

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

САЕ-МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ГАЗОГЕНЕРАТОРА ГТД В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ANSYS CFX

Электронное учебное пособие

САМАРА
2012

УДК СГАУ: 621.438.001.2(075)+004.9(075)

ББК СГАУ: 39.55

Авторы: **Орлов Михаил Юрьевич,
Батурий Олег Витальевич,
Шаблий Леонид Сергеевич,
Кривцов Александр Васильевич,
Матвеев Сергей Сергеевич,
Зинковский Виктор Сергеевич,
Колмакова Дарья Алексеевна,
Попов Григорий Михайлович.**

Рецензент: Начальник конструкторского отдела ОКБ ОАО «Кузнецов»,
д-р техн. наук, проф. Ю.И. Цыбизов

САЕ-моделирование рабочего процесса газогенератора ГТД в программном комплексе Ansys CFX [Электронный ресурс] : электрон. учеб. пособие / М.Ю. Орлов, О.В. Батурий, Л.С. Шаблий, А.В. Кривцов, С.С. Матвеев, В.С. Зинковский, Д.А. Колмакова, Г.М. Попов; Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). - Электрон. текстовые и граф. дан. (2,9 Мбайт). - Самара, 2012. - 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

В учебном пособии представлен метод комплексного численного расчета компрессора, турбины и газогенератора в универсальном программном комплексе *Ansys CFX*. В учебном пособии представлены пути расчета газогенератора; изложены основные режимы работы газогенератора; приведена технология расчета газогенератора; представлены основные проблемы при расчете газогенератора; изложены алгоритмы расчета газогенератора.

Пособие предназначено для магистров по направлению подготовки 160700.68 «Двигатели летательных аппаратов» по программе «Мехатронные пневмогидравлические агрегаты и системы», изучающих дисциплины «Газовая динамика двигателей ЛА» в семестрах А, В и «Современные проблемы создания двигателей летательных аппаратов (ЛА)» в 9 семестре; по программе «Авиационные двигатели внутреннего сгорания», изучающих дисциплины «Газовая динамика двигателей ЛА» в семестрах А, В и «Современные проблемы создания двигателей летательных аппаратов (ЛА)» в семестре В; по программе «Интегрированные информационные технологии в авиадвигателестроении», изучающих дисциплины «Газовая динамика АД и ЭУ» в семестрах А, В и «Современные проблемы создания двигателей летательных аппаратов (ЛА)» в семестре В. И для подготовки специалистов по специальности 160700.65 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей», изучающих дисциплины «Компьютерные технологии поддержки проектирования» в 9 семестре и «Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок (АД и ЭУ)» в 8 семестре.

Подготовлено на кафедре теплотехники и тепловых двигателей и кафедре теории двигателей летательных аппаратов СГАУ.

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2012

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ	5
ВВЕДЕНИЕ	9
1. ОСНОВНЫЕ ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ПРОЦЕССОВ В ГАЗОГЕНЕРАТОРЕ С ПОМОЩЬЮ CAD/CAE-СИСТЕМ	11
1.1. Подходы к моделированию рабочего процесса в газогенераторе ГТД	12
1.2. Анализ работы газогенератора ГТД на режиме запуска и выявление особенностей моделирования режима численными методами газовой динамики	13
1.3. Анализ работы газогенератора ГТД на основных режимах и выявление особенностей моделирования режимов численными методами газовой динамики	15
1.4. Алгоритмы моделирования рабочего процесса в газогенераторе ГТД на различных режимах работы	15
1.5. Общие положения технологии сквозного моделирования рабочего процесса в газогенераторе в едином универсальном программном комплексе	26
1.6. Исходные данные необходимые для моделирования рабочего процесса в газогенераторе в едином универсальном программном комплексе и принятые допущения	29
2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ХОД ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНО ПРАКТИЧЕСКОГО ЗАНЯТИЯ	32
3. ТЕХНОЛОГИЯ CAE-МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ГАЗОГЕНЕРАТОРА ГТД В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ANSYS CFX	36
3.1. Технология CAE моделирования рабочего процесса газогенератора ГТД на режиме запуска	37
3.2. Технология CAE моделирования рабочего процесса газогенератора ГТД на крейсерском и взлетном режимах	56
3.3. Настройка решателя программного комплекса Ansys CFX при моделировании рабочего процесса газогенератора ГТД	65
3.4. Визуализация результатов расчета рабочего процесса в газогенераторе ГТД	69

4. ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ	82
5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	83
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	85
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	86

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

b	-	высота лопатки, хорда профиля;
c	-	скорость потока в абсолютной системе координат;
c_p	-	изобарная теплоемкость;
C_{y0}	-	удельный расход топлива;
D	-	диаметр;
F	-	площадь сечения;
G	-	массовый расход;
i	-	энтальпия;
i_{PK} ,	-	угол атаки;
i_{HA}	-	
k	-	показатель адиабаты;
L	-	удельная работа;
l	-	длина;
M	-	число Маха;
N	-	мощность;
n	-	частота вращения ротора, степень расширения диффузора;;
p	-	давление;
P	-	сила, тяга;
r	-	радиус;
R	-	газовая постоянная;
T	-	температура;
t	-	шаг решетки;
$\bar{t}$	-	относительный шаг;
u	-	окружная скорость;
w	-	относительная скорость;
z	-	число лопаток в ЛВ, число ступеней;
$\tau(\lambda); \pi(\lambda)$ $\varepsilon(\lambda); q(\lambda)$	-	газодинамические функции;
α	-	угол между фронтом решетки и вектором абсолютной скорости, коэффициент избытка воздуха;
β	-	угол между фронтом решетки и вектором относительной скорости;
δ	-	величина зазора;
$\delta\alpha, \delta\beta$	-	угол отставания потока в НА и РК;
γ	-	угол установки профиля;
η	-	коэффициент полезного действия;

λ	-	приведенная скорость;
μ	-	коэффициент расхода;
π_k^*	-	степень повышания давления;
ρ	-	плотность;
$\rho_{ст}$	-	степень реактивности;
σ	-	коэффициент восстановления полного давления;
τ	-	ресурс;
ω	-	угловая скорость вращения ротора;
ζ	-	коэффициент потерь

Индексы

*	—	параметр торможения;
0	—	сечение на входе в СА;
1	—	сечение на входе в РК;
2	—	сечение на выходе из РК, входе в НА;
3	—	сечение на выходе из НА;
в	—	воздух;
к	—	относящийся к периферийному сечению, сечение на выходе из компрессора;
кор	—	относящийся к корытцу;
л	—	лопаточный;
м	—	механический;
мг	—	относящийся к режиму малого газа
пр	—	профильный;
рз	—	относящийся к радиальному зазору;
рк	—	относящийся к рабочему колесу;
ср	—	относящийся к среднему сечению;
ст	—	относящийся к ступени;
сп	—	относящийся к спинке;
а	—	осевое направление;
опт	—	оптимальный;
р	—	изобарный процесс ($p=const$);
г	—	связанный с потерями;
г	—	радиальное направление;

s	—	изоэнтропический (идеальный) процесс;
u	—	окружное направление;
w	—	параметр, рассматриваемый в относительном движении, т.е. в СК связанной с вращающимся РК;
x, y, z	—	проекции на координатные оси;
Δ	—	изменение величины;
λ	—	связанный с влиянием скорости потока;
Σ	—	суммарная величина

Сокращения

<i>ГТД</i>	—	газотурбинный двигатель;
<i>ГТУ</i>	—	газотурбинная установка;
<i>ЖТ</i>	—	жаровая труба;
<i>ПКМ</i>	—	правая кнопка мыши;
<i>КПД</i>	—	коэффициент полезного действия;
<i>КС</i>	—	камера сгорания;
<i>КЭ</i>	—	конечные элементы;
<i>ЛА</i>	—	летательный аппарат;
<i>ЛВ</i>	—	лопаточный венец;
<i>ЛКМ</i>	—	левая кнопка мыши;
<i>МГТД</i>	—	малоразмерный ГТД;
<i>НА</i>	—	направляющий аппарат;
<i>ПУ</i>	—	пусковое устройство;
<i>ПЧ</i>	—	проточная часть;
<i>РК</i>	—	рабочее колесо;
<i>СА</i>	—	сопловой аппарат;
<i>СК</i>	—	система координат;
<i>СГАУ</i>	—	самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С.П. Королева;
<i>СУ</i>	—	силовая установка;
<i>ТДЛА</i>	—	кафедра теории двигателей летательных аппаратов СГАУ;
<i>ТутД</i>	—	кафедра теплотехники и тепловых двигателей СГАУ;
<i>ЩД</i>	—	щелевой диффузор;

<i>ЦБК</i>	—	центробежный компрессор;
<i>CFD</i>	—	принятое в иностранной литературе сокращение термина «вычислительная газовая динамика»;
<i>LES</i>	—	моделирование турбулентности в рамках теории больших вихрей;
<i>RANS</i>	—	Уравнения Навье – Стокса осредненные по Рейнольдсу.

Остальные обозначения, индексы и условные сокращения объяснены в тексте.

ВВЕДЕНИЕ

В современной авиации господствующее положение занимают газотурбинные двигатели (ГТД). По этой причине проблемы, связанные с их проектированием и внедрением в серийное производство являются чрезвычайно актуальными и требуют скорейшего решения.

Конструктивно ГТД состоят из ряда элементов, основными из которых являются входное устройство, компрессор, камера сгорания, турбина и сопло. В традиционно принятой практике разработкой каждого такого элемента занималось отдельное подразделение двигателестроительного предприятия. В результате исторически так сложилось, что для всех элементов существовали индивидуальные расчетные методики. Таким образом, после термогазодинамического расчёта двигателя в целом, в дальнейшем вся детальная проработка и доводка проводились отдельно для каждого узла. Это также упрощало проведение испытаний изготовленных узлов, которые с целью определения интересующих параметров было проще проводить в стендовых условиях для отдельного узла, чем для всего ГТД в целом.

Развитие *CFD* технологий (англ. *CFD* - *Computational Fluid Dynamics*) в последние годы позволило производить гораздо больший объём расчетов и моделировать рабочие процессы в более короткие сроки с большей точностью, чем при использовании традиционных методик. Так, использование данного расчётного инструмента позволило в короткое время значительно улучшить характеристики

турбомашин и в частности компрессоров и турбин ГТД. Для камер сгорания в области их расчёта в последнее время также удалось достичь значительных успехов, как при моделировании процессов в локальных областях, так и при рассмотрении изменения различных режимных и конструктивных факторов. Все это позволило подойти к решению проблемы расчётов процессов в проточной части всего двигателя в целом, что позволило бы более полно учитывать взаимное влияние соседних узлов друг на друга и на общие характеристики двигателя, получать более достоверную картину распределения параметров по этому тракту, установить закономерности совместной работы узлов и т.д.

В данном учебном пособии рассмотрены пути решения этой проблемы и изложена разработанная сотрудниками СГАУ технология расчета ГТД с использованием пакета инженерного анализа *Ansys CFX*. Пособие предназначено для студентов авиационных вузов и для сотрудников предприятий аэрокосмического профиля, занимающихся проектированием и доводкой ГТД.

Представленная информация может быть использована в работе учебных, проектных и научно-исследовательских организаций авиационной, ракетно-космической, транспортной, судостроительной, энергетической, нефтегазовой и других отраслей.

1. ОСНОВНЫЕ ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ПРОЦЕССОВ В ГАЗОГЕНЕРАТОРЕ С ПОМОЩЬЮ CAD/CAE-СИСТЕМ

В данном учебном пособии под газогенератором ГТД (рис. 1.1) будет пониматься совокупность компрессора, камеры сгорания (КС) и турбины, жестко связанной с компрессором. Газогенератор является важнейшей частью двигателя и может работать как самостоятельный одновальный двигатель, либо входить в состав двигателей более сложных схем. Этот элемент ГТД выполняет основной рабочий процесс двигателя как тепловой машины и в значительной степени определяет все основные характеристики ГТД, а именно КПД, экономичность и экологичность. По этой причине изучение рабочего процесса в газогенераторе является актуальной задачей авиационного и энергетического двигателестроения.



Рис. 1.1. Схема газогенератора

1.1. Подходы к моделированию рабочего процесса в газогенераторе ГТД

Рабочие процессы любого узла, исследуемого отдельно и работающего в составе газогенератора, могут заметно отличаться. Это связано с тем, что работа в составе ГТД подчиняется ряду закономерностей. В частности, расход рабочего тела G не является независимой переменной, а определяется балансом расходов через двигатель, и задается пропускной способностью гидравлической схемы двигателя. При этом закономерности совместной работы узлов являются не одинаковыми для разных эксплуатационных режимов. Так условия работы двигателя на основных режимах работы (крейсерском, взлетном и т.п.), где компрессор вращается турбиной, существенно отличаются от режима запуска, где мощность на вращения компрессора берется от стороннего источника. Поэтому, при разработке технологии численного моделирования рабочего процесса в газогенераторе, было решено рассматривать два упомянутых случая отдельно [1].

1.2. Анализ работы газогенератора ГТД на режиме запуска и выявление особенностей моделирования режима численными методами газовой динамики

Запуск является необходимым и важным эксплуатационным режимом. Он может выполняться как на земле, так и в полете. Двигатель считается запустившимся после выхода на режим малого газа – минимальный установившийся режим работы. Запуск обычно занимает не более 60...90 сек. Во время запуска необходимо обеспечить надежность воспламенения топливовоздушной смеси, устойчивую работу камеры сгорания, отсутствие перегревов деталей турбины, достаточный запас ГДУ компрессора и т.п.

Турбина может приводить в движение компрессор только после того, как запустится камера сгорания, и уровень степени π_T^* расширения газов будет достаточным для привода компрессора. Для запуска камеры сгорания также необходимы определенные условия по расходу и давлению воздуха, а также по начальному расходу топлива. Подавать пусковое топливо в воспламенители, и затем основное топливо в камеру сгорания можно при определенном качестве распыливания, зависящем от начального расхода топлива и состава топливовоздушной смеси α , достаточном для воспламенения и устойчивого горения при низких температурах и давлениях. Таким образом, для запуска ГТД необходимо наличие некоторой степени сжатия. Поэтому для осуществления запуска ротор двигателя в наземных стартовых условиях ($H=0$, $M_n=0$) предварительно раскручивается пусковым устройством (ПУ), в роли которого может выступать электродвигатель.

Для процесса запуска уравнение движения ротора одновального ГТД имеет вид:

$$\Delta N = (N_{\text{пу}} + N_{\text{т}}) \eta_{\text{м}} - N_{\text{к}} = 4\pi^2 I n \frac{dn}{dt},$$

где $N_{\text{пу}}$ – мощность, развиваемая пусковым устройством;

$N_{\text{т}}$ – мощность, развиваемая турбиной;

$N_{\text{к}}$ – мощность, затрачиваемая компрессором;

$\eta_{\text{м}}$ – механический КПД турбокомпрессора.

Процесс запуска двигателя на земле состоит из трех этапов, которые отражены на рис. 1.2.

Этап I. Ротор двигателя раскручивается только пусковым устройством. Избыточная мощность:

$$\Delta N = N_{\text{пу}} \eta_{\text{м}} - N_{\text{с}},$$

где N_c - мощность, затрачиваемая на преодоление сопротивления ротора раскрутке. Зависимость N_c от частоты может быть определена экспериментально. В диапазоне температур более $250K$ ее можно считать неизменной.

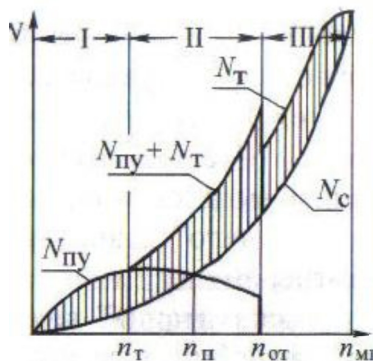
Пусковое устройство без включения камеры сгорания раскручивает ротор двигателя до частоты n_{Π} , называемой *частотой холодной прокрутки*. Ей соответствует условие $N_{\text{пу}} \eta_{\text{м}} = N_c$.

Этап II. Ротор раскручивается пусковым устройством и турбиной. При частоте вращения n_T в камеру сгорания подается топливо и происходит ее запуск. Раскрутку ротора осуществляют совместно ПУ и турбина двигателя. По мере роста частоты вращения и увеличение мощности турбины N_T становится существенным и при частоте вращения n_{Π} ПУ отключается.

Этап III. Ротор раскручивается до выхода двигателя на режим малого газа только турбиной. Момент отключения ПУ выбирается таким образом, чтобы была гарантирована величина $\Delta N > 0$ при высоких температурах наружного воздуха T_H .

По статистическим данным частота находится в диапазоне $n_T = (0,2 \dots 0,3)n_{\text{мг}}$, а $n_{\text{от}} = (0,7 \dots 0,8) \cdot n_{\text{мг}}$, где $n_{\text{мг}}$ - частота вращения ротора на режиме малого газа.

Таким образом, в момент запуска к ротору двигателя подводится работа от стороннего источника. По этому, хотя частоты вращения роторов компрессора турбины и компрессора совпадают,



n_T — подача топлива; n_{Π} - частота холодной прокрутки; $n_{\text{от}}$ - частота отключения ПУ; $n_{\text{мг}}$ - режим малого газ

Рис. 1.2. Этапы запуска ГТД

равенство их крутящих моментов и мощностей не соблюдается. Баланс расходов во всех элементах газогенератора выполняется.

Таким образом, при моделировании первого этапа запуска следует выдержать баланс расходов в двигателе и равенство частот вращения. Указанные условия легко могут быть реализованы при совместном моделировании узлов в едином программном комплексе [1,11].

1.3. Анализ работы газогенератора ГТД на основных режимах и выявление особенностей моделирования режимов численными методами газовой динамики

Работа ГТД при установившейся работе на основных эксплуатационных режимах, на которых привод компрессора осуществляется только турбиной, подчиняется условиям совместной работы узлов, которые заключаются в следующем [1]:

- должен выполняться баланс расходов – массы рабочего тела проходящего через узлы ГТД в единицу времени должны быть равны с учетом отборов и втеканий;
- частота вращения ротора компрессора должна быть равной (или пропорциональна, при использовании редуктора) частоте вращения ротора турбины;
- должен выполняться баланс мощностей. Мощность, вырабатываемая турбиной N_T , передается компрессору N_K за вычетом потерь в подшипниках ΔN_{Π} :

$$N_T = N_K + \Delta N_{\Pi}.$$

В случае моделирования рабочего процесса в газогенераторе в единой программе все условия кроме последнего первые обеспечиваются автоматически.

1.4. Алгоритмы моделирования рабочего процесса в газогенераторе ГТД на различных режимах работы

Сквозное расчетное исследование рабочего процесса в газогенераторе ГТД может быть осуществлено только в универсальных программных комплексах (например, *Ansys Fluent* или *Ansys CFX*), поскольку они обладают широким инструментарием, позволяющим одновременно охватить все происходящие в газогенераторе процессы: течение в лопаточных машинах и горение в КС. Однако специализированные программы (например, *Numeca FINE/Turbo*) позволяют рассчитывать конкретные процессы точнее, проще и быстрее по сравнению с универсальными, и видится перспективным их интеграция в процесс сквозного расчета. Так, программа *Numeca FINE/Turbo* обладает дополнительными инструментами для автоматизированного построения качественной сетки в каналах турбомашин, а также особенностями решателя (вложенность сетки, специальные периодические граничные условия), позволяющими производить расчёты турбомашин на порядки быстрее, чем, например, *CFX* и *Fluent*. Основные возможности рассмотренных CFD-комплексов рассмотрены в табл. 1.1.

Рабочий процесс в газогенераторе характеризуется следующими особенностями. Поток в лопаточных машинах характеризуется высокими числами Рейнольдса и Маха. Для его точного моделирования необходимо правильно описывать процессы в пограничных слоях вблизи пера лопаток, на втулке и периферии, а также учитывать радиальные зазоры и перетекания. Отсюда вытекают требования к качеству расчетной сетки: регулярная структура максимально точно ориентированная по линиям, значительная пространственная дискретизация, обеспечение низких значений безразмерного коэффициента стенки y^+ (менее 5...10). Пример качественной сетки конечных элементов для расчета течения в осевой турбомашине при-

веден на рис. 1.3. Число конечных элементов в одном межлопаточном канале турбомашин обычно превосходит 500 тыс.

Для моделирования течения в турбомашин обычно применяются уравнения Навье – Стокса осредненные по Рейнольдсу (*RANS*) совместно с моделями, описывающими турбулентность [4,5,8]. Наибольшее распространение получили модели *Spalart - Allmaras (S-A)*, *k-epsilon (k-e)* и *Shear – Stress - Transport (SST)* [6,7], доступные во всех упомянутых выше программах.

Таблица 1.1

Возможности современных программ по газодинамическому расчёту элементов газогенератора ГТД

Наименование комплекса	Возможности по расчету процессов	
	в турбомашин	в камере сгорания
1	2	3
<i>ANSYS Fluent</i>	Способна моделировать течения в турбомашин. Имеются существенные проблемы со стабильностью решателя. Требуются сложные настройки, доступные опытным пользователям. Процесс сходимости решения – медленный. Расчет многоступенчатых турбомашин практически не осуществим.	Имеется множество моделей смешения и горения в газовой фазе, имеется несколько моделей фазового перехода «жидкость-газ». При моделировании распыла дополнительно имеются модели формы факела, каплей жидкой среды, модели распределения размеров каплей. Имеется библиотека свойств веществ и параметров химических реакций.
<i>ANSYS CFX</i>	Программа способна моделировать течения в турбомашин. Возможно стабильное моделирование многоступенчатых машин. Имеется специализированный автоматический генератор сеток конечных элементов для турбомашин. Возможно моделирование при-	Имеется множество моделей смешения и горения в газовой фазе, имеется несколько моделей фазового перехода «жидкость-газ». При моделировании распыла имеются модели распределения размеров каплей. Имеется библиотека свойств веществ и параметров химических ре-

	трактовых полостей. Имеются автоматические шаблоны настройки моделей и визуализации результатов. Отсутствует возможность автоматического расчёта характеристик.	акций. В целом функционал в области горения аналогичен <i>ANSYS Fluent</i>, но менее развит.
--	--	--

Продолжение таблицы 1.1

1	2	3
<i>Numeca FINE/Turbo</i>	Имеется автоматический построитель сеток конечных, который позволяет легко создавать качественную сетку вокруг пера лопатки, минуя этап построения геометрии проточной части. Сетка имеет кратную вложенную структуру, которая позволяет решателю находить решение в несколько раз быстрее. Расчёт происходит на порядок быстрее и стабильнее, чем в <i>CFX</i>: Имеется инструмент автоматического расчёта характеристик. Имеются модели расчёта перепуска, радиальных зазоров и др. элементов, но их число ограничено.	Доступно моделирование только одного рабочего тела, что принципиально не позволяет проводить многокомпонентные расчёты с горением. Параметры рабочего тела могут корректироваться, что позволяет проводить расчёты для воздуха, дымовых газов и др. рабочих тел. Невозможно моделирование произвольной геометрии (допустимы только элементы турбомашин)

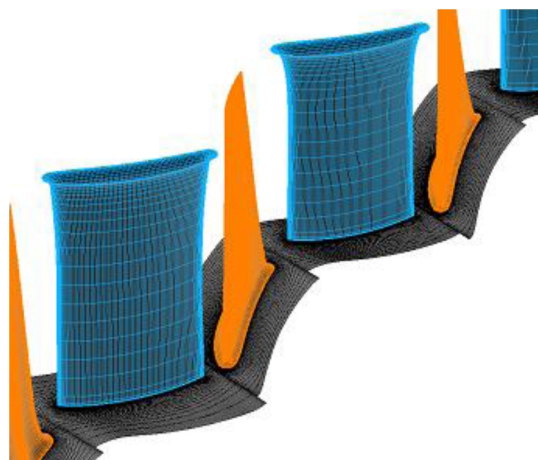
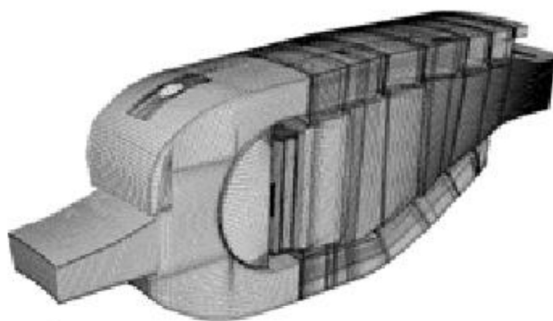


Рис. 1.3. Пример качественной расчетной сетки компрессора, созданный в программе *Numeca AutoGrid 5*

Для рабочего процесса камеры сгорания характерным является многокомпонентный состав рабочего тела [11,10], изменяющийся в процессе протекания химических реакций, мощное тепловыделение в процессе горения, значительные градиенты температур и сравнительно небольшие значения скоростей потока. Для наиболее полного моделирования таких процессов необходимо учитывать нестационарность процессов, большое количество химических реакций, процессы теплообмена, в частности, излучение, описывать физические свойства компонентов рабочего тела в полиномиальной зависимости от температуры потока и т.п.

Так как модель проточной части камеры сгорания обладает довольно сложной геометрией (с большим количеством мелких каналов, выштамповок, ступенек) построение структурированной сетки крайне затруднено, поэтому часто используются неструктурированные сетки, состоящие из тетраэдров с использованием призматических слоев на стенках. Размер пристеночного элемента обычно выбирают из соображения обеспечения $y^+ \sim 30 \dots 50$. Однако существуют примеры построения блочно-структурированной расчетной сетки и для камер сгорания (рис. 1.4). Число конечных элементов в качественной сетке камеры сгорания обычно не менее нескольких миллионов ячеек.



Рису. 1.4. Пример блочно-структурированной конечноэлементной сетки камеры сгорания

Турбулентность в камерах сгорания может моделироваться с помощью тех же моделей турбулентности, что применяются и в турбомашинах, однако наилучшие результаты при моделировании турбулентности в камере сгорания дает использование метода больших вихрей *Large-Eddy-Simulation (LES)*, который рассчитывает изменение положения крупномасштабных вихрей с течением времени. Недавно появились новые перспективные подходы к моделированию турбулентности *Detached – Eddy - Simulation (DES)* и *Limited – Numerical - Scales (LNS)* [6,7] совмещающие в себе достоинства *RANS* и *LES* подходов. Их применение может повысить качество моделирования турбулентных процессов в камере сгорания. Однако сведения о применении данных моделей при расчетах элементов ГТД в открытых источниках пока практически отсутствуют. При выборе между *RANS* и *LES*-моделями нужно иметь в виду, что *RANS* позволяет провести расчет в стационарной постановке, в то время как *LES* работает только в нестационарной [6,7].

Для качественной дискретизации расчетных областей в турбомашинах и камерах сгорания, необходимо большое (исчисляемое миллионами) число конечных элементов. Сложность процессов, происходящих в этих узлах, приводит к тому, что для их описания (в особенности горения и турбулентности) привлекаются значительное число дополнительных уравнений. По этой причине газодинамический расчет камер сгорания и турбомашин по отдельности требует значительных вычислительных ресурсов. В случае моделирования единого рабочего процесса во всем газогенераторе потребляемая мощность компьютера возрастает многократно, требуя применения суперкомпьютеров и кластеров.

Задача сквозного исследования рабочих процессов в газогенераторе может быть решена двумя путями:

- расчёт узлов газогенератора по отдельности, каждый с использованием программы, наиболее подходящей для моделирования узла. При этом согласование работы узлов

обеспечивается использованием результатов расчёта одних узлов в качестве входных условий для моделирования других;

- расчёт газогенератора целиком в одном универсальном *CFD*-пакете, обеспечивающем моделирование всех рабочих процессов с учетом упрощений, позволяющих «облегчить» задачу до приемлемого уровня.

Преимуществами первого подхода является возможность выбора наиболее эффективной *CFD* программы и оптимальных настроек модели и решателя для каждого узла газогенератора. В результате обеспечивается более качественное моделирование рабочих процессов, требующее меньших вычислительных мощностей. Так, например, камера сгорания может быть рассчитана в нестационарной постановке с *LES* подхода для описания турбулентности, в то время, как лопаточные машины могут быть рассчитаны в стационарной постановке с применением *RANS* подхода. Недостатком данной схемы является необходимость организации обмена данными между программами и моделями и управление этими процессами. Данная задача существенно усложняется тем, что разные программ используют разные физические модели, разные способы описания рабочих тел и разные форматы ввода/вывода данных.

Алгоритм расчета единого рабочего процесса газогенератора с применением специализированных программ показан на рис. 1.5.

Авторы полагают, что этот алгоритм следует реализовать на базе связки программ: для лопаточной части – *Numeca FINE/Turbo*, а для процессов горения – *Ansys Fluent*.

Второй подход легче осуществим технически. Он позволяет значительно упростить создание модели и обмен данными между моделями узлов. Кроме того появляется возможность учитывать продолжающиеся реакции в турбине и соответственно изменение свойств рабочего тела.

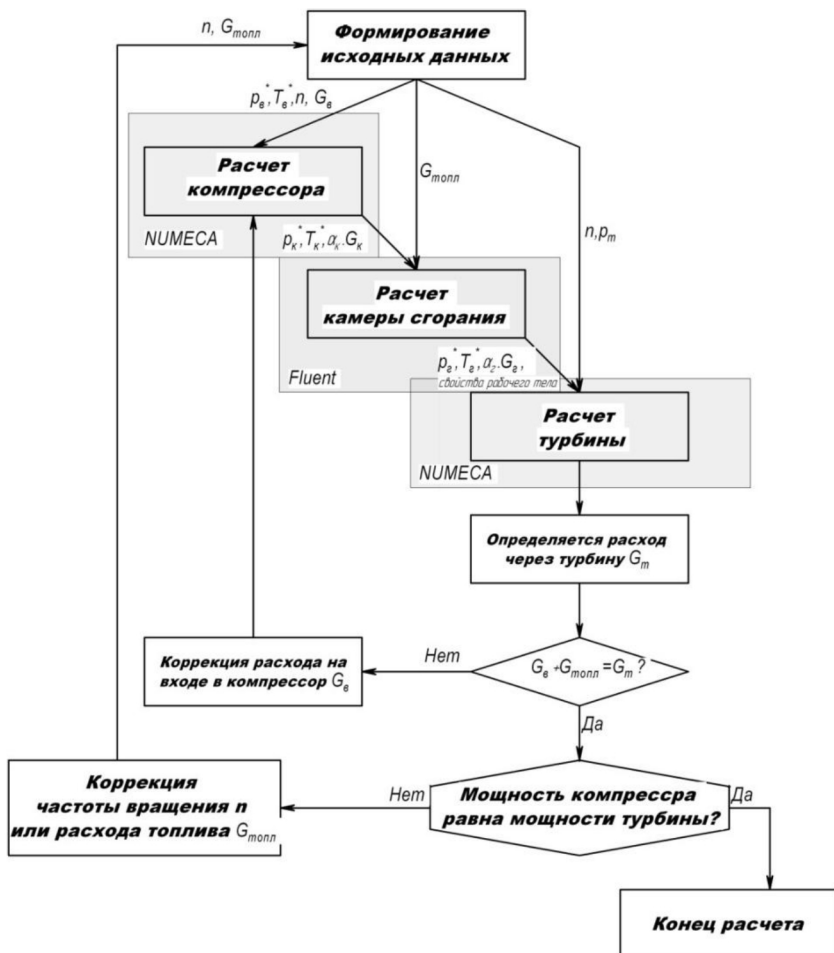


Рис. 1.5. Алгоритм расчета единого рабочего процесса газогенератора с применением специализированных программ

Однако при этом настройки модели и решателя будут «универсальными» и заведомо неоптимальными для конкретного узла. Точно также придется выбрать «осредненную» модель турбулентности. Кроме того, из-за того, что в процессе горения образуется множество различных веществ, рабочее тело рассматривается как смесь газов, каждый из которых нужно описать и для каждого оп-

ределить параметры состояния. При моделировании процесса в единой программе, расчет параметров состояния каждого вещества происходит во всех узлах, даже в тех, где он не может появиться физически. Указанные особенности приведут к увеличению времени расчета и потребных ресурсов компьютера. Задача может быть облегчена применением более грубой расчётной сетки, более простых моделей турбулентности и горения, и использованием стационарных расчётов, что приведет к потере точности расчета.

Алгоритм расчета единого рабочего процесса газогенератора в одной универсальной программе показан на рис. 1.6.

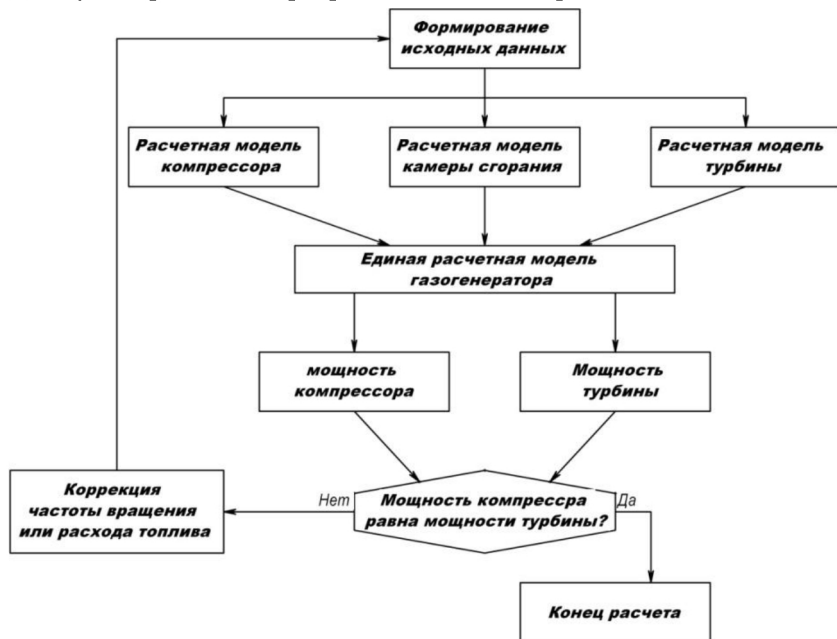


Рис. 1.6. Алгоритм расчета единого рабочего процесса газогенератора в одной универсальной программе

Данный алгоритм может быть реализован в программе *Ansys CFX* без дополнительных доработок, т.к. этот программный продукт позволяет достаточно хорошо рассчитывать как турбомашины, так и процессы горения.

Таким образом, первый подход видится более перспективным в настоящее время, поскольку позволяет достичь большей точности моделирования при умеренных вычислительных ресурсах. Основным недостатком данного подхода является одностороннее влияние предыдущего расчёта на последующий, поскольку расчёты идут друг за другом, и, как следствие, получение расхождения по значениям основных интегральных параметров потока (массовый расход, полная температура и давление) на границах расчетных зон. Расхождение можно уменьшить проведением серии итерационных расчётов для уточнения граничных условий, корректирующихся вследствие поэтапного учёта взаимного влияния узлов газогенератора. Организация итерационных расчётов требует многократной передачи граничных условий либо в «ручном» режиме, либо с использованием специальных программ-утилит.

Как отмечалось в разделе 1.2, независимо от выбранного варианта моделирования при расчёте термогазодинамических процессов газогенератора необходимыми критериями согласованности работы узлов служат [1]:

- постоянство массового расхода рабочего тела на границах расчетных зон;
- сохранение постоянства величины среднемассовой полной энтальпии потока на границах расчетных зон (при обеспечении постоянства расхода рабочего тела это гарантирует сохранение полной внутренней энергии потока);
- сохранение величин полного давления и температуры, а также профиля их распределения по высоте проточной части на границах расчетных зон (особенно актуально для лопаточных машин);
- сохранение равенства частот вращения компрессора и турбины;
- сохранение равенства мощностей (крутящих моментов) компрессора и турбины на всех режимах кроме запуска.

При моделировании рабочего процесса в единой универсальной программе все условия кроме последнего выполняются автоматически внутренними средствами программ. Однако сохранение баланса мощности не может быть реализовано стандартными программными средствами и представляет значительную сложность. В процессе расчета возможны случаи неравенства работы компрессора и турбины, например в силу повышенного тепловыделения в КС, в этом случае турбина вырабатывает больше работы, чем потребляет компрессор на моделируемой частоте вращения. Данная ситуация может возникнуть как вследствие расчётной ошибки (повышенное тепловыделение вследствие неточности расчёта процессов горения), так и вследствие неточности описания эксплуатационного режима. В реальном процессе этот дисбаланс приведет к увеличению частоты вращения ротора и повышению энергии, потребляемой компрессором, снижение работы турбины и самоустановление частоты вращения ротора на уровне, обеспечивающем согласованность работ узлов. Однако в расчётной программе не предусмотрено автоматическое изменение частоты вращения ротора. Поэтому подобный процесс может быть смоделирован пользователем только вручную или с применением управляющих программ, которые необходимо создать. В любом случае алгоритм действия достаточно прост и приведен на рис. 1.7.

В случае если частота вращения ротора n строго задана, равенство мощностей может быть достигнуто за счет коррекции расхода топлива в камере сгорания G_T по аналогичному алгоритму. Рост расхода увеличит мощность турбины, снижение – уменьшит.

Таким образом, в настоящее время могут быть применены два варианта *CFD*-моделирования газогенератора с целью его газодинамической доводки. Каждый вариант имеет определенные преимущества и недостатки. Выбор того или иного способа зависит от требуемой точности расчёта, имеющихся в распоряжении пользователя вычислительных мощностей и времени на подготовительные

работы. При любом варианте моделирования рабочего процесса газогенератора необходимо учитывать критерии согласованности отдельных узлов газогенератора.



Рис. 1.7. Алгоритм согласования мощностей компрессора и турбины

В дальнейшем было решено сконцентрироваться на разработке технологии сквозного расчета рабочего процесса в газогенераторе в едином универсальном программном комплексе, поскольку данный подход может быть легче реализован.

1.5. Общие положения технологии сквозного моделирования рабочего процесса в газогенераторе в едином универсальном программном комплексе

Технология сквозного моделирования рабочего процесса в газогенераторе в едином универсальном программном комплексе базируется на технологии моделирования газодинамических процессов в современных *CFD* программах и имеет схожую структуру. Она состоит из следующих основных этапов [4,5,8]:

- постановка задачи, задание цели моделирования, определение допущений, выбор границ расчетной области

- в целом и границ между узлами, определение списка граничных условий;
- создание геометрических моделей расчетной области каждого узла, входящего в газогенератор;
 - разбиение (дискретизация) геометрии расчетной области каждого элемента сеткой конечных элементов;
 - задание граничных условий и описание связей между границами узлов;
 - непосредственный расчет;
 - обработка и анализ полученных результатов.

На первом этапе пользователь должен поставить цель моделирования. Он должен иметь четкие представления о том, какие узлы будут моделироваться, какие допущения будут приняты, где будут располагаться входная и выходная границы расчетной области, а также границы между сопрягающимися узлами. Также пользователю необходимо собрать всю информацию для создания расчетных моделей узлов и задания граничных условий. Перечень исходных данных, необходимых для сквозного моделирования рабочего процесса в газогенераторе в едином универсальном программном комплексе приведен в разделе 1.6.

На втором этапе, опираясь на геометрию узлов входящих в состав моделируемого газогенератора, необходимо для каждого узла создать геометрическую модель проточной части, в которой движется рабочее тело. Она очерчивает геометрию расчетной области. Фактически эта модель представляет собой инвертированную геометрию моделируемого узла: это интересующее инженера область пространства, из которого вычтен объем, занимаемый деталями конструкции. Геометрия расчетной области должна быть достаточно упрощена, чтобы упростить создание качественной сетки конечных элементов, но в тоже время быть достаточно подробной, чтобы учесть влияния на структуру потока важных элементов. Например, нет необходимости создавать полную модель лопаточного

венца турбомашин, поскольку он обладает циклической симметрией и достаточно смоделировать один межлопаточный канал. Течение в других каналах будет аналогичным. С другой стороны радиальный зазор над торцом рабочей лопатки, несмотря на небольшие размеры, оказывает сильное влияние на рабочий процесс турбомашин и расчет без его учета будет некорректным.

На третьем этапе расчетные области для каждого узла должны быть дискретизированы. Это достигается путем разбиения геометрии сеткой конечных элементов. При этом следует стремиться к структурной сетке на базе четырехугольных элементов с минимальной скошенностью ячеек, грани которых должны быть сориентированы по линиям тока. Сетка должна иметь достаточную густоту в местах повышенных градиентов изменения параметров (погранслоях и вблизи скачков уплотнения). Качественно построенная сетка позволит существенно сократить погрешность дискретизации решаемых уравнений и повысить точность моделирования.

На четвертом этапе происходит создание на базе полученных сеточных моделей процессов в отдельных узлах единой модели рабочего процесса в газогенераторе, назначение граничных условий, описание свойств рабочих тел и т.п. Подробно данный процесс описан в разделе 3.1 и 3.2.

На пятом этапе производится настройка параметров решающего модуля и непосредственно расчет. Эти операции описаны в разделе 3.3.

На шестом этапе производится обработка результатов расчета: визуализация полей распределения, построение осредненных эпюр, вычисление интегральных параметров потока, визуализация полей векторов и линий тока и т.п. Технология обработки результатов сквозного моделирования рабочего процесса в газогенераторе в едином универсальном программном комплексе приведена в разделе 3.4.

Важно отметить, что сквозное моделирование рабочего процесса в газогенераторе с помощью *CFD* программ, по сути, представляет собой поверочный газодинамический расчет спроектированной конструкции. Он во много выполняет роль эксперимента и должен показать структуру потока в уже спроектированном изделии. Поэтому для создания расчетной модели необходимо обязательно детально знать геометрию всех узлов газогенератора [4,5,8].

1.6. Исходные данные необходимые для моделирования рабочего процесса в газогенераторе в едином универсальном программном комплексе и принятые допущения

Для сквозного моделирования рабочего процесса в газогенераторе в едином универсальном программном комплексе необходимы следующие исходные данные.

1. Результаты термогазодинамического расчета двигателя на интересующем режиме работы: значения полных давления p^* и температуры T^* рабочего тела на входе и выходе из каждого узла, работы компрессора L_K и турбины L_T , расходы рабочего тела на входе и выходе в каждый узел G_i , расход топлива G_T . На основе данных расчетов будут выбраны граничные условия на входе и выходе в единую модель газогенератора. Эти данные могут быть использованы для инициализации решения, а также для контроля параметров на границах узлов в процессе расчета.

2. Результаты газодинамического проектирования каждого узла [2,3]. Эта информация должна содержать основные сведения о важнейших параметрах потока внутри узла: статическом давлении p , углах входа и выхода потока α_i во всех элементах, частота вращения роторов n , величины физических (c и w) и приведенных скоростей.

3. Исчерпывающая информация о геометрии проточной части всех элементов газогенератора. В частности необходимо знать ко-

ординаты меридиональных обводов турбомашин и камеры сгорания. Геометрия проточной части, как правило, создается при газодинамическом проектировании узлов с помощью одно- и двухмерных моделей в специализированных программах. При создании технологии авторы исходили из того, что геометрия лопаток турбины и камеры сгорания была получена таким образом и известна исследователю. Однако программный комплекс *Ansys* позволяет проводить проектирование и профилирование турбомашин. Поэтому, при описании процесса создания расчетной модели ступени центробежного компрессора, будет показано, как спроектировать его элементы средствами *Ansys* [9,10].

4. Свойства (теплоемкость, вязкость) всех рабочих тел попадающих внутрь газогенератора с воздухом и топливом, а также образующихся в процессе горения в зависимости от температуры.

5. Закон регулирования двигателя на исследуемом режиме. Для согласования мощностей турбины и компрессора важно знать, как двигатель реагирует на рассогласование их работы: выдерживает постоянную частоту за счет расхода топлива, сохраняет постоянный расход топлива, либо реагирует каким-либо третьим образом [1].

При формировании технологии сквозного моделирования рабочего процесса в газогенераторе в едином универсальном программном комплексе были приняты следующие допущения:

- течение во всех элементах газогенератора рассматривается в стационарной постановке;
- течение рабочего тела в газогенераторе будет рассматриваться в цилиндрической системе координат СК, одна из осей которой совпадает с осью симметрии двигателя. Течение в НА, СА и камере сгорания изучается в стационарной (неподвижной) СК. Течение в РК компрессора и турбины – в подвижной СК, вращающейся с частотой вращения ротора;

- параметры потока в межвенцовых зазорах осредняются в окружном направлении и в таком виде автоматически передаются в качестве входного граничного условия в следующий элемент;
- свойства рабочего тела подчиняются закону состояния идеального газа;
- деформация элементов конструкции под действием тепловых и газовых сил не моделируются;
- теплообмен между стенками потоком рабочего тела не учитывается.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ХОД ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНО ПРАКТИЧЕСКОГО ЗАНЯТИЯ

Данное методическое пособие предлагает студентам авиационных ВУЗов изучить и практически освоить технологию моделирования рабочего процесса в газогенераторе в едином универсальном программном комплексе. Технология будет описываться применительно к ее реализации с помощью универсального программного комплекса *Ansys CFX 14* версии. Между тем технология носит универсальный характер и может быть реализована в других программных продуктах, которые позволяют качественно моделировать рабочий процесс в турбомашинах и камерах сгорания.

Предполагается, что студенты, которые будут выполнять данную работу, имеют базовые навыки работы в программном комплексе *Ansys CFX*, а также изучали и имеют практический опыт создания расчетных моделей турбомашин и камер сгорания в *CFD* программных комплексах в рамках соответствующих курсов на кафедрах ТиТД и ТДЛА.

Изучение технологии моделирования рабочего процесса в газогенераторе в едином универсальном программном комплексе предлагается вести на примере рабочего процесса малоразмерного одновального ГТД, состоящего из одноступенчатого центробежного компрессора, противоточной кольцевой камеры сгорания и одноступенчатой осевой турбины. Схема меридионального сечения проточной части газогенератора приведена на рис. 2.1 и 2.2. Проточная

часть была спроектирована совместными усилиями кафедр ТиТД и ТДЛА СГАУ.

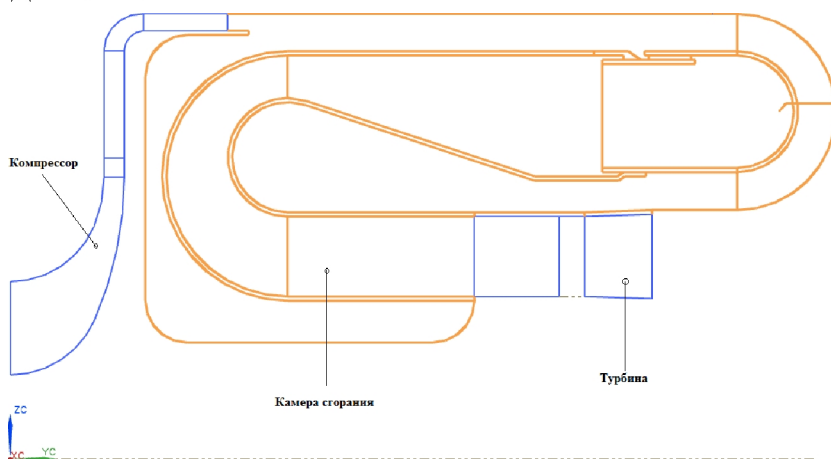


Рис. 2.1. Схема меридионального сечения проточной части газогенератора

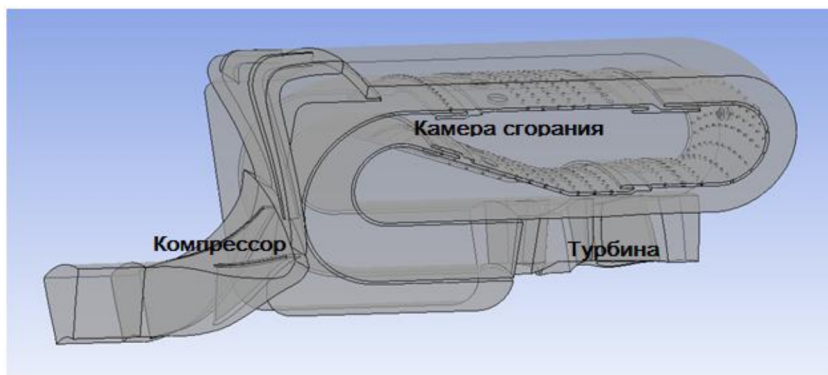


Рис. 2.2. Общий вид 3D модели газогенератора ГТД

Данный двигатель был выбран, поскольку имеет максимально простую конструкцию и идеально подходит для обучения студентов, дипломников, магистрантов и аспирантам моделированию рабочего процесса в газогенераторе. Построение модели данного двигателя не требует серьезных временных затрат, а

решение задачи не требует чрезмерных вычислительных ресурсов и возможно на обычном ПК.

Поскольку полагается, что студенты, выполняющие данную работу, имеют представление и практические навыки создания расчетных моделей потока в турбомашинах и камере сгорания [9,10], то процесс их создания не описывается. При выполнении лабораторной работы предполагается, использовать в качестве отправной точки созданные авторами расчетные модели рабочих процессов во всех элементах ГТД. Эти эталонные расчетные модели конечноэлементных моделей узлов газогенератора приложены в электронном виде к методическому пособию на диске.

В случае если студент желает провести исследования газогенератора любого другого ГТД ему необходимо самому создать сеточные модели рабочих процессов в камере сгорания и всех венцах лопаточных машин, используя рекомендации, изложенные в учебных пособиях [9,10]. Модели всех узлов, входящих в газогенератор должны быть построены в одной системе координат, ось которой совпадает с осью вращения ротора.

Как отмечалось в разделе 1.6 важным исходным данным для сквозного моделирования рабочего процесса в газогенераторе являются результаты термогазодинамического расчета. Данные для рассматриваемого двигателя приведены в табл. 2.1.

Для моделирования рабочего процесса газогенератора кроме данных приведенных в табл. 2.1. Необходимо знать также частоту вращения ротора, расход топлива и температуру атмосферного воздуха на входе в двигатель. Значения этих переменных каждый студент, выполняющий данную работу, должен взять в табл. 4.1 (раздел 4) в соответствии с номером варианта, который назначит преподаватель.

Решение о зачете выполнения работы студентом преподаватель принимает на основании усного опроса после выполнения задания. Примеры контрольных вопросов для отчета приведены в разделе 5.

Таблица 2.1

Результаты термогазодинамического расчета двигателя

Параметр	Размерность	Значение параметра	Параметр	Размерность	Значение параметра
M_n	---	0	η_z	---	0,98
V_n	км/ч	0	σ_{kc}	---	0,94
H	м	0	q_m	---	0,01674
p_n^*	Па	101325	p_Γ^*	Па	424320
p_e^*	Па	100310	π_m	---	2,37
π_K^*	---	4,5	η_m^*	---	0,83
η_K^*	---	0,76	L_T	Дж/кг	204060
L_K	Дж/кг	204370	T_m^*	К	924,39
π_e^*	---	1	p_m^*	Па	177953
G_B	кг/с	0,756	π_{cp}	---	1,7669
T_e^*	К	288,16	$\eta_{цикла}$	---	0,245
T_K^*	К	489,81	$P_{y\partial}$	Н·с/кг	528,96
p_K^*	Па	451400	P	Н	400
T_z^*	К	1100	$C_{y\partial}$	кг/(кН·ч)	0,1133
p_m	Па	196357			

3. ТЕХНОЛОГИЯ САЕ-МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ГАЗОГЕНЕРАТОРА ГТД В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ANSYS CFX

Технология моделирования рабочего процесса в газогенераторе с помощью единой расчетной модели для разных режимов в целом осуществляется одинаково. Сеточные модели всех лопаточных венцов турбомашин и камеры сгорания, созданные заранее в одной и той же системе координат, загружаются в программу *CFX-PRE*, в которой задаются граничные условия, описываются свойства рабочего тела, задаются настройки различных физических моделей (горения, турбулентности, смещения), настраиваются параметры решателя, а также вывод справочных данных во время расчета по которым оценивается степень схождения задачи. Расчет производится в программе *CFX Solver*. Визуализация и анализ результатов расчета осуществляется в программе *CFX-Post*.

Ниже в данном разделе приводятся основные положения разработанной совместными усилиями кафедр ТиТД и ТДЛА СГАУ технология создания единой расчетной модели рабочего процесса в газогенераторе ГТД в программе *CFX-PRE*, а также процесс решения задачи в программе *CFX-Solver* на двух режимах работы: запуска и крейсерском.

Разработанная технология поясняется на примере газогенератора одновального ГТД, состоящего из одноступенчатого центробежного компрессора, противоточной камеры сгорания и одноступенчатой осевой турбины (рис. 2.1 и 2.2).

3.1. Технология САЕ моделирования рабочего процесса газогенератора ГТД на режиме запуска

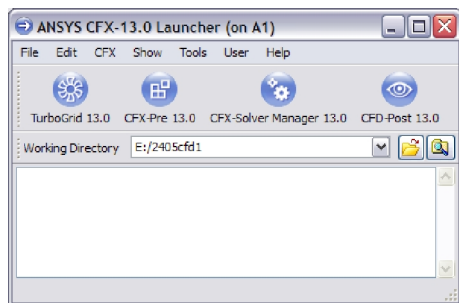


Рис. 3.1. Стартовое окно программы *Ansys CFX*

Основные операции по созданию и настройке расчетной модели единой модели рабочего процесса в газогенераторе проводится в программе *CFX-PRE*. Она входит в состав программного комплекса *Ansys CFX*. Поэтому,

чтобы запустить препроцессор следует сначала открыть стартовое окно *CFX*:

Пуск → Все программы → Ansys 14.0 → Fluid Dynamics → CFX

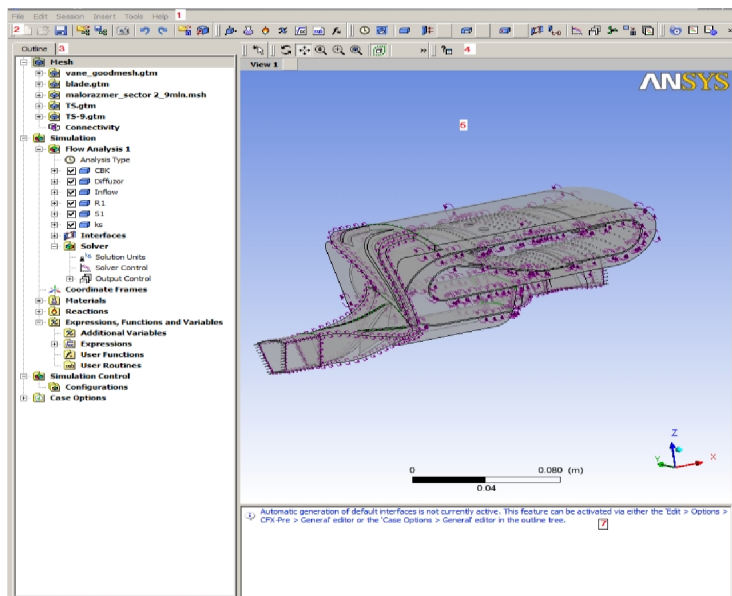
В данном окне (рис. 3.1) перед началом работы нужно выбрать рабочую папку, в которой будут сохраняться результаты работы (*Working Directory*). После этого производится запуск программы *CFX-PRE* нажатием соответствующей кнопки в меню на рис. 3.1.

Внешний вид рабочего окна программы *Ansys CFX Pre* и его основные элементы показаны на рис. 3.2.

После запуска программы *CFX-Pre* необходимо создать новый проект, нажав в панели быстрого доступа кнопку  и назначив ему желаемое имя.

После этого можно перейти к загрузке в проект созданных заранее сеточных моделей всех элементов входящих в газогенератор. Для этого в дереве проекта следует выбрать команду *Mesh - Import Mesh* (рис. 3.3). Загружаемые сеточные модели компонентов турбо-

машин должны иметь формат *.gtm*, а модель камеры сгорания - *.msh*.



1. - Главное меню; 2. - Панель быстрого доступа; 3. - Главное дерево проекта;
4. - Панель навигации; 5. - Графическое окно; 6. - Окно сообщений

Рис. 3.2. Внешний вид рабочего окна программы *CFX-Pre*

Общее количество элементов расчетной сетки: 4812000.

Общее количество узлов расчетной сетки: 2615000.

При загрузке моделей важно соблюдать масштабность модели и правильно указывать единицы измерения. Если после загрузки моделей окажется, что они расположены вдоль разных осей,

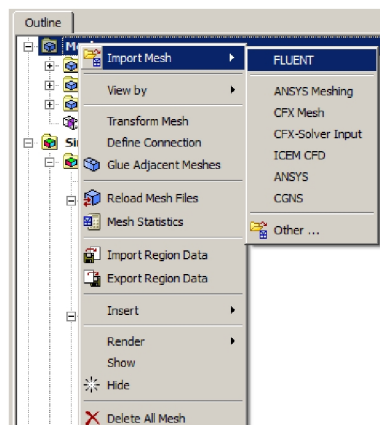


Рис. 3.3. Команда импорта сеточных моделей

существует возможность повернуть, подвинуть отдельные модели с помощью команды *Transform Mesh* (рис. 3.4).

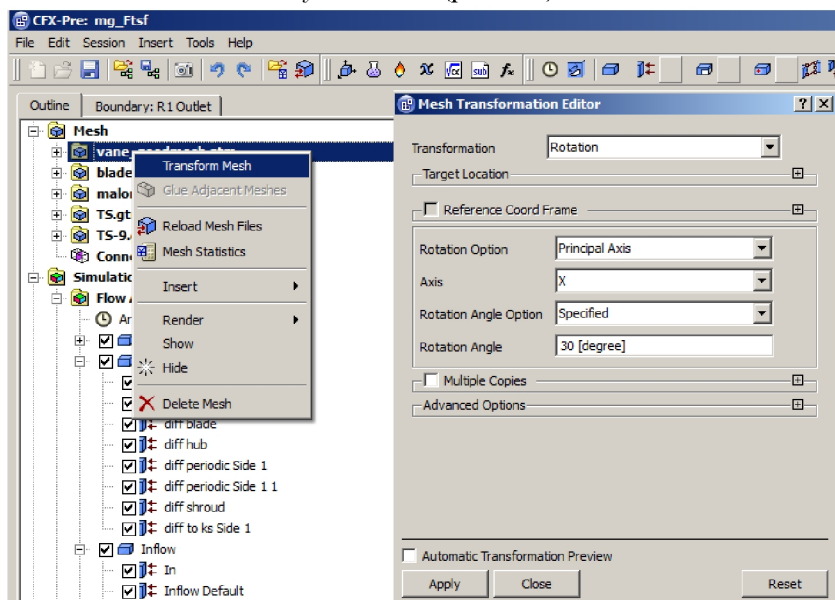


Рис. 3.4. Меню перемещения сеточных моделей

На следующем этапе пользователь должен определить, в какой постановке будет производиться расчет: стационарной либо нестационарной. Для этого в меню *Analysis Type* дерева проекта выбирается тип *Steady State* (стационарный). Для подтверждения введенных или выбранных данных необходимо нажимать кнопки *OK* или *Apply*.

После этого во вкладке *Materials* (рис. 3.5) выбирается рабочее тело – воздух подчиняющийся закону идеального газа (Менделеева – Клайперона) *Air Ideal Gas* (рис 3.6). Свойства такого рабочего тела приведены в табл. 3.1. В расчете будет полагаться, что все основные свойства рабочего тела (теплоемкость, молярная масса, теплопроводность) не будут меняться при изменении параметров по-

тока, только динамическая вязкость полагается зависимой от температуры.

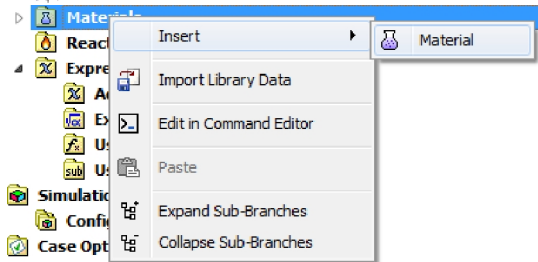


Рис. 3.5. Вызов меню Materials

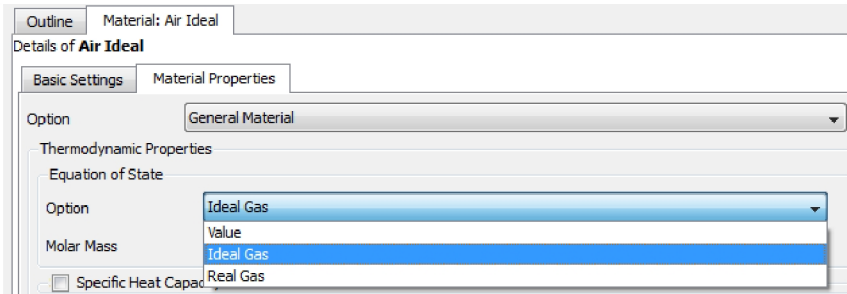


Рис. 3.6. Меню выбора рабочего тела

Таблица 3.1

Свойства рабочего тела

Термодинамические свойства	Изменяются по закону идеального газа
Молярная масса	28,96 кг/кмоль
теплоемкость	1004,4 Дж/кг*К
Динамическая вязкость	по уравнению Сатерленда: $\mu = 1,716e-5 \times \left(\frac{273,15 + 110,56}{T + 110,56} \right) \times \left(\frac{T}{273,15} \right)^{1,5}$
Теплопроводность	0,0261 Вт/м*К

В программе CFX-PRE имеется обширная встроенная база данных свойств различных газов и жидкостей с уже введенными тер-

могазодинамическими свойствами. Свойства рабочего можно просмотреть дважды щелкнув ЛКМ на интересующем рабочем теле.

Для того, чтобы задать изменение вязкости в соответствии с уравнением Сатерленда во вкладке *Material Properties* выбирается пункт *Transport Properties* и в нем делаются настройки, показанные в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Настройки в пункте *Transport Properties* вкладки *Material Properties*, необходимые для задания изменения вязкости воздуха в соответствии с уравнением Сатерленда

<i>Option</i>	<i>Sutherlands Formula</i>
<i>Ref. Temperature</i>	273.15
<i>Reference Viscosity</i>	1.716e-05 (кг/м*с)
<i>Sutherlands Constant</i>	110.56
<i>Temperature Exp.</i>	1.5

Затем, используя меню *Domain* (рис. 3.7), вызываемое нажатием кнопки  на панели быстрого доступа, создаются домены (расчетные зоны) входной области, рабочего колеса компрессора, диффузора компрессора; камеры сгорания; соплового аппарата и рабочего колеса турбины. Для удобства в дальнейшем будут называться по имени узла двигателя, которому они соответствуют. Создание большого количества расчетных зон вызвано потребностью рассчитывать подвижные элементы в подвижной СК и необходимыми для этого настройками частоты вращения, а также применения интерфейсов позволяющих передавать параметры потока от неподвижных доменов к подвижным, и наоборот.

В появившемся, после нажатия кнопки *Domain Location*, выбирается интересующую область модели (рис.3.7).

После создания доменов, требуется дополнительная настройка их свойств (рис. 3.8):

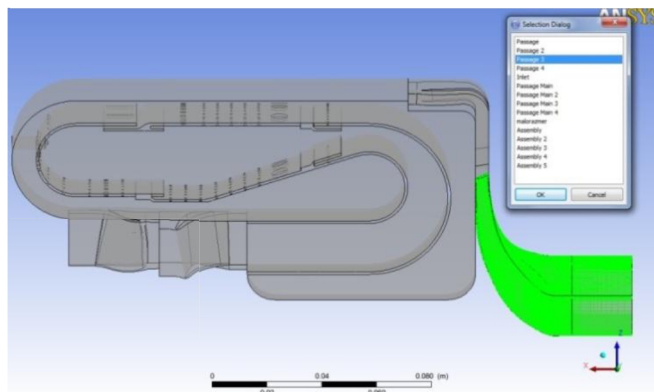


Рис. 3.7. Выбор домена модели

- во вкладке *Basic Settings* выбирается рабочее тело (*Air Ideal Gas*), устанавливается равным нулю справочное давление (*Reference Pressure*), также в подменю *Domain Motion* указывается, является домен стационарным (неподвижным), либо он совершает вращательное движение. При задании вращения домена необходимо указать размерность угловой скорости (рад/с, об/мин, об/с)

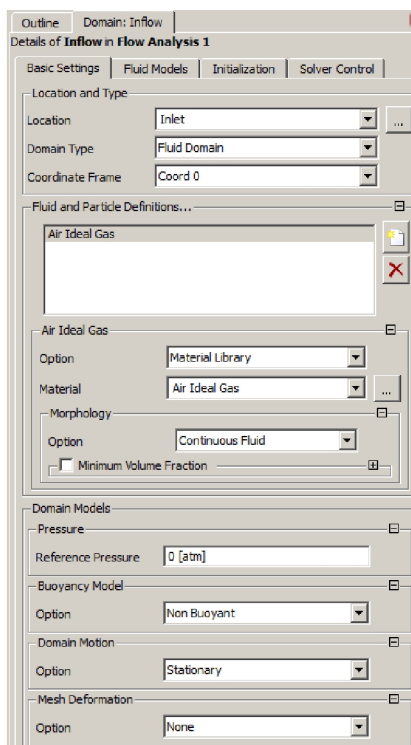


Рис. 3.8. Меню настройки свойств домена

и ось вращения (*Global X*). Так как создаваемая единая расчетная модель рабочего процесса газогенератора имеет множество подвижных границ и доменов, для облегчения работы можно воспользоваться функцией *Expressions* для задания частоты вращения. В *CFX-Pre* есть возможность задания численных значений, каких либо параметров расчетной модели с помощью буквенной переменной. При этом значение переменной указывается только в одном месте - специальном меню *Expressions*, это позволяет менять множественные настройки модели во всех местах, только изменяя значение переменной. Для ее включения



необходимо нажать на кнопку в панели быстрого доступа и ввести имя переменной, например *n*. После этого в дереве проекта в меню *Expressions, Functions and Variables* во вкладке *Expressions* создастся пункт с тем же обозначением (*n*) и там, в поле *Definition* вводится значение частоты вращения ($-72600 \text{ [rev min}^{-1}\text{]}$). В дальнейшем если потребуется изменить частоту вращения ротора достаточно просто изменить значение переменной *n*.

- во вкладке *Fluid Models* необходимо включить учет теплообмена: во вкладке *Heat Transfer* выбрать пункт *Total Energy*. Здесь же выбирается модель турбулентности и ее настройки в подменю *Turbulence*: модель турбулентности *k-Epsilon*, и функции стенки *Scalable Wall Function*. Следует отметить, что эти настройки относятся ко всей расчетной модели (рабочее тело, теплообмен, модели турбулентности, модель горения и др.) и применяются ко всем доменам модели.

Соответственно для рассматриваемого в качестве примера простейшем ГТД должны быть созданы домены: *Inflow* (входная область), *CBK* (РК ЦБК), *Diffuzor* (диффузор), *ks* (камера сгорания),

CAI (сопловой аппарат), *RKT1* (рабочее колесо). Все домены будут моделироваться в абсолютной СК, кроме доменов рабочих колес турбомашин, которые рассматриваются в подвижной, вращающейся со скоростью вращения ротора.

После создания доменов можно приступить к наложению граничных условий. Для его создания необходимо на панели быстрого доступа вызвать нажатием ЛКМ команды *Boundary*  и выбрать домен, которому будет принадлежать граничное условие. Для создания граничного условия входа необходимо провести следующие настройки (табл. 3.3 и рис. 3.9).

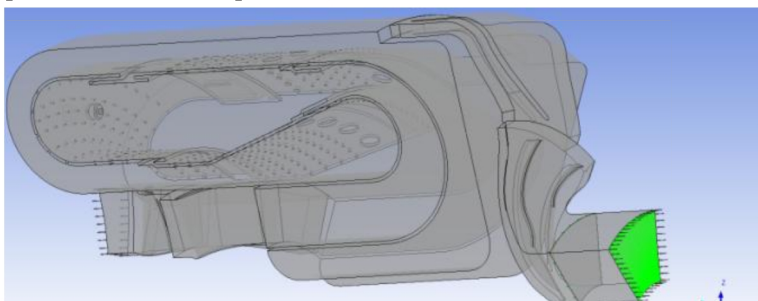


Рис. 3.9. Входная граница единой модели газогенератора

Далее создается выходное граничное условие - граница на выходе модели в домене рабочего колеса турбины (*RKT*) (табл. 3.4 и рис. 3.10).

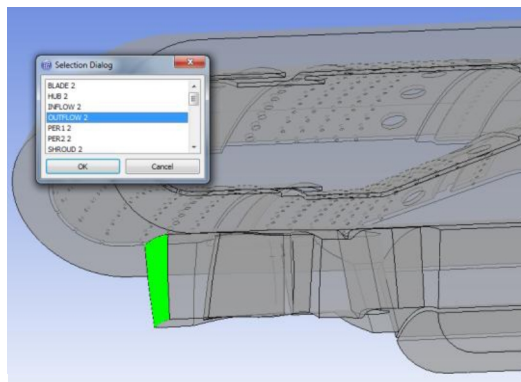


Рис. 3.10. Выходная граница единой модели газогенератора

Таблица 3.3

Настройки параметров входного граничного условия в меню *Boundary*

Name	in
Вкладка <i>Basic Settings</i>	
<i>Boundary Type</i>	выбирается тип <i>Inlet</i>
<i>Location</i>	выбирается передняя грань <i>Inflow</i>
Вкладка <i>Boundary Details</i>	
<i>Flow Regime</i>	<i>Subsonic</i>
<i>Mass And Momentum Option</i>	<i>Total Pressure (stable)</i>
<i>Relative Pressure</i>	<i>101325 (Pa)</i>
<i>Flow Direction Option</i>	<i>Normal to Boundary Condition</i>
<i>Turbulence Option</i>	<i>Medium (Intensity=5%)</i>
<i>Heat Transfer Option</i>	<i>Total Temperature</i>
<i>Total Temperature</i>	<i>288 K</i>

Таблица 3.4

Настройки параметров выходного граничного условия в меню *Boundary*

Name	out
Вкладка <i>Basic Settings</i>	
<i>Boundary Type</i>	выбирается тип <i>Outlet</i>
<i>Location</i>	выбирается выходная грань <i>RKT</i>
Вкладка <i>Boundary Details</i>	
<i>Flow Regime</i>	<i>Subsonic</i>
<i>Mass And Momentum Option</i>	<i>Average Static Pressure</i>
<i>Relative Pressure</i>	<i>101325 (Pa)</i>
<i>Pres. Profile Blend</i>	<i>0.05</i>
<i>Pressure Averaging Option</i>	<i>Circumferential</i>

Затем во вращающихся доменах рабочих колес турбомашин необходимо выделить неподвижные грани (над верхними торцами лопаток) для корректного моделирования поведения потока в радиальных зазорах. В домене *CBK* создается граничное условие со следующими параметрами (табл. 3.5 и рис. 3.11). Аналогично описывается то, что поверхность над верхним торцом РК турбины также неподвижна (для домена *RKT*) (рис. 3.12).

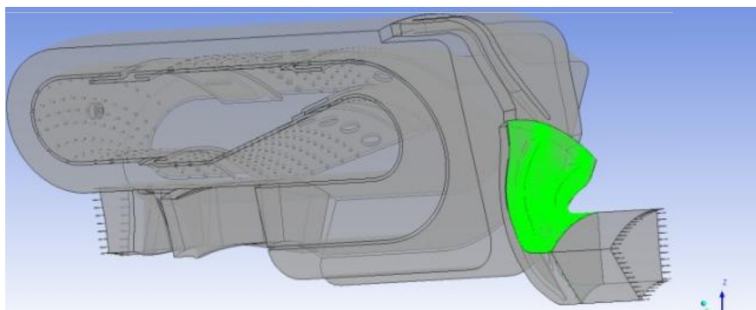


Рис. 3. 11. Неподвижная стенка в домене компрессора

Таблица 3.5

Настройки параметров неподвижной стенки над верхним торцом ЦБК в меню *Boundary*

<i>Name</i>	<i>cbk shroud</i>
Вкладка <i>Basic Settings</i>	
<i>Boundary Type</i>	выбирается тип <i>Wall</i>
<i>Location</i>	выбирается верхняя грань <i>CBK</i>
Вкладка <i>Boundary Details</i>	
<i>Mass And Momentum Option</i>	<i>No Slip Wall</i>
<i>Wall Velocity Option</i>	<i>Counter Rotating Wall</i>
<i>Wall Roughness Option</i>	<i>Smooth Wall</i>
<i>Heat Transfer Option</i>	<i>Adiabatic</i>

Для передачи данных между отдельными расчетными зонами служат специальные проницаемые граничные условия - интер-

фейсы (*Interfaces*). Например, чтобы создать интерфейс между доменами *Inflow* и *CBK* (рис. 3.13) нужно на панели быстрого доступа нажать щелкнуть ЛКМ на кнопку  и сделать настройки, представленные в таблице 3.6 и на рис. 3.14.

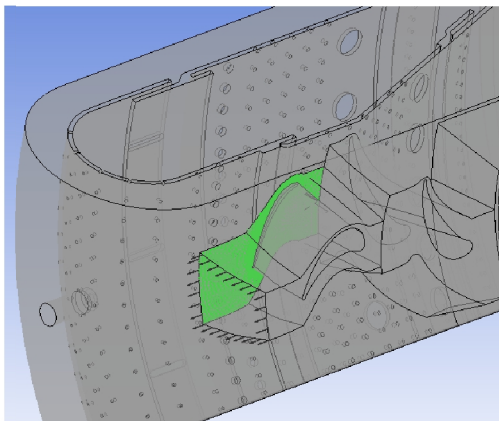


Рис. 3.12. Неподвижная грань в домене турбины

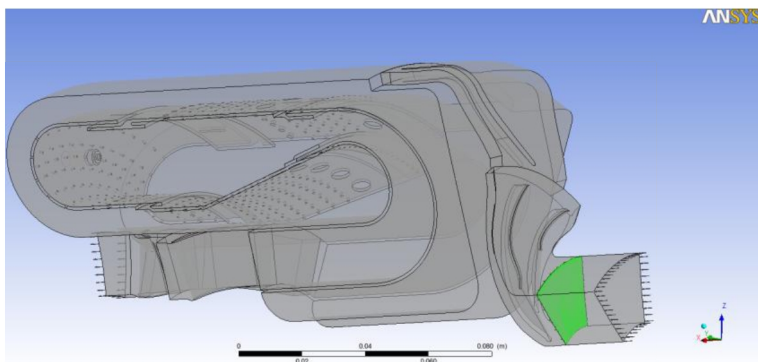


Рис. 3.13. Интерфейс – проникаемая граница между входным доменом и доменом компрессора

Остальные интерфейсы между доменами настраиваются аналогичным образом, только значение *Pitch Ratio* будет меняться в зависимости от отношения углов секторов сопряженных доменов. Для интерфейса между доменами рабочего колеса центробежного

компрессора и диффузора $Pitch\ Ratio$ равен $9/13$. Для интерфейса между доменами диффузора и камеры сгорания $Pitch\ Ratio$ равен $13/8$. Для интерфейса между доменами камеры сгорания и соплового аппарата турбины $Pitch\ Ratio$ равен $8/13$. Для интерфейса между доменами соплового аппарата турбины и рабочего колеса турбины $Pitch\ Ratio$ равен $13/23$.

Особенностью расчетных сеток вращающихся элементов лопаточных машин, созданных в сеткогенераторе *Ansys TurboGrid* с учетом радиальных зазоров, является несовпадающая сетка в зазоре (рис. 3.15). В результате этой особенности в радиальном зазоре над лопаткой фактически установлены непроницаемые стенки. Для учета перетечек в зазоре рабочих колес лопаточных машин необходимо настроить интерфейсы в доменах *CBK* и *RKT*.

Для этого необходимо создать внутренние интерфейсы над основной и дополнительной (сплиттером) лопатками рабочего колеса компрессора и над лопаткой рабочего колеса турбины, соответственно *cbk int1*, *cbk int2* и *rkt int*. Ниже в таблицах 3.7...3.9 приведены настройки для этих интерфейсов.

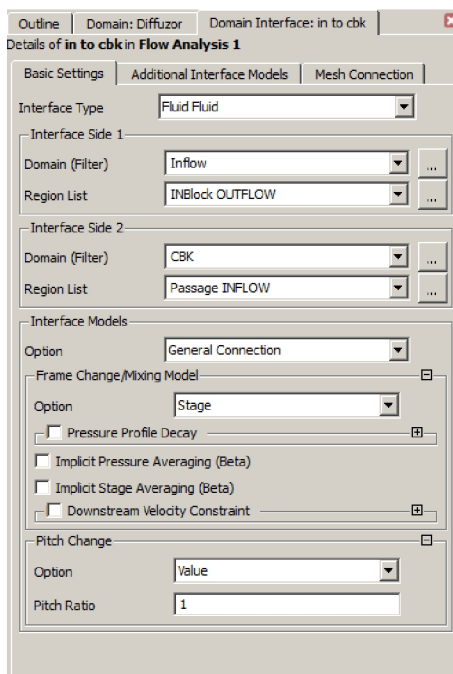


Рис. 3.14. Меню настройки свойств интерфейса

Таблица 3.6

Настройки параметров передачи данных через проницаемые границы

<i>Name</i>	<i>In to cbk</i>
Вкладка <i>Basic Settings</i>	
<i>Interface Type</i>	выбирается тип <i>Fluid Fluid</i>
<i>Interface Side 1</i>	<i>Inflow</i>
<i>Region List</i>	выбирается выходная грань <i>In-flow</i>
<i>Interface Side 2</i>	<i>CBK</i>
<i>Region List</i>	выбирается входная грань <i>CBK</i>
<i>Interface Models Option</i>	<i>General Connection</i>
<i>Frame Change/Mixing Model Option</i>	<i>Stage</i>
<i>Pitch Change Option</i>	<i>Value</i>
<i>Pitch Ratio</i>	<i>1</i>

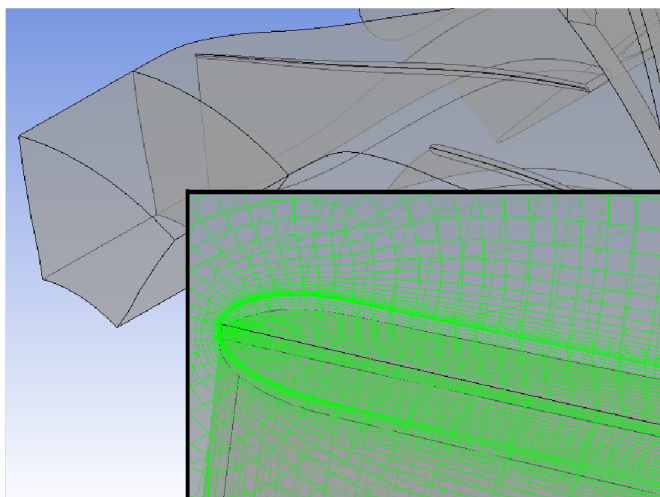


Рис. 3.15. Несовпадающая сетка в радиальном разрезе

Таблица 3.7

Настройка интерфейса в радиальном зазоре над лопаткой РК ЦБК

<i>Name</i>	<i>cbk int1</i>
Вкладка <i>Basic Settings</i>	
<i>Interface Type</i>	выбирается тип <i>Fluid Fluid</i>
<i>Interface Side 1</i>	<i>CBK</i>
<i>Region List</i>	выбирается первая грань в радиальном зазоре над основной лопаткой <i>CBK:Main Blade SHROUD TIP GGI SIDE 1</i>
<i>Interface Side 2</i>	<i>CBK</i>
<i>Region List</i>	выбирается вторая грань в радиальном зазоре над основной лопаткой <i>CBK:Main Blade SHROUD TIP GGI SIDE 2</i>
<i>Interface Models Option</i>	<i>General Connection</i>
<i>Frame Change/Mixing Model</i>	<i>None</i>

Таблица 3.8

Настройка интерфейса в радиальном зазоре над сплиттром РК ЦБК

<i>Name</i>	<i>cbk int2</i>
Вкладка <i>Basic Settings</i>	
<i>Interface Type</i>	выбирается тип <i>Fluid Fluid</i>
<i>Interface Side 1</i>	<i>CBK</i>
<i>Region List</i>	выбирается первая грань в радиальном зазоре над сплиттром <i>CBK:Splitter Blade 1 SHROUD TIP GGI SIDE 1</i>
<i>Interface Side 2</i>	<i>CBK</i>
<i>Region List</i>	выбирается вторая грань в радиальном зазоре над сплиттером <i>CBK: лопаткой CBK: Splitter Blade 1 SHROUD TIP GGI SIDE 2</i>
<i>Interface Models Option</i>	<i>General Connection</i>
<i>Frame Change/Mixing Model</i>	<i>None</i>

После создания интерфейса в графическом окне на границах расчетных моделей, выбранных проницаемыми, появляются специальные символы в виде зеленых конусов (рис. 3.16).

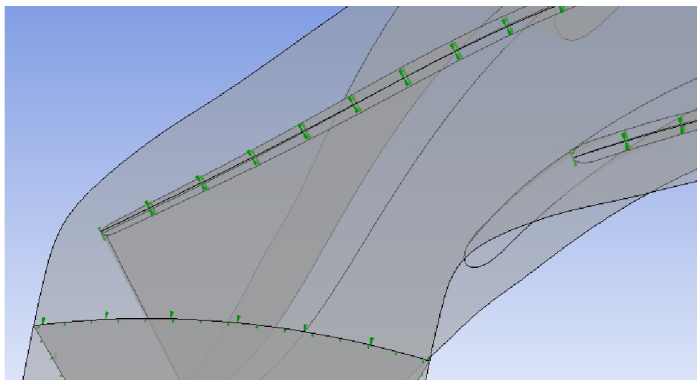


Рис. 3.16. Маркеры проницаемых интерфейсов на расчетной модели

Таблица 3.9

Настройка интерфейса в радиальном зазоре над лопаткой РК турбины

<i>Name</i>	<i>rkt int</i>
Вкладка <i>Basic Settings</i>	
<i>Interface Type</i>	выбирается тип <i>Fluid Fluid</i>
<i>Interface Side 1</i>	<i>RKT</i>
<i>Region List</i>	выбирается первая грань в радиальном зазоре над лопаткой <i>RKT: SHROUD TIP GGI SIDE 1</i>
<i>Interface Side 2</i>	<i>RKT</i>
<i>Region List</i>	выбирается первая грань в радиальном зазоре над лопаткой <i>RKT: SHROUD TIP GGI SIDE 2</i>
<i>Interface Models Option</i>	<i>General Connection</i>
<i>Frame Change/Mixing Model Option</i>	<i>None</i>

Так как лопаточные венцы моделируются с помощью одного межлопаточного канала, а камера сгорания в виде сектора в 45^0 , то также необходимо провести настройку граничного условия перио-

дичности для всех доменов. Для этого также используется меню *Domain Interface*. Действия, которые следует выполнить для настройки периодических границ *Inflow*, представлены в таблице 3.10 и рис. 3.17 и 3.18.

Таблица 3.10

Настройка периодических границ домена *Inflow*

<i>Name</i>	<i>Inflow_per</i>
Вкладка <i>Basic Settings</i>	
<i>Interface Type</i>	выбирается тип <i>Fluid Fluid</i>
<i>Interface Side 1</i>	<i>Inflow</i>
<i>Region List</i>	выбирается левая боковая грань <i>Inflow</i>
<i>Interface Side 2</i>	<i>Inflow</i>
<i>Region List</i>	выбирается правая боковая грань <i>Inflow</i>
<i>Interface Models Option</i>	<i>Rotational Periodicity</i>
<i>Axis Definition Option</i>	<i>Coordinate Axis</i>
<i>Rotational Axis</i>	<i>Global X</i>

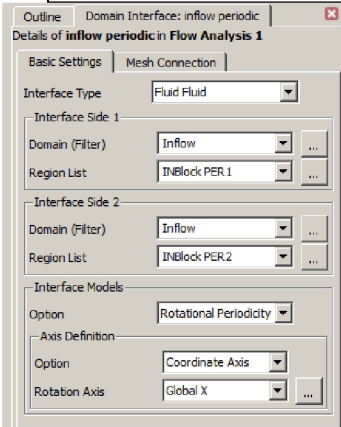


Рис. 3.17. Меню настройки
граничного условия перио-
дичности

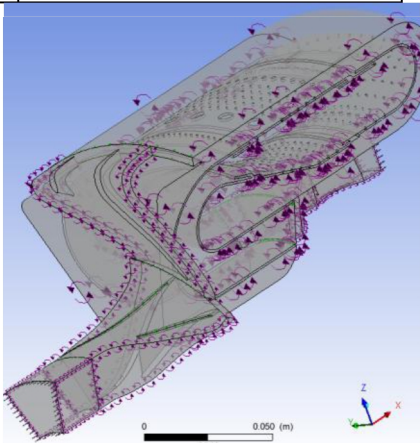


Рис. 3.18. Внешний вид модели с настроен-
ными граничными и периодическими усло-
виями

Таким же образом необходимо создать периодические граничные условия для всех расчетных зон. После задания соответствующих граничных условий в графическом окне препроцессора на модели появляются маркеры, которые могут помочь определить грани на которые не наложенные граничные условия (рис. 3.19).

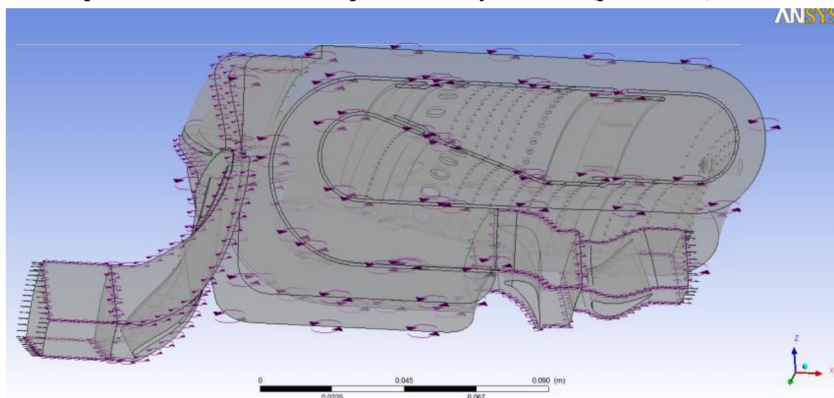


Рис. 3.19. Внешний вид модели с настроенными граничными и периодическими условиями

Следующим этапом необходимо произвести настройку решающего модуля. Она производится во вкладке *Solver, Solver Control* дерева проекта (рис.3.20 и 3.21). В этом меню указываются максимальное количество итераций, после проведения которых решатель остановит процесс расчета (если не будет достигнуто условие сходимости), потребный уровень невязок, порядок точности дискретизации. Также настраиваются параметры, влияющие на скорость сведения решения. Для данного типа задач рекомендуется использовать физический масштаб времени: *Timescale Control* → *Physical Timescale*. Типовые настройки меню *Solver Control* приведены в таблице 3.11.

Для сложных расчетных моделей, состоящих из множества доменов, стандартный критерий сходимости процесса решения является недостаточным.

Оценку схождения решения удобно проводить по графику изменения интегральных параметров потока во время расчета. Для модели газогенератора в качестве таких интегральных параметров удобно принять значения массового расхода на входе и выходе модели, степень сжатия в рабочем колесе компрессоре (π_k), коэффициент восстановления давления в диффузоре компрессора σ_d и степень расширения в турбине (π_r).

Таблица 3.11

Настройки меню *Solver Control*

<i>Advection Scheme Option</i>	<i>High Resolution</i>
<i>Turbulence Numerics Option</i>	<i>First Order</i>
<i>Convergence Control Max. Iterations</i>	<i>2000</i>
<i>Timescale Control</i>	<i>Physical Timescale</i>
<i>Physical Timescale</i>	<i>1e-006 [s]</i>
<i>Convergence Criteria Residual Target</i>	<i>0.000001</i>

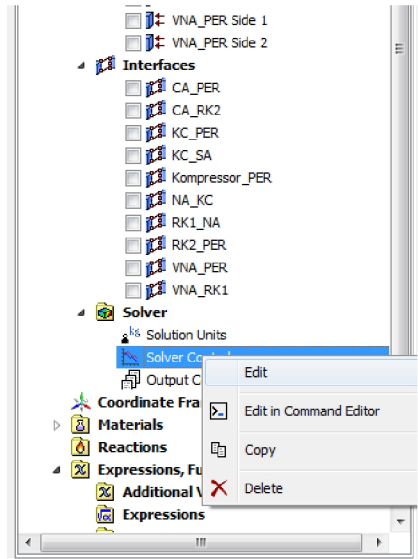


Рис. 3.20. Вызов меню *Solver Control*

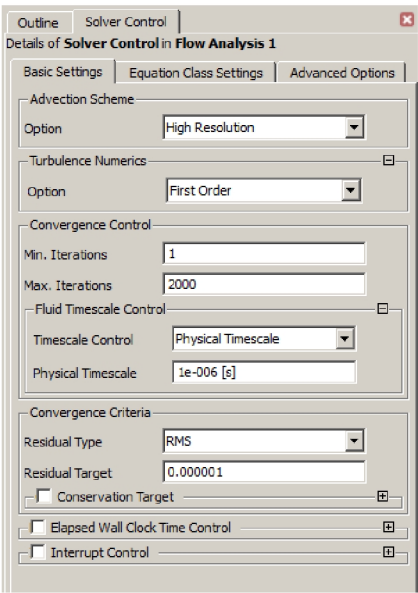


Рис. 3.21. Внешний вид меню *Solver Control*

Для того чтобы в процессе решения была возможность отслеживать изменения интересующих параметров необходимо в уже упоминавшемся выше меню *Expressions* создать переменные позволяющие рассчитывать интересующие нас параметры. Для того, чтобы задать указанные параметры с помощью команды *Expressions* необходимо создать следующие выражения, приведенные в таблице 3.12. Уравнения можно писать вручную, либо воспользоваться специальной ссылкой для создания функций. Нажатием правой кнопки мыши выбираем требуемые параметры для задачи уравнений (рис. 3.22).

Таблица 3.12

Выражения для вычисления интегральных параметров потока с помощью команды *Expressions*

<i>Expression</i>	<i>Definition</i>
<i>G1</i>	<i>massFlow()@In*9</i>
<i>G2</i>	<i>massFlow()@R1 Outlet*23</i>
<i>Pi cbk</i>	<i>massFlowAve(Total Pressure)@REGION:OUTFLOW Passage 3/massFlowAve(Total Pressure)@REGION:INFLOW Passage 3</i>
<i>Pi dif</i>	<i>massFlowAve(Total Pressure)@REGION:OUTFLOW Passage 4/massFlowAve(Total Pressure)@REGION:INFLOW Passage 4</i>

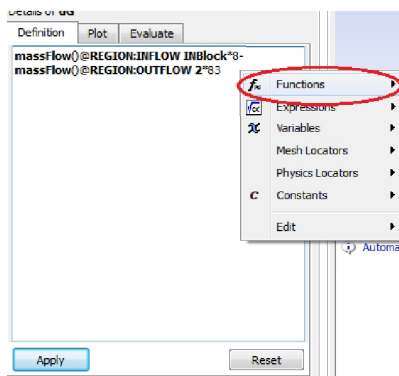


Рис. 3.22. Вкладка создания функции

После создания выражений необходимо перейти в меню настройки *Solver*, находящемся во вкладке *Output Control* (рис.3.23). Здесь необходимо

перейти во вкладку *Monitor* и активировать функцию *Monitor Objects*. Затем в меню *Monitor* - функцию *Points and Expressions*. Здесь необходимо создать новые переменные для отображения.

С помощью иконки  создается переменная (название переменной не должно полностью совпадать с названием соответствующего выражения), выбирается в *Option Expression* и вводится имя соответствующего ему выражения.

В целом, настройки необходимые для расчета рабочего процесса в газогенераторе с помощью единой расчетной модели на режиме запуска закончены. Остается только записать созданную расчетную модель в формате *.def. Для этого следует воспользоваться кнопкой  на панели быстрого доступа.

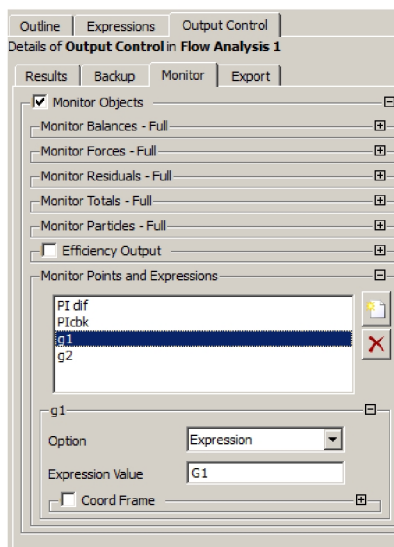


Рис. 3.23. Внешний вид меню *Output Control*

3.2. Технология САЕ моделирования рабочего процесса газогенератора ГТД на крейсерском и взлетном режимах

Технология моделирования единого процесса в газогенераторе ГТД на основных эксплуатационных режимах, например на взлетном или крейсерском, в целом схожа в технологией моделирования режима запуска, приведенной выше (раздел 3.1), в тоже время имеет существенные отличия. Основные из них следующие:

- вместо однокомпонентного рабочего тела (воздуха) необходимо использовать многокомпонентную смесь газов, состоящую из кислорода (O_2), азота (N_2), углекислого газа (CO_2), паров воды (H_2O) и паров топлива ($JetA$);
- на основных эксплуатационных режимах в камере сгорания происходит горение топлива, поэтому к решаемым уравнениям Навье - Стокса добавляется модель горения *Eddy Dissipation*. Простейшая модель горения состоит из одной стехиометрической химической реакции. Применение упрощенной модели горения не приведет к существенным погрешностям оценки тепловыделения и в тоже время не потребует существенного увеличения компьютерных ресурсов;
- появляется дополнительное входное граничное условие на соплах форсунок, через которое в двигатель будет вводиться топливо;
- возникает необходимость оценивать разность мощностей потребляемой компрессором и вырабатываемой турбиной;
- необходимость использования прединициализации решения для его запуска;
- из-за значительных изменений параметров в проточной части, для увеличения стабильности решения на начальном этапе счета необходимо запускать расчет на достаточно небольших значениях физического шага по времени

Physical Timescale (около 10^{-9}), с последовательным увеличением шага по времени (рекомендуется кратно 10) до достижения значения *Physical Timescale* = $10^{-4} \dots 10^{-3}$.

Расчетную модель единого процесса в газогенераторе ГТД на основных эксплуатационных режимах удобно создавать на базе модели на режиме запуска путем ее перенастройки. Таким образом, после запуска программы *Ansys CFX-Pre* следует с помощью команды *File - Open Case* загрузить созданный ранее (раздел 3.1) файл единой модели рабочего процесса в газогенераторе на режиме запуска с расширением *.def или *.cfx.

В базе данных свойств рабочих тел *CFX-Pre* имеются многокомпонентные смеси с уже настроенными теплофизическими свойствами и параметрами химических реакций. Сначала необходимо выбрать в библиотеке данных *CFX* многокомпонентную рабочую смесь *Jet A - Air*. Для этого в главном дереве проекта нужно щелкнуть ПКМ на вкладке *Materials* и в появившемся меню выбрать команду *Import Library Data* (рис. 3.24).

В появившемся меню уже загружена база данных *Materials-standard*. Для загрузки баз данных реакций горения необходимо с помощью иконки  перейти из папки *materials-extra* в папку *reactions-extra* и выбрать файл *JetA.ccl* (рис. 3.25).

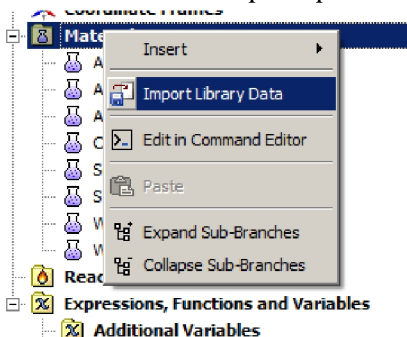


Рис. 3.24. Выбор нового рабочего тела

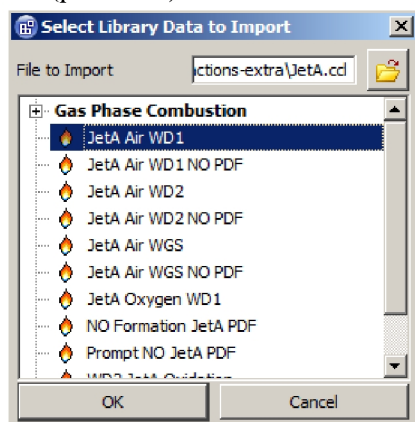


Рис. 3.25. Меню *Import Library Data*

После этого нужно выбрать *JetA Air WDI* и нажать *OK*. В результате в дереве проекта во вкладке *Materials* появятся новые компоненты: (O_2 , N_2 , CO_2 , H_2O , *JetA*). Свойства этих компонентов в *CFX* заданы через кусочные полиномы в формате *NASA SP-273*:

- теплоёмкость:

$$\frac{C_p^0}{R} = a_1 + a_2 T + a_3 T^2 + a_4 T^3 + a_5 T^4$$

-энтальпия

$$\frac{H^0}{R} = a_1 T + \frac{a_2}{2} T^2 + \frac{a_3}{3} T^3 + \frac{a_4}{4} T^4 + \frac{a_5}{5} T^5 + a_6$$

- энтропия

$$\frac{S^0}{R} = a_1 \ln T + a_2 T + \frac{a_3}{2} T^2 + \frac{a_4}{3} T^3 + \frac{a_5}{4} T^4 + a_7$$

Каждый параметр задается двумя наборами коэффициентов (таблица 3.13) для двух температурных диапазонов. Границы диапазонов обозначаются температурами: нижней, средней и высшей: T_{lower} , $T_{midpoint}$, T_{upper} .

Также во вкладке дерева проекта появятся доступные химические реакции: *JetA Air WDI* и *JetA Oxygen WDI*. Щелкнув по ним ПКМ можно просмотреть параметры, стехиометрические коэффициенты и условия протекания реакций.

После появления новых компонентов рабочего тела их можно добавить в проект. Для этого необходимо перейти в меню настройки домена (например, *Inflow*) и во вкладке *Basic Settings* в

поле *Fluid1 Option* поменять с *Material Library* на *Material Definition* (рис. 3.26). Таким образом, появляется возможность задать в качестве рабочего тела реагирующую смесь.

Затем нужно перейти во вкладку *Fluid Models*, где в поле *Combustion Option* выбрать модель горения *Eddy Dissipation*, а в поле *Reacting List* - *JetA Air WD1* (рис. 3.27).

Таблица 3.13

Свойства компонентов рабочего тела

	$M, \frac{\text{Джс}}{\text{моль}}$	a_1	$a_2 \cdot 10^{-4}, K^{-1}$	$a_3 \cdot 10^{-7}, K^{-2}$	$a_4 \cdot 10^{-11}, K^{-3}$	$a_5 \cdot 10^{-15}, K^{-4}$	a_6, K	a_7	T, K	
O_2^*	31,99	3,69758	6,1352	-1,25884	1,77528	-1,13643	-1233,93	3,18917	1000	5000
		3,21294	11,27486	-5,75615	131,3877	-876,855	-1005,25	6,03474	300	1000
N_2	28,01	2,92664	14,8798	-5,68476	10,097	-6,75335	-922,798	5,98053	1000	5000
		3,29868	14,0824	-39,6322	564,151	-2444,86	-1020,9	3,95037	300	1000
CO_2	44,01	4,45362	31,4017	-12,7841	23,94	-16,6903	-48967	-0,95539 6	1000	5000
		2,27572	99,2207	-104,091	686,669	-2117,28	-48373,1	10,1885	300	1000
керосин (JetA)	167,3	24,8802	782,501	-315,51	578,789	-398,28	-43110,7	-93,6553	1000	5000
		2,08692	1331,5	-811,575	2940,93	-6519,52	-35912,8	27,3553	273,1	1000
H_2O	18,02	2,67215	30,5629	-8,73026	12,01	-6,39162	-29899,2	6,86282	1000	5000
		3,38684	34,7498	-63,547	696,858	-2506,59	-30208,1	2,59023	300	1000

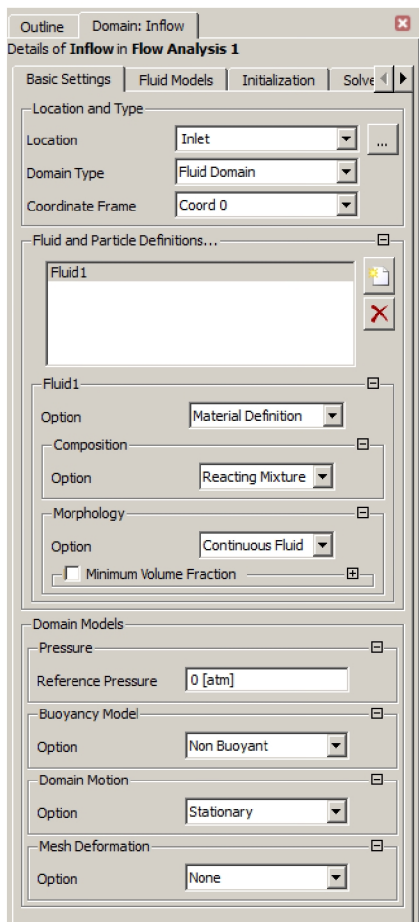


Рис. 3.26. Задание нового рабочего тела для домена *Inflow*

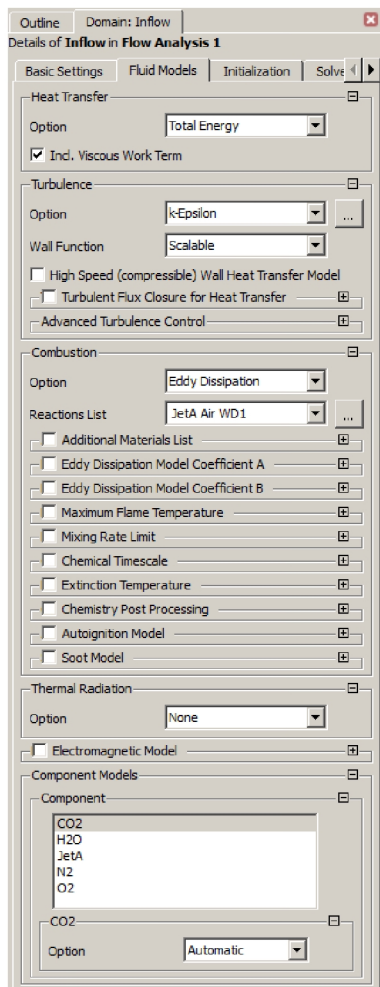


Рис. 3.27. Меню настройки моделей в домене *Inflow*

Необходимо также проверить, чтобы в поле *Component Models* для азота (N_2) выбрана опция *Constraint*, что означает вычисление концентрации в ячейке по остаточному принципу. Сделанные настройки подтверждаются нажатием кнопок *Apply* или *OK*.

Затем необходимо создать граничное условие для впрыска топлива в камеру сгорания. Для этого в домене камеры сгорания на поверхности для впрыска топлива создается граничное условие со свойствами, приведенными в таблице 3.14. Также необходимо внести изменения в уже созданное граничное условие на входе в домене входной области (табл. 3.15).

Для облегчения запуска расчета многокомпонентной смеси необходимо задать начальное распределение компонентов в расчетной модели - прединициализацию. Для этого во всех доменах расчетной модели следует указать распределение массовых долей присутствующих в рабочем теле газов: O_2 - 0,23; N_2 - 0,77. В меню настройки домена необходимо перейти во вкладку *Initialization*, активировать опцию *Domain Initialization* и ввести данные согласно таблице 3.16 (рис. 3.28).

Таблица 3.14

Настройки входного граничного условия для топлива

<i>Name</i>	<i>Toplivo</i>
Вкладка <i>Basic Settings</i>	
<i>Boundary Type</i>	выбирается тип <i>Inlet</i>
<i>Location</i>	выбирается грань, через которую впрыскивается топливо
Вкладка <i>Boundary Details</i>	
<i>Flow Regime</i>	<i>Subsonic</i>
<i>Mass And Momentum Option</i>	<i>Mass Flow Rate</i>
<i>Mass Flow Rate</i>	0.000628 kg/s
<i>Flow Direction Option</i>	<i>Normal to Boundary Condition</i>
<i>Turbulence Option</i>	<i>Medium (Intensity=5%)</i>
<i>Heat Transfer Option</i>	<i>Static Temperature</i>
<i>Total Temperature</i>	300 K
<i>JetA Option</i>	<i>Mass Fraction</i>
<i>Mass Fraction</i>	1

Таблица 3.15

Изменения входного граничного условия для воздуха

<i>Name</i>	<i>In</i>
Вкладка <i>Basic Settings</i>	
<i>Boundary Type</i>	выбирается тип <i>Inlet</i>
<i>Location</i>	выбирается передняя грань <i>Inflow</i>
Вкладка <i>Boundary Details</i>	
<i>Flow Regime</i>	<i>Subsonic</i>
<i>Mass And Momentum Option</i>	<i>Total Pressure (stable)</i>
<i>Relative Pressure</i>	101325 (Pa)
<i>Flow Direction Option</i>	<i>Normal to Boundary Condition</i>
<i>Turbulence Option</i>	<i>Medium (Intensity=5%)</i>
<i>Heat Transfer Option</i>	<i>Total Temperature</i>
<i>Total Temperature</i>	288 K
<i>O2 Option</i>	<i>Mass Fraction</i>
<i>Mass Fraction</i>	0.23

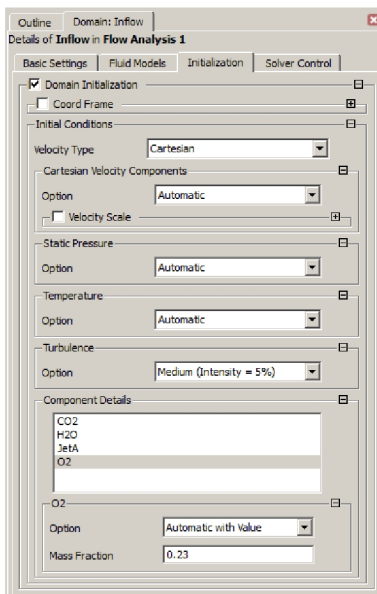


Рис. 3.28. Настройка
прединициализации в домене *Inflow*

Аналогичные действия необходимо провести для всех доменов расчетной области: *Inflow*, *CBK*, *Diffuzor*, *ks*, *CA1*, *RKT1*.

Затем следует провести настройки во вкладке *Expressions* дерева проекта. В ней необходимо создать ряд новых переменных для отображения в ходе расчета: крутящего момента турбины и компрессора, коэффициент потерь полного давления камеры сгорания и среднемассовую температуру перед сопловым аппаратом турбины. Новые переменные создаются с помо-

щью выражений приведенных в таблице 3.17.

Таблица 3.16

Параметры инициализации компонентного состава рабочего тела

<i>O2 Option</i>	<i>Automatic with Value</i>
<i>Mass Fraction</i>	<i>0.23</i>

Затем пользователь должен перейти вкладку *Solver* дерева проекта для настройки параметров счета и включения новых параметров для отображения. Во вкладке *Solver Control* устанавливается максимальное количество итераций 3000 и значение *Physical Time-scale* = 10^{-9} . Во вкладке *Output Control* создаются новые параметры для отображения во время расчета: *Mkrcompressor*, *Mkrturbine*, *Sigma*, *Tg*, как было описано выше в разделе 3.1 (рис. 3.29).

Таблица 3.17

Дополнительные выражения для вычисления интегральных параметров потока с помощью команды *Expressions*

<i>Expression</i>	<i>Definition</i>
<i>G1</i>	<i>massFlow()@In*9</i>
<i>G2</i>	<i>-massFlow()@R1 Outlet*23</i>
<i>MkrCBK</i>	<i>(torque_x()@REGION:Main Blade+torque_x()@REGION:Splitter Blade 1)*9</i>
<i>MkrTurb</i>	<i>-torque_x()@REGION:BLADE 2*23</i>
<i>sigma ks</i>	<i>massFlowAve(Total Pressure)@REGION:ns_outlet/massFlowAve(Total Pressure)@REGION:ns_inlet</i>
<i>tg</i>	<i>massFlowAve(Total Temperature)@REGION:ns_outlet</i>

В целом, настройки необходимые для расчета рабочего процесса в газогенераторе с помощью единой расчетной модели на режиме запуска закончены. Остается только записать созданную рас-

четную модель в формате *.def. Для этого следует воспользоваться кнопкой  на панели быстрого доступа.

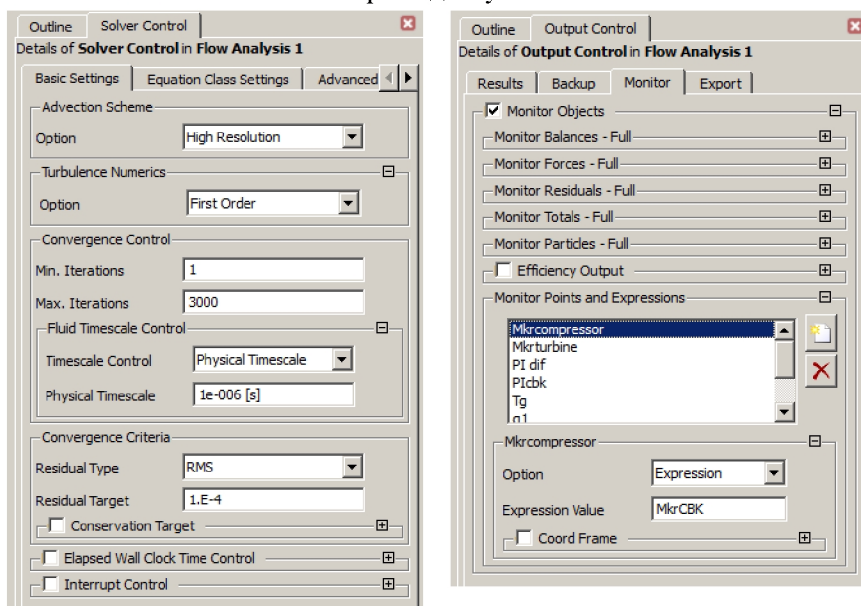


Рис. 3.29. Настройка параметров счета единой модели рабочего процесса в газогенераторе на основных режимах

3.3. Настройка решателя программного комплекса Ansys CFX при моделировании рабочего процесса газогенератора ГТД

Решающий модуль программного комплекса *Ansys CFX* отделен от других модулей программы и выделен в отдельную программу *CFX-Solver Manager*. Запуск программы осуществляется непосредственно из препроцессора *CFX* щелчком ЛКМ на кнопке . Перед непосредственным запуском программы пользователю будет предложено сохранить исходный файл расчета в формате *.def, а после этого автоматически запускается *CFX-Solver Manager*. Внешний вид стартового окна этой программы показан на рис. 3.30.

При запуске решателя из препроцессора текущая расчетная модель со всеми сделанными настройками будет загружена в *CFX-Solver Manager* автоматически, и ее имя будет указано в поле *Solver Input File*.

Современные компьютеры имеют несколько процессоров. Однако по умолчанию для расчета будет использован только один из них. Чтобы задействовать в расчете большее число процессоров следует воспользоваться командой

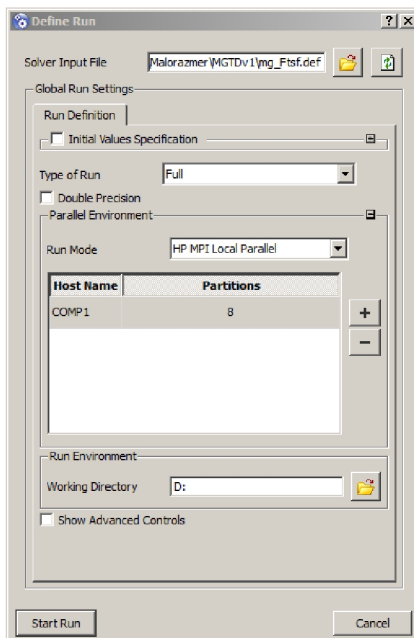


Рис. 3.30. Меню Define Run

Run Mode → HP MPI Local Parallel

Параллельный расчет позволяет сократить время вычислений за счет разделения задачи на несколько процессов, запускаемых одновременно на разных процессорах (или физических ядрах одного процессора). Нажимая кнопки (+) и (-) нужно выставить необходимое количество процессов расчета. Оно не должно превышать доступного числа ядер используемого компьютера. Т.е. на четырех-ядерном компьютере целесообразно запускать четыре процесса, на двухядерном - два.

После выполнения настроек запускается процесс расчета нажатием кнопки *Start Run* (начать выполнение).

После этого начнется выполнение расчета. Внешний вид рабочего окна программы *CFX – Solver Manager* при этом изменится.

Основную его часть будет занимать графики изменения невязок и заданных пользователем переменных в процессе расчета (рис. 3.31).

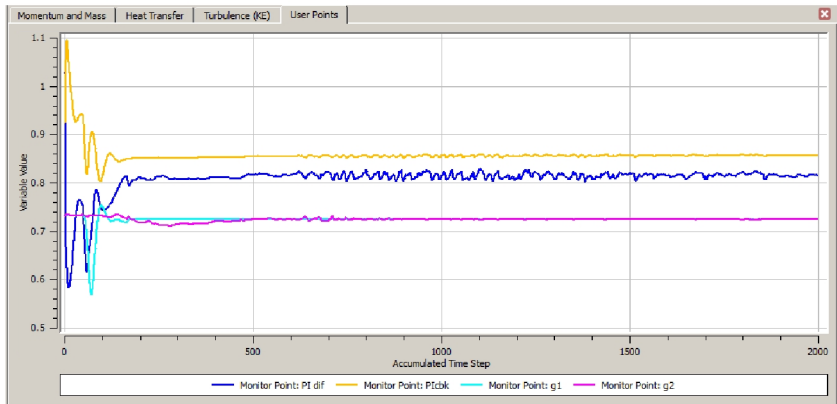


Рис. 3.31. График изменения пользовательских переменных в процессе расчета выводимый CFX – Solver Manager

Поскольку решаемая задача является чрезвычайно сложной, то для повышения устойчивости процесса вычисления его запуск производился с пониженными значениями физического шага по времени (*Physical Timescale*). После того, как решение начало устанавливаться

(прекратились резкие колебания невязок и параметров, а их значения стали асимптотически стремиться к некоторому уровню), для сокращения времени расчета можно увеличить величину физического шага по времени. CFX- Solver Manager позволяет вносить изменения в настройки решателя, не останавливая процесса расчета. Для того,

Name	Value
--- DOMAIN INTERFACE : R1 to S1	
--- DOMAIN INTERFACE : S1 to S1 Periodi...	
--- DOMAIN INTERFACE : cbk int1	
--- DOMAIN INTERFACE : cbk int2	
--- DOMAIN INTERFACE : cbk periodic	
--- DOMAIN INTERFACE : cbk to diff	
--- DOMAIN INTERFACE : diff periodic	
--- DOMAIN INTERFACE : diff to ks	
--- DOMAIN INTERFACE : in to cbk	
--- DOMAIN INTERFACE : inflow periodic	
--- DOMAIN INTERFACE : ks periodic	
--- DOMAIN INTERFACE : ks to ca1	
--- OUTPUT CONTROL :	
--- SOLVER CONTROL :	
--- Turbulence Numerics	
--- ADVECTION SCHEME :	First Order
--- CONVERGENCE CONTROL :	
Maximum Number of Iterations	2000
Minimum Number of Iterations	1
Physical Timescale	1e-001[s]
Timescale Control	Physical Timescale
--- CONVERGENCE CRITERIA :	
--- DYNAMIC MODEL CONTROL :	

Рис. 3.32. Изменение шага по времени во время расчета

чтобы это сделать необходимо щелкнуть ЛКМ на кнопке  в панели быстрого доступа программы. В появившемся меню динамического управления счетом следует скорректировать значение *Physical Timescale* в большую сторону на порядок (рис. 3.32). Указанную операцию следует повторить несколько раз, плавно увеличивая размер шага. Завершать расчет газогенератора ГТД на режиме запуска рекомендуется при значении *Physical Timescale* равным 10^{-2} секунды. Для расчета крейсерского режима газогенератора ГТД *Physical Timescale* рекомендуется ниже, примерно 10^{-3} секунды.

В процессе решения необходимо следить не только за поведением невязок стандартных параметров, но и за невязками интегральных параметров. Наибольшее время установления у параметров камеры сгорания: коэффициента восстановления полного давления и среднемассовой температуры торможения на выходе (входе в турбину) (рис. 3.33).

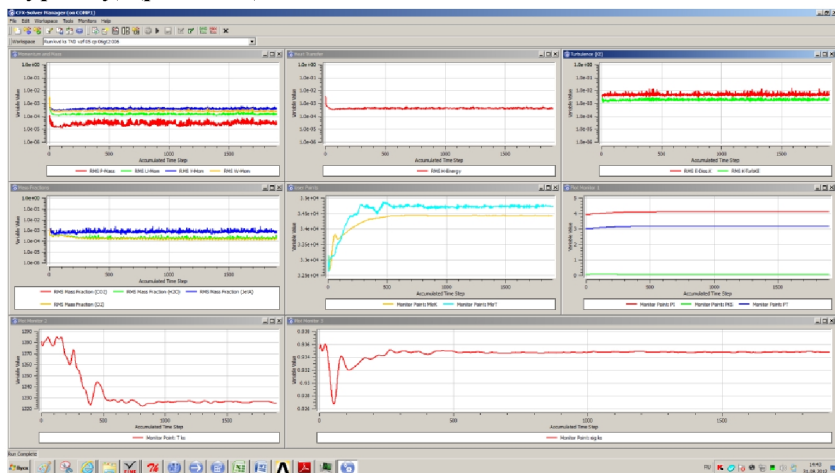


Рис. 3.33. Изменение невязок во время расчета рабочего процесса в газогенераторе

После установления решения при максимальных рекомендованных значениях временного шага и достижения потребной погрешности по крутящему моменту ($<4\%$) можно переходить к обработке результатов решения: выявления взаимного влияния узлов двигателя на характеристики отдельных узлов.

Завершение расчета происходит автоматически по достижении указанного числа итераций, либо значения невязок. Для принудительной остановки расчета можно воспользоваться иконкой . По завершении расчета автоматически создается файл результатов (*.res) и появляется окно предлагающее запустить *CFD- Post* для анализа результатов.

3.4. Визуализация результатов расчета рабочего процесса в газогенераторе ГТД

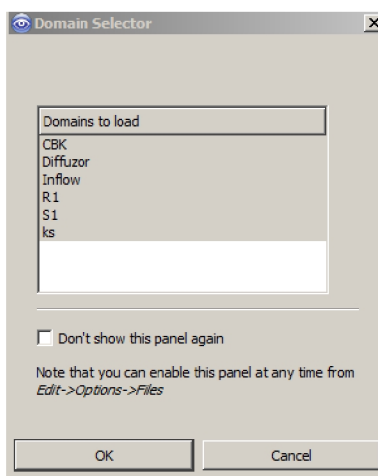


Рис. 3.34. Окно *Domain Selector*

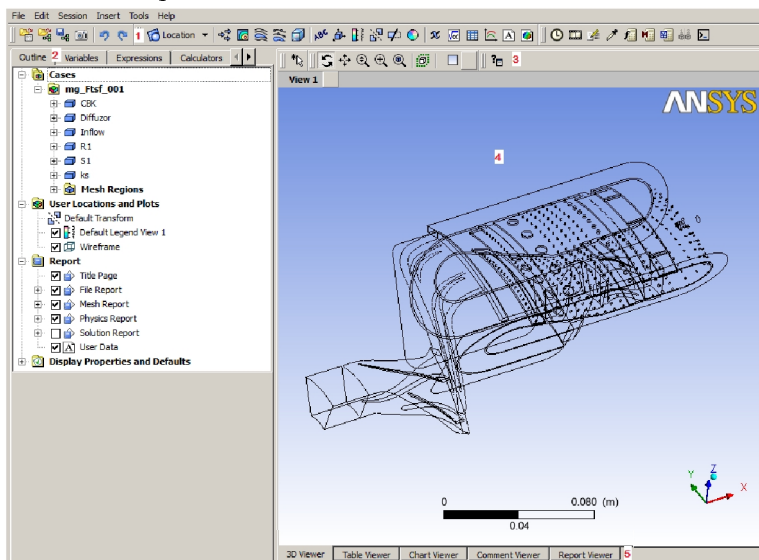
Обработка результатов расчета производится в программе *CFD Post*, который отделен от *CFX* и является отдельной программой. Запуск программы может быть произведен непосредственно из решателя *CFX Solver* с помощью иконки  на панели быстрого доступа.

После запуска постпроцессора появляется окно *Domain Selector*, в котором можно выбрать элементы газогенератора,

результаты расчета в которых следует загрузить для визуализации (рис. 3.34). В ряде случаев для уменьшения времени отрисовки имеет смысл загружать только те компоненты, которые интересуют пользователя.

Внешний вид рабочего окна программы *CFD Post* с загруженными результатами расчета рабочего процесса в единой расчетной модели газогенератора изображен на рис. 3.35.

Для обработки результатов расчетов турбомашин в *CFD Post* предусмотрен специальный режим *Turbo*. Для работы в этом режиме необходимо перейти во вкладку *Turbo* (в верхней части поля 2 на рис. 3.35) и выполнить распознавание элементов турбомашин. При распознавании лопаточных машин постпроцессор определяет поверхности втулочного и периферийного обводов, а также поверхность лопатки. Это нужно для построения осредненных полей в меридиональной осевой плоскостях. Для распознавания элементов лопаточных машин газогенератора ГТД необходимо во вкладке режима работы с турбомашинами - *Turbo* деактивировать распознавание домена камеры сгорания (*ks*) (рис. 3.36) и нажать на кнопку *Initialize All Components*.



1 - Панель быстрого доступа; 2 - Вкладки переключающие режимы постпроцессинга: визуализация пространственной структуры потока, переменные, выражения, калькулятор численных значений параметров потока, режим работы с турбо-

машинами; 3 - Панель навигации в графическом окне; 4 - Графическое окно; 5 - Вкладки переключения между трехмерным видом модели, окном таблиц, окном графиков и просмотром отчета.

Рис. 3.35. Окно программы *CFD Post* после загрузки результатов расчетов единой модели газогенератора

При корректном выполнении инициализации в графическом окне появится меридиональное сечение компрессора и турбины, осредненное в окружном направлении (рис. 3.37).

После распознавания и инициализации элементов турбомашин необходимо произвести расчет компонентов скорости: осевой, окружной и радиальной. Для этого необходимо нажать ЛКМ на кнопку *Calculate Velocity Components* во вкладке *Turbo* (рис. 3.36).

В режиме работы с турбомашинами доступны различные способы визуализации параметров потока:

- отображение полей распределения параметров потока в окружной плоскости в различных сечениях по высоте проточной части (*Blade-to-Blade*);
- отображение полей распределения параметров потока в меридиональной плоскости (*Meridional*);
- отображение графиков распределения параметров потока по высоте проточной части (*Hub to Shroud*), по длине канала от входа к выходу (*Inlet to Outlet*), по перу лопатки (*Blade Loading*);

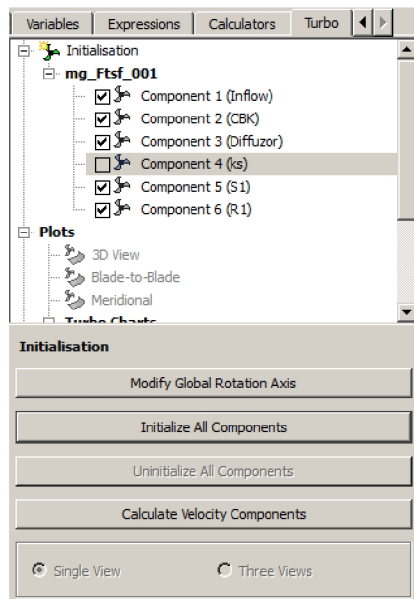


Рис. 3.36. Режим работы с турбомашинами (вкладка *Turbo*)

- окружное распределение на определенной высоте канала (*Circumferential*).

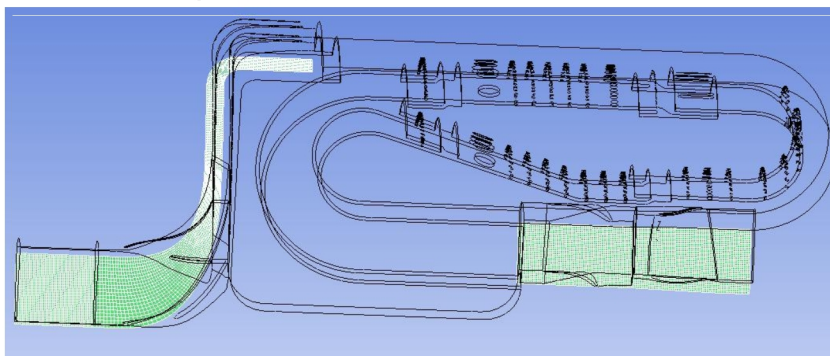


Рис. 3.37. Внешний вид загруженной модели газогенератора после инициализации *Turbo* режима

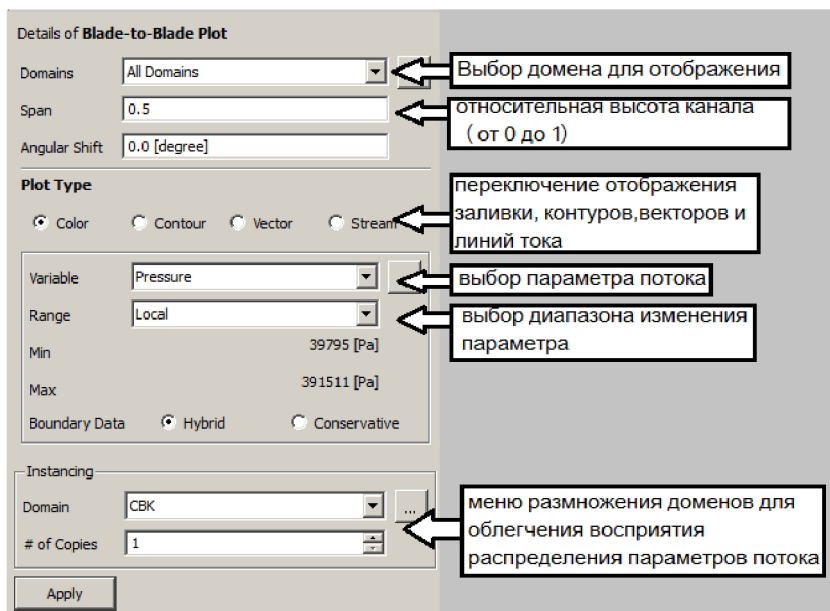


Рис. 3.38. Выбор настроек для визуализации параметров потока в окружной плоскости

Чтобы просмотреть распределение параметров потока в окружной плоскости необходимо с помощью двойного щелчка ЛКМ в дереве проекта по вкладке *Blade-to-Blade* открыть настройки вида (рис. 3.38). На рисунках 3.39... 3.41 приведены примеры настроек меню отображения параметров потока в окружной плоскости. Для того чтобы выбрать отображение полей распределения параметров в указанном сечении в области *Plot Type* следует выбрать *Color* (рис. 3.39), для отображения векторов – *Vector* (рис. 3.40), для отображения линий тока – *Stream* (рис. 3.41).

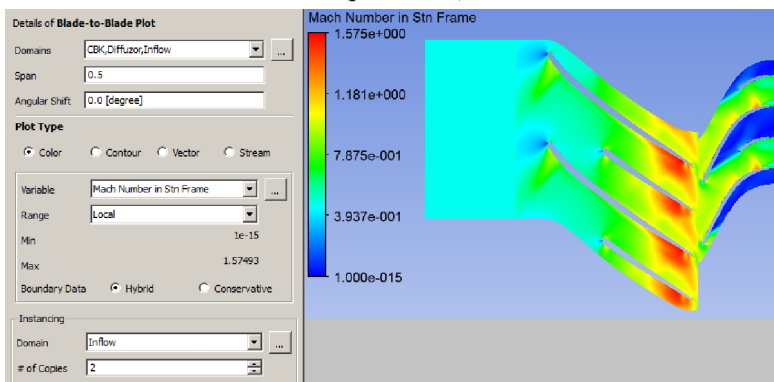


Рис. 3.39. Визуализация полей распределения параметров потока (числа Маха в абсолютной системе координат – *Max Number in Stn. Frame*) в окружной плоскости

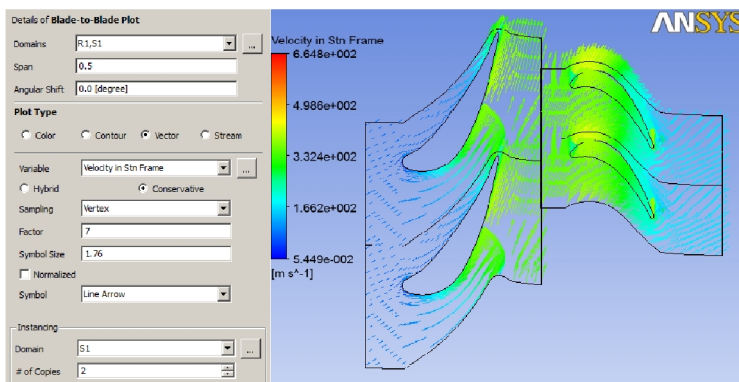


Рис. 3.40. Настройка визуализации векторов скорости потока в окружной плоскости

Для того, чтобы просмотреть осредненные в окружном направлении поля распределения параметров потока, вектора или линии тока в меридиональной плоскости следует дважды щелкнуть ЛКМ в дереве проекта по вкладке *Meridional*. В результате откроется меню, изображенное на рис. 3.42. На этом же рисунке указаны настройки, которые необходимо там сделать.

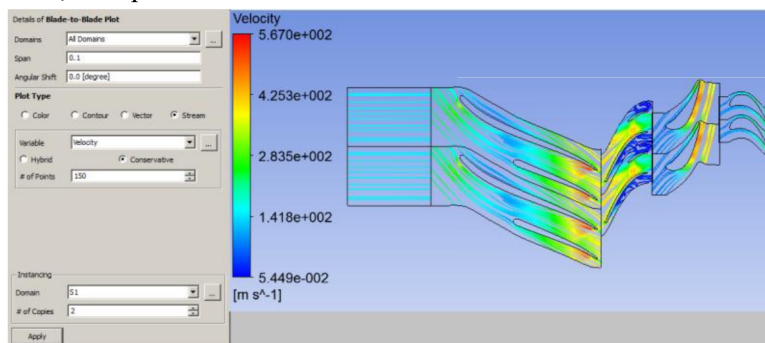


Рис. 3.41. Настройка визуализации линий тока потока в окружной плоскости

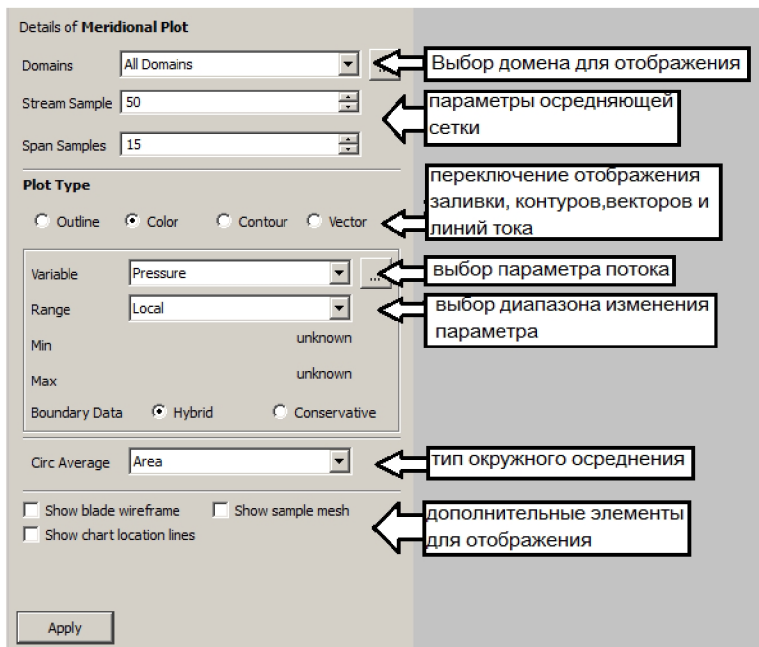


Рис. 3.42. Выбор настроек для визуализации параметров потока в меридиональной плоскости

Примеры изображения параметров потока в меридиональном сечении турбомшины приведены на рис. 3.43...3.45.

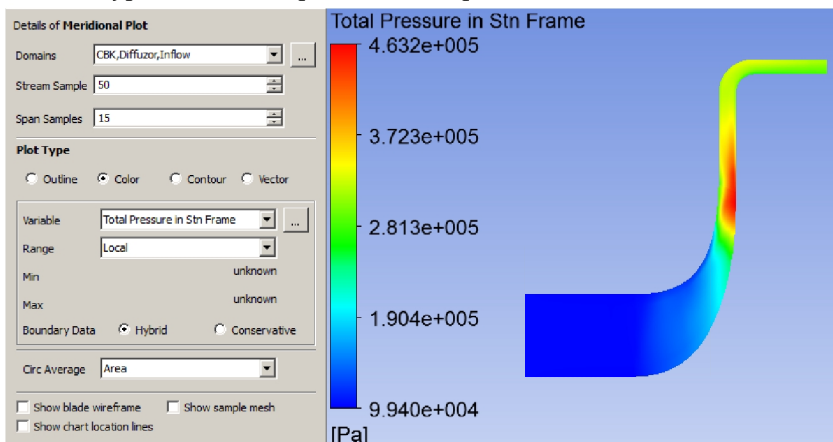


Рис. 3.43. Визуализация осредненных в окружном направлении полей распределения параметров потока в меридиональной плоскости

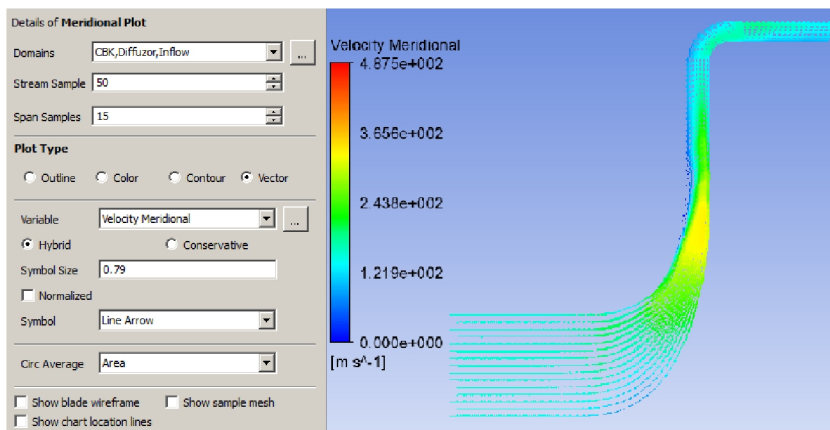


Рис. 3.44. Визуализация осредненных в окружном направлении векторов в меридиональной плоскости

Чтобы просмотреть осредненные в окружном направлении графики распределение параметров потока по высоте проточной части в турбомашинах необходимо двойным щелчком ЛКМ в дереве проекта по вкладке *Hub to Shroud* открыть меню, изображенное на рисунке 3.46. Настройки, которые необходимо сделать в указанном меню, приведены на том же рисунке. Пример полученного графика изменения осредненной в окружном направлении температуры на входе в турбину и сделанные для его получения настройки меню *Hub to Shroud* приведены на рис. 3.47.

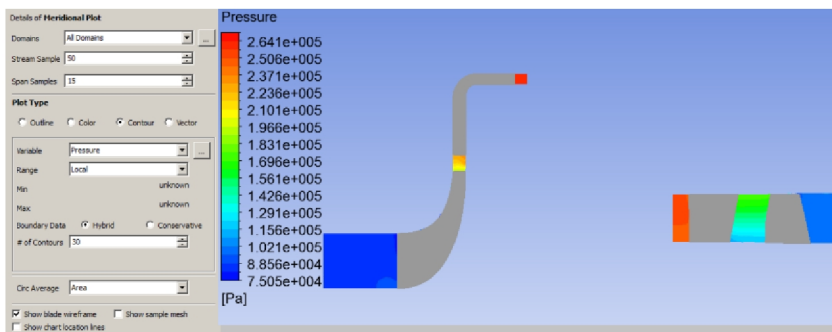


Рис. 3.45. Визуализация осредненных в окружном направлении линий тока в меридиональной плоскости

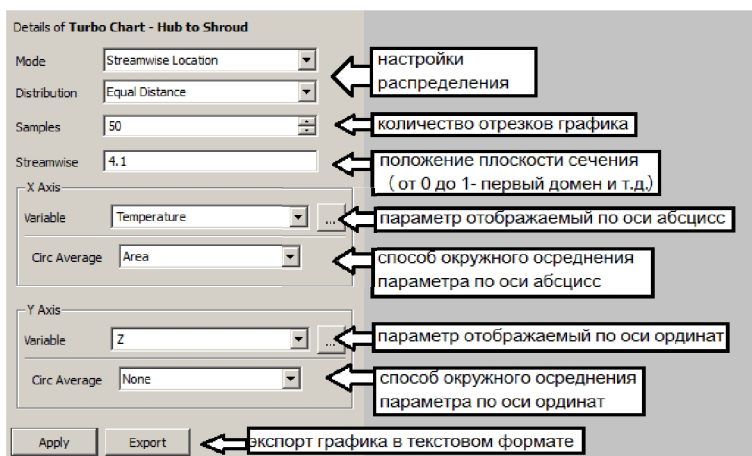


Рис. 3.46. Выбор настроек для построения графика распределения параметров потока по высоте проточной части

Используя описанные выше приемы можно просмотреть поля распределения параметров, векторы, линии тока и графики осредненных значений любых параметров потока в любом интересующем пользователя сечении.

Для визуализации параметров потока в камере сгорания необходимо перейти во вкладку визуализация пространственной структуры потока (*Outline*) в дереве объектов. Там в виде «дерева» находятся уже созданные границы (стенки, интерфейсы и входные и

выходные границы). Там же будут появляться и вновь создаваемые поверхности, сечения, плоскости и элементы визуализации потока.

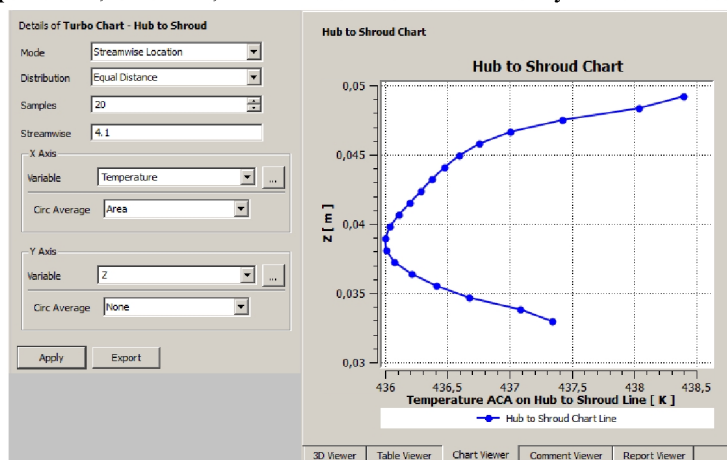


Рис. 3.47. Построение графика изменения осредненной в окружном направлении температуры потока по высоте проточной части на входе в турбину

В верхнем меню *CFD Post* находятся ряд кнопок , которые позволяют получить быстрый доступ к командам построения полей распределения параметров потока, векторов, линий тока и визуализации течения отдельных частиц (в порядке следования).

Меню всех перечисленных команд построены по одинаковым принципам и необходимые настройки в них мало отличаются друг от друга. При выполнении любой из команд визуализации необходимо указать домены (области) для которых проводится построение картины, указать поверхность, на которой будет отображаться желаемое, выбрать рассчитанный параметр потока для отображения (давление, температура, скорость и т.д.) и диапазон параметра (по всей расчетной модели, либо только на выбранных поверхностях).

Поля распределения параметров потока и векторов строятся на базе секущих поверхностей (или других элементов) пересекающих область, интересующую пользователя. По умолчанию в дереве находятся только граничные поверхности. Для того, чтобы посмотреть распределение на другой поверхности, например, в меридиональном сечении, ее необходимо вначале построить. Это делается с помощью ко-

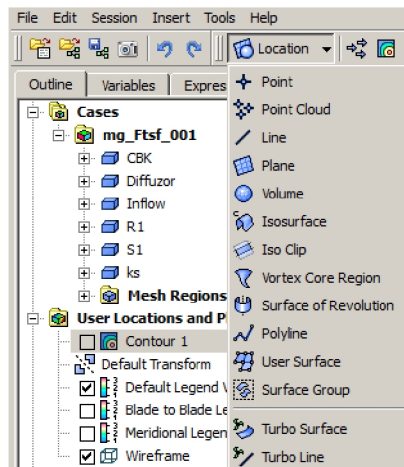


Рис. 3.48. Меню создания пользовательских поверхностей, линий и объемов

манд находящихся во вкладке *Location* (рис.3.48). Для построения секущей плоскости там, следует выбрать пункт *Plane*. На рис. 3.49, например, показаны настройки позволяющие построить меридиональное сечение камеры сгорания, проходящее через ось форсунки. На рисунках 3.50...3.53 показаны примеры визуализации параметров потока в построенном сечении камеры сгорания.

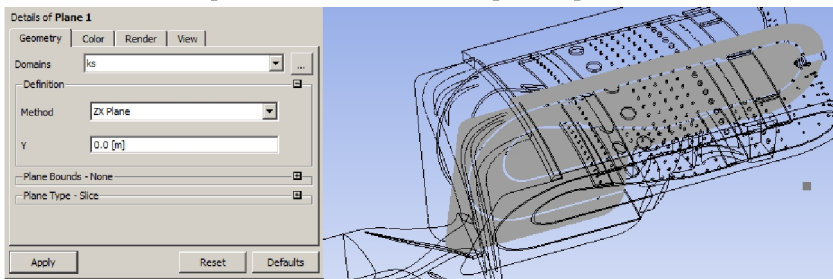


Рис. 3.49. Настройки для создания пользовательской поверхности, проходящей через ось форсунки

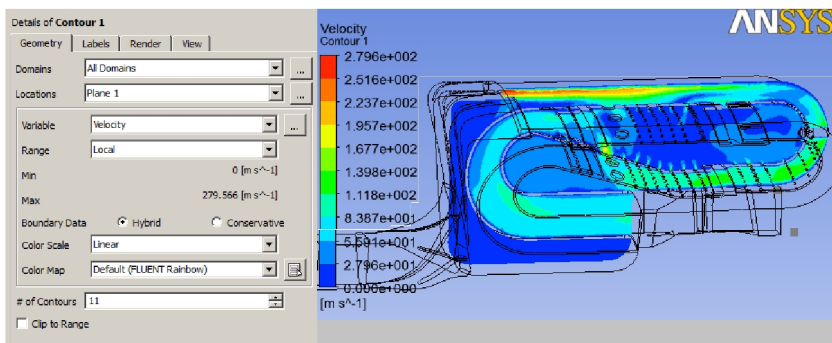


Рис. 3.50. Построение поля распределения скоростей в меридиональном сечении камеры сгорания, проходящем через ось вращения

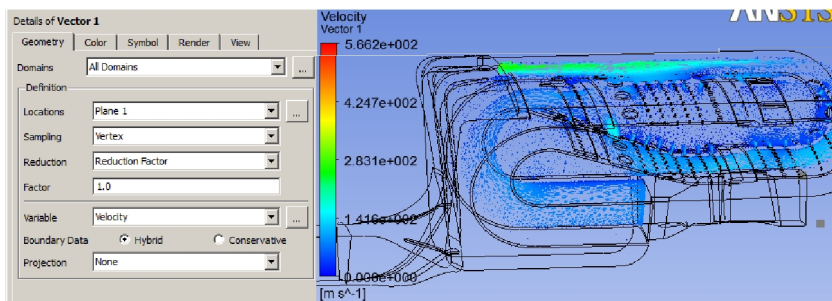


Рис. 3.51. Построение векторов потока в меридиональном сечении камеры сгорания, проходящем через ось вращения

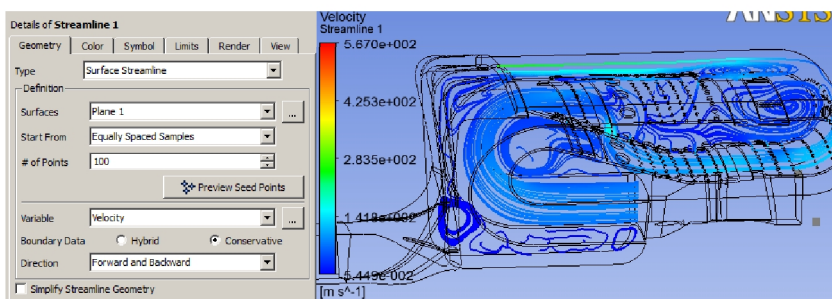


Рис. 3.52. Построение линий тока в меридиональном сечении камеры сгорания, проходящем через ось вращения

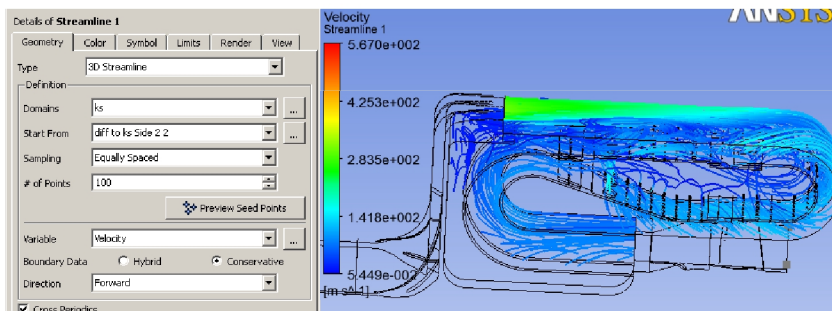


Рис. 3.53. Построение линий тока внутри камеры сгорания

В *CFD Post* имеется специальный калькулятор (*Calculators*), который позволяет вычислить осредненные значения параметров потока, вычисленные в интересных пользователю сечениях. Для получения интегральных параметров модели газогенератора ГТД необходимо знать средние значения параметров потока в характерных сечениях. Список доступных функций для расчета параметров на границах расчетной модели представлен в таблице 3.18.

Таблица 3.18

Доступные функции калькулятора *CFD Post*

<i>area</i>	площадь	<i>mass Flow</i>	массовый расход
<i>area Ave</i>	средний по площади	<i>mass Flow Ave</i>	осредненный по массовому расходу
<i>ave</i>	осредненный	<i>max Val</i>	максимальное значение
<i>count</i>	число узлов	<i>min Val</i>	минимальное значение
<i>force</i>	сила	<i>torque</i>	момент
<i>length</i>	длина	<i>volume</i>	объем
<i>length Ave</i>	средний по длине	<i>volume Ave</i>	осредненный по объему

Чтобы определить интегральное значение параметра потока в интересующем сечении необходимо перейти во вкладку *Calculators* и выбрать там пункт *Function Calculator*. В результате появится

меню, изображенное на рис. 3.54. В нем необходимо выбрать способ осреднения величины, выбрать ту границу, на которой будет вычисляться параметр потока, и выбрать вычисляемую переменную. В табл. 3.19 приводятся настройки меню *Function Calculator* необходимые для вычисления среднемассовой полной температуры газа перед сопловым аппаратом турбины. Выполнение расчета запускается нажатием кнопки *Calculate*, после чего в окне *Results* появляется рассчитанное значение.

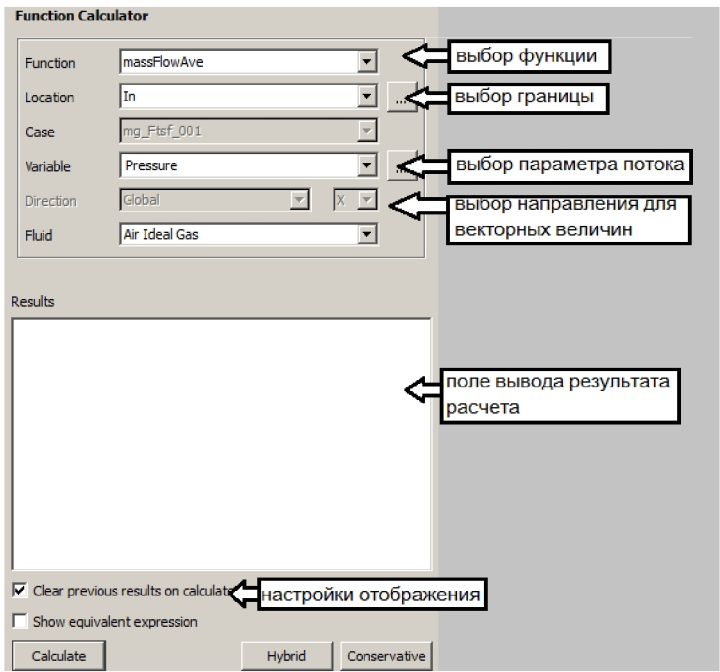


Рис. 3.54. Меню *Function Calculator*

Таблица 3.19

Настройки меню *Function Calculator*, необходимые для вычисления среднемассовой полной температуры газа перед сопловым аппаратом турбины

<i>Function</i>	<i>mass Flow Ave</i>
<i>Location</i>	Выбирается граница входа в сопловой аппарат
<i>Variable</i>	<i>Total Temperature</i>

4. ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

В табл. 4.1 приведены граничные условия для индивидуальной самостоятельной работы студентов.

Таблица 4.1

Индивидуальные задания

Вариант задания	Горение*	Частота вращения ротора, об/мин	Расход топлива, г/с	Температура торможения на входе, °C
1	+	72000	0.625	40
2	-	72000	0	40
3	+	66000	0.575	20
4	-	66000	0	20
5	+	60000	0.528	0
6	-	60000	0	0
7	+	55000	0.484	-15
8	-	55000	0	-15
9	+	50000	0.444	-30
10	-	50000	0	-30

*Примечание: расчет без горения необходимо проводить на воздухе (*Air Ideal Gas*), расчет с горением необходимо проводить на многокомпонентной смеси (*JetA Air WD1*).

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Перечислите основные этапы моделирования рабочих процессов в современных *CFD* программных комплексах.
2. Назовите существующие варианты исследования рабочих процессов в газогенераторе ГТД.
3. Какие основные проблемы имеют место при комплексном расчете газогенератора в *CFD* программных комплексах.
4. Опишите основные этапы запуска ГТД на земле.
5. Какие исходные данные необходимы для сквозного моделирования рабочего процесса газогенератора *CFD* программных комплексах?
6. Назовите основные отличия расчета ГТД на крейсерском режиме и режиме запуска.
7. Каковы основные требования к сеточной модели камеры сгорания?
8. Каковы основные этапы создания сеточной модели турбины? Какие требования к ней предъявляются?
9. Каковы основные этапы создания сеточной модели компрессора? Какие требования к ней предъявляются?
10. Какие интегральные характеристики используют для оценки сходимости решения?
11. Для чего создается большое количество расчётных зон газогенератора? Перечислите их.
12. В каких системах координат рассчитываются расчетные зоны, составляющие единую модель газогенератора?

13. Опишите процесс настройки периодичности.
14. Для чего используется режим *Turbo* при обработке результатов расчета турбомашин?
15. Какое граничное условие устанавливается на выходе из топливной форсунки?
16. Назовите допустимую погрешность крутящих моментов при расчете газогенератора?
17. Каким образом в расчете газогенератора обеспечивается баланс расходов?
18. Каким образом в расчете газогенератора на основных эксплуатационных режимах обеспечивается баланс мощностей?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В пособии приведены основные подходы к совместному расчету газогенератора ГТД, состоящего из компрессора, камеры сгорания и турбины в едином универсальном программном комплексе для расчета газодинамических процессов на примере *Ansys CFX*. Разобраны основные проблемы вычисления и указаны пути их решения. Приведены алгоритмы расчета, а так же показаны необходимые данные для моделирования рабочего процесса в газогенераторе в едином универсальном программном комплексе. Рассмотрены основные особенности расчетов на различных режимах работы газогенератора.

Пособие предназначено для магистрантов, аспирантов и дипломников авиационных ВУЗов и сотрудников предприятий аэрокосмического профиля, занимающихся проектированием, исследованием рабочих процессов и доводкой ГТД и ГТУ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кулагин, В.В. Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок / В.В. Кулагин // Основы теории ГТД: учебник. Кн.1: Рабочий процесс и термогазодинамический анализ. Кн.2: Совместная работа узлов выполненного двигателя и его характеристики. – М.: Машиностроение, 2002. – 616 с(имеется 15 экземпляров в библиотеке).
2. Белоусов, А.Н. Теория и расчет авиационных лопаточных машин [Текст]/А.Н. Белоусов, Н.Ф. Мусаткин, В.М. Радько. - Самара: ФГУП “Издательство Самарский Дом печати”, 2003. – 336с.
3. Холщевников, К.В. Теория и расчет авиационных лопаточных машин [Текст]/ К.В. Холщевников, О.Н. Емин, В.Т. Митрохин.– М.: Машиностроение, 1986. – 432с.
4. Андерсон, Д. Вычислительная гидромеханика и теплообмен [Текст]. В 2-х томах/ Д. Андерсон, Дж. Таннехил, Р. Плетчер. – М.: Мир,1990.- 384с.
5. Патанкар, С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости [Текст]/ С. Патанкар. – М.:Энергоатомиздат, 1984. – 150с.
6. Рейнольдс А. Дж. Турбулентные течения в инженерных приложениях: Пер. с англ. – М.: Энергия, 1979. – 408 с.
7. Турбулентность. Принципы и применение. Под ред. У. Фроста и Т. Моудлена. – М.:Мир, 1980. – 220с.
8. Флетчер, К. Вычислительные методы в динамике жидкостей [Текст]. В 2-х томах/К. Флетчер. – М.: Мир, 1991. – 1056с.
9. Расчет пространственной структуры потока в ступени осевого компрессора в программном комплексе *Ansys CFX*: учеб. пособие/ [О.В. Батурин и др.]. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. – 101 с.: ил.
10. Исследование рабочего процесса в ступени осевой турбины с помощью универсального программного комплекса *Ansys CFX*: метод. указания / сост. О.В. Батурин, Д.А. Колмакова, В.Н. Матвеев, Г.М. Попов, Л.С. Шаблій – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. - 100 с.: ил.

11. Расчет характеристик струйных течений газовых сред в камерах сгорания ГТД [Текст]: учеб. пособие/ С.Г. Матвеев, М.Ю. Орлов, С.С. Матвеев и др. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. Ун-та, 2011. – 110 с
12. Особенности формирования полей температуры газа на выходе из камер сгорания малоразмерных газотурбинных двигателей[Текст] /А. М. Ланский, С. В. Лукачёв, С. Г. Матвеев // Вестник СГАУ. – 2010. – Вып. 1. С. – 155–160.
13. Определение размеров зоны обратных токов трехмерной модели камеры сгорания ГТД с помощью пакета ANSYS FLUENT [Текст] / В. В. Бирюк, м. Ю. Орлов, И. А. Зубрилин, Ю. А. Синеговский, А. В. Кривцов // Вестник СГАУ. – 2011. – Вып. 5. С. – 44-49.
14. Моделирование аэродинамической структуры течения в камересгорания малоразмерного ГТД с помощью САЕ-систем[Текст] / С. Г. Матвеев, М. Ю. Орлов, В. Ю. Абрашкин, И. А. Зубрилин, С. С. Матвеев// Вестник СГАУ. – 2011. – Вып. 5. С. – 168-178.
15. Моделирование процессов горения пропана при переводе камеры сгорания ГТД на газообразное топливоС. Г. Матвеев, А. М. Ланский, М. Ю. Орлов, В. Ю. Абрашкин, Д. Н. Дмитриев, И. А. Зубрилин, А. В. Семенов// Вестник СГАУ. – 2011. – Вып. 5. С. – 179-188.
16. Анализ применимости моделей горения для расчета многофорсуночной камеры сгорания ГТДБ. Г. Мингазов, В. Б. Явкин, А. Н. Сабирзянов, А. В. Бакланов // Вестник СГАУ. – 2011. – Вып. 5. С. – 208-214.

Учебное издание

*Орлов Михаил Юрьевич
Батурин Олег Витальевич
Кривцов Александр Васильевич
Матвеев Сергей Сергеевич
Зинковский Виктор Сергеевич
Колмакова Дарья Алексеевна*

САЕ-МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ГАЗОГЕНЕРАТОРА ГТД В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ANSYS CFX

Научный редактор
Редакторская обработка
Корректорская обработка
Компьютерная верстка О.В. Батурин, Л.С. Шаблий

Самарский государственный
аэрокосмический университет.
443086, Самара, Московское шоссе, 34

Изд-во Самарского государственного
аэрокосмического университета.
443086, Самара, Московское шоссе, 34