проблемных в реализации. Из-за сложности конструкции КС ГТД, для неё, как правило, применяются неструктурированные сетки. Из основных правил генерации сетки можно выделить следующие:

- сетка не должна существенно искажать исходную геометрию;

- необходимо увеличивать плотность сетки в местах высоких градиентов параметров потока;

- желательно использовать 15-20 элементов по высоте канала и для описания отверстий;

- размер элемента в пристеночной области должен быть согласован с локальными параметрами потока вблизи стенки и используемой моделью турбулентности;

- при использовании моделей турбулентности с осреднением по Рейнольдсу, необходимо достигать независимости результатов расчета от плотности конечно-объемной сетки;

- при использовании вихререзрешающих моделей турбулентности необходимо учитывать локальные интегральные и колмагоровские масштабы турбулентности.

Конечно-элементная модель напрямую определяет достоверность получаемых результатов расчёта, а иногда и принципиальную возможность их реализации. Между тем возможности современных компьютеров накладывают ряд ограничений на этот процесс. Камера сгорания ГТД представляет собой сложный геометрический объект, в котором наличие завихрителей форсунок, отверстий системы охлаждения жаровой трубы, воздушных карманов, фигурных переходов между плоскостями и прочих элементов со сложной геометрией делает практически невозможным создание вы-

сококачественной конечно-элементной сетки необходимой плотности, позволяющей проводить расчеты на персональных компьютерах без ее оптимизации.

Поэтому основным параметром при ее создании является оптимизация соотношения количества элементов и качества сетки. В зависимости от сложности задачи, создание конечно-элементной сетки может занимать до 80% общего времени, затрачиваемого на расчет и его подготовку. Известные закономерности протекания рабочего процесса в камере сгорания позволяют определить области, в которых можно укрупнить сетку без снижения качества расчета, что позволит значительно сэкономить машинные и временные ресурсы.

Сеточная модель для камеры сгорания малоразмерного ГТД представлена на рисунке 7.

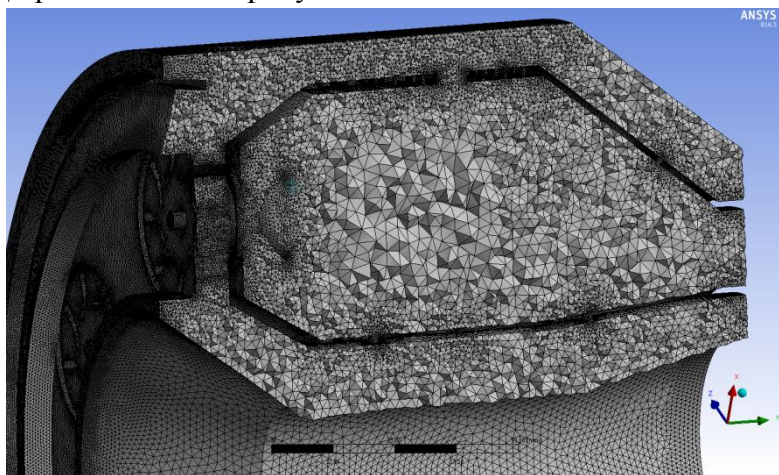


Рисунок 7 - Конечно-элементная модель камеры сгорания

2.6 Формирование математических моделей физических явлений

Математическое моделирование рабочих процессов, связанных с движением рабочего тела по тракту в своей основе базируется на решении дифференциальных уравнений движения (Навье-Стокса) и сохранения энергии. Решение этих систем уравнений выполняется на основе численных методов при помощи современных САЕ-систем.

В зависимости от поставленной задачи, времени и доступных вычислительных ресурсов моделирование рабочего процесса в КС можно проводить в следующих постановках:

- расчет однокомпонентного турбулентного течения, в котором определяются гидравлические характеристики КС;
- расчет смещения топлива и окислителя для определения характеристик смесеобразования;
- расчет процессов горения с использованием глобальных реакций окисления топлива для моделирования полей температуры в первом приближении;
- расчет процессов горения с использованием расширенных кинетических механизмов реакций окисления топлива с целью определения полей температур и концентраций компонентов химических реакций, в том числе загрязняющих веществ.

При этом для описания физических явлений используется ряд уравнений. При описании рабочего процесса камеры сгорания, работающей на газообразном топливе, возможно решение следующих уравнений:

- *Уравнение сохранения массы:*

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{u}) = S_m$$

где ρ – плотность потока,

\vec{u} – вектор скорости потока,

S_m – источниковое слагаемое (например, приток массы из-за испарения капли),

- *Уравнение сохранения количества движения:*

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{u}) + \nabla(\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla(\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F}$$

где P – статическое давление,

$\rho \vec{g}$ - гравитационные силы,

\vec{F} - внешний источник количества движения,

$\vec{\tau}$ - тензор напряжений, определяемый по формуле:

$$\vec{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{u} + \nabla \vec{u}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{u} \cdot I \right]$$

μ - молекулярная вязкость,

I - единичный тензор.

- *Уравнение сохранения энергии:*

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla(\vec{u}(\rho E + p)) = \nabla(\lambda_{eff} \nabla T - \sum_i h_i \vec{J}_i + \vec{u} \vec{\tau}_{eff}) + S_h$$

Три слагаемых в правой части представляют собой перенос энергии посредством теплопроводности, диффузии компонентов, вязкостного трения, соответственно. Полная энергия E определяется по формуле:

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2},$$

где $h = \sum_j Y_j h_j$ - энтальпия,

Y_j - массовая доля компонента

j, h_j - энтальпия j -го компонента, определяемая по формуле

$$h_j = \int_{T_{ref}}^T c_{pj} dT ,$$

где $T_{ref} = 298,15$ К,

C_{pj} - изобарная теплоёмкость j -го компонента.

Слагаемые S_m, \vec{F}, S_h - определяют влияние на газ внешних факторов (например, дискретных фаз).

- *Уравнения, описывающие турбулентность*

В современных программах расчёта гидродинамических течений, таких как ANSYSFluent, CFX и др. в настоящее время реализовано большое количество разнообразных моделей для расчёта турбулентных течений, отличающихся друг от друга точностью и сложностью решения. По возрастанию сложности основные из них можно расположить в следующем порядке.

1. **Модель Буссинеска (Boussinesq)**. Уравнения Навье — Стокса преобразуются к виду, в котором добавлено влияние турбулентной вязкости.
2. **Модель Спаларта-Альмараса**. Здесь решается одно дополнительное уравнение переноса коэффициента турбулентной вязкости
3. **$k - \epsilon$ модель**. Уравнения движения преобразуются к виду, в котором добавлено влияние флуктуации средней скорости (в виде турбулентной кинетической

энергии) и процесса уменьшения этой флуктуации за счёт вязкости (диссипации). Как правило, наиболее часто используемая модель при решении инженерных задач..

4. **$k - \omega$ модель.** Подобна предыдущей, но вместо уравнения диссипации решается уравнение для скорости диссипации турбулентной энергии.
5. **Модель напряжений Рейнольдса.** В рамках осреднённых по Рейнольдсу уравнений (RANS) решается 7 дополнительных уравнений для напряжений Рейнольдса.
6. **Метод крупных вихрей (LES, large eddy simulation).** Занимает промежуточное положение между моделями, использующими осреднённые уравнения Рейнольдса и DNS. Суть метода заключается в том, что большие масштабы турбулентности рассчитываются явно, а эффекты более мелких вихрей моделируются с использованием правил подсеточного замыкания.
7. **Прямое численное моделирование (DNS, direct numerical simulation).** Здесь дополнительные уравнения отсутствуют. Решаются нестационарные уравнения Навье — Стокса с очень мелким шагом по времени, на мелкой пространственной сетке. По своей сути не является моделью. Метод основан на численном решении системы уравнений Навье–Стокса и позволяет моделировать в общем случае движение вязких сжимаемых газов с учётом химических реакций, притом как для ламинарных, так и турбулентных случаев. Из-за высоких требований к вычислительным

ресурсам сложно применим для решения реальных задач, и чаще используется в научных расчетах.

Все модели имеют преимущества и недостатки. Области применения, для которых получены модельные постоянные на основе сравнения результатов расчёта с экспериментами, ограничены, хотя именно на этом базируется использование конкретных моделей при расчёте рабочего процесса КС ГТД.

Рассмотрим в качестве примера модель k - ε Realizable:

- уравнение переноса кинетической энергии турбулентных пульсаций k записывается как:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \nabla[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k})\nabla k] + G_k + G_b - \rho\varepsilon + Y_M + S_k$$

- скорости диссипации кинетической энергии турбулентности ε :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \nabla[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon})\nabla\varepsilon] + \rho C_1 S\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu\varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon$$

,

$$\text{где } C_1 = \max\left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5}\right], \quad \eta = S \frac{k}{\varepsilon}, \quad S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}},$$

$$G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad - \text{производство турбулентной кинетической энергии из-за градиента средних скоростей,}$$

$$G_b = -g \frac{\mu_t}{\rho Pr_t} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad - \text{производство турбулентной кинетической энергии вследствие воздействия сил плавучести,}$$

$Y_M = 2\rho\varepsilon \frac{k}{a^2}$ - представляет собой диссипацию турбулент-

ной кинетической энергии вследствие сжимаемости потока (а-скорость звука),

$C_2 = 1.9$; $C_{1\varepsilon} = 1.44$ – модельные константы,

σ_k , σ_ε - турбулентные числа Прандтля для k и ε соответственно.

S_k , S_ε - заданные пользователем источники слагаемые.

В рамках k - ε модели турбулентная вязкость

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon},$$

где C_μ – полуэмпирическая константа модели.

При расчете рабочего процесса в камере сгорания необходимо применять модель турбулентности, которая наиболее соответствует рассматриваемым условиям. При этом следует помнить, что результаты расчетов для каждой модели могут различаться как качественно, так и количественно. Таким образом, при расчете процессов в камере сгорания ГТД невозможно полностью исключить проведение экспериментальной работы с выполнением реальных испытаний, которые позволяли бы тестировать компьютерные расчеты и оценивать их достоверность. Выполнение данной работы имело в своей основе значительный объем выполненных ранее экспериментальных исследований, что позволило использовать эти наработки для составления модели рабочего процесса. При проектировании новых изделий, с параметрами, сильно отличающимися от соответствующих существующим изделиям, формирование математической модели может выразиться в

параллельном выполнении компьютерных расчетов и отдельных испытаний для уточнения значений величин в «реперных» точках.

Дополнительно решаются:

- Уравнения переноса концентрации компонентов газа,
- Уравнения, описывающие скорости химических реакций и турбулентно-химическое взаимодействие,
- Уравнения состояния рабочего тела.

Расчет процессов горения и образования токсичных веществ в камерах сгорания показывает, что базовые блоки для расчета данного процесса, имеющиеся в пакете иногда дают при использовании серьезные расхождения с результатами экспериментов. Анализ этой проблемы показал, что количество содержащихся в пакете реакций не всегда позволяет точно определять концентрации всех веществ, образующихся в камере сгорания. Для более точного решения этой задачи рационально использовать собственные более точные и объемные схемы реакций. Следовательно расчет камер сгорания не всегда возможен без доработки существующих и разработки новых модулей используемого пакета.

2.7 Настройка решателя и расчёт

После выбора необходимых для моделирования рабочего процесса камеры сгорания уравнений определяются схемы решения дифференциальных уравнений, порядок пространственной и временной дискретизации, настройка критериев

сходимости. Расчёт рабочего процесса для КС ГТД проводится в выбранном пакете в автоматическом режиме.

2.8 Обработка результатов расчёта и их анализ

Сложное распределение параметров рабочего тела по потоку в КС, многофакторное влияние на них различных составляющих рабочего процесса, а также их существенная зависимость от режима работы двигателя, превращают анализ рабочего процесса камеры сгорания в весьма нетривиальную задачу. Поэтому представление результатов расчета порой является не менее важной операцией при моделировании рабочего процесса КС, чем его подготовка или сам расчёт. При визуализации расчёта в зависимости от его цели можно использовать различные подходы, выбор которых в каждом конкретном случае определяется тем, что расчётные данные необходимо представить в виде, который позволяет наиболее легко сделать выводы о характере исследуемых процессов. Так, при представлении данных расчетов полей температур на выходе из камеры сгорания обычно проводится построение радиальной эпюры неравномерности поля температуры (рисунок 8) и окружного распределения температуры в сечении перпендикулярном продольной оси КС (рисунок 9). Представление изменения скорости течения и давлений выдаётся на вертикальной плоскости, проходящей через продольную ось камеры (рисунок 10).

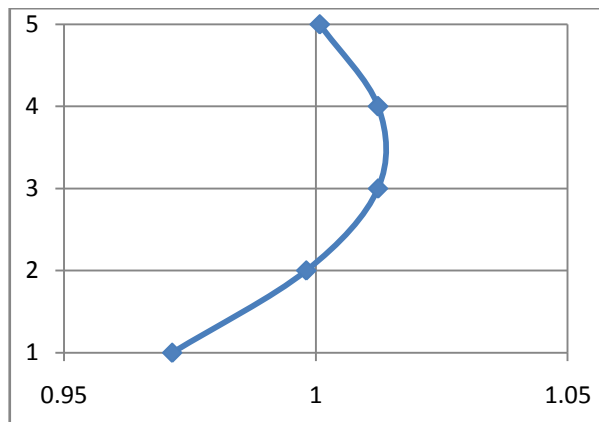


Рисунок 8 - Радиальная эпюра неравномерности поля температуры на выходе из КС.

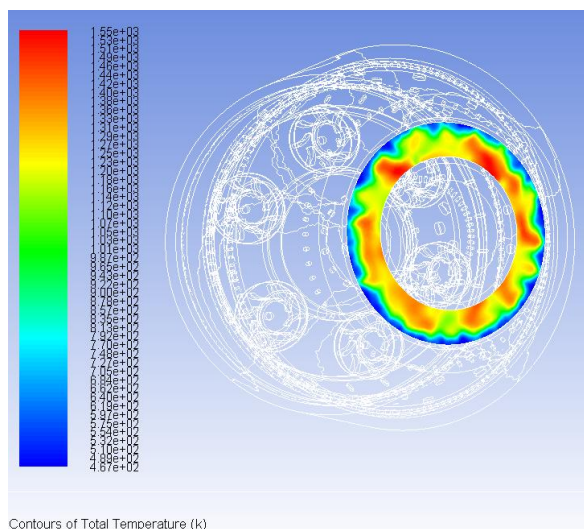


Рисунок 9 – Поле температуры на выходе из КС.

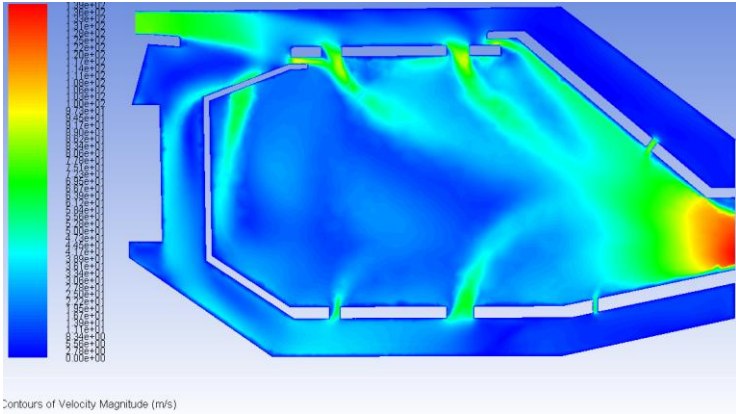


Рисунок 10 – Поле скорости в продольном сечении КС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном пособии представлены основы численного исследования рабочего процесса КС ГТД. Описан порядок основных действий при формировании математической модели, расчете и обработке результатов для КС.

Методические указания знакомят обучающихся с подходами к моделированию рабочего процесса камер, особенностями этого процесса, возникающими при решении этой задачи проблемами и путями их решения.

Данное пособие и изложенные в нем методики расчёта, позволяют углубить знания о рабочем процессе камеры сгорания, что способствует комплексному повышению качества подготовки специалистов в области проектирования и доводки газотурбинных двигателей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Расчет потоков в диффузоре камеры сгорания ГТД с использованием САЕ-систем : учеб.пособие / С. Г. Матвеев, С. В. Лукачѐв, М. Ю. Орлов [и др.]. - Самара : Изд-во СГАУ, 2010.- 88 с.
2. Создание трехмерных геометрических виртуальных моделей камер сгорания: учеб.пособие / С. Г. Матвеев, С. В. Лукачѐв, М. Ю. Орлов [и др.]. - Самара : Изд-во СГАУ, 2010.- 112с.
3. Ланский, А.М. Рабочий процесс камер сгорания мало-размерных ГТД/ А.М. Ланский, С.В. Лукачѐв, С.Г. Матвеев.- Самара. Изд-во СНЦ РАН, 2009.- 335 с.