

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)»

**РАСЧЕТ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ГТД
С ПОМОЩЬЮ ЕДИНОЙ ВИРТУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ
ЕГО РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА**

*Рекомендовано к изданию Редакционно-издательской комиссией
по двигателям летательных аппаратов и энергомашиностроению
в качестве методических указаний*

САМАРА
2013

УДК СГАУ: 621.43.056

ББК: 39.55

P248

Составители: **Батурин Олег Витальевич**
Кривцов Александр Васильевич
Матвеев Сергей Геннадьевич
Матвеев Сергей Сергеевич
Орлов Михаил Юрьевич
Шаблий Леонид Сергеевич

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.В. Фалалеев

Расчёт рабочего процесса ГТД с помощью единой виртуальной модели его рабочего процесса: метод. указания / [О.В. Батурин и др.]. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2013. – 59 с.: 59 ил.

В методических указаниях рассмотрено выполнение лабораторной работы по расчётному исследованию рабочего процесса в газогенераторе газотурбинного двигателя, работающего на газообразном топливе.

Методические указания предназначены для студентов, бакалавров и магистрантов изучающие курсы «САЕ системы в механике жидкости и газа», «Теория, расчет и проектирование АД и ЭУ», специальность 160301 - Авиационные двигатели и энергетические установки.

УДК СГАУ: 621.43.056

ББК: 39.55

© Самарский государственный аэрокосмический университет, 2013

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	4
1 Расчётное исследование рабочего процесса в газогенераторе.....	6
2 Технология расчета рабочего процесса ГТД с помощью единой виртуальной модели	9
3 Построение геометрических и конечно-элементных моделей узлов газогенератора	11
4 Задание начальных и граничных условий.....	24
5 Настройка решателя	35
6 Расчет и условия сходимости	46
7 Визуализация результатов расчета	49
Контрольные вопросы.....	57
Заключение.....	58

ВВЕДЕНИЕ

В современной технике важную роль играют малоразмерные газотурбинные двигатели (МГТД). Которые используются в беспилотных летательных аппаратах, наземном транспорте и энергетических машинах. Совершенствование этих двигателей представляет собой достаточно сложную задачу, связанную с относительно малой изученностью их рабочего процесса. Соответственно решение проблем, связанных с их проектированием и внедрением в серийное производство является чрезвычайно актуальной задачей, которая требует скорейшего решения. Конструктивно МГТД состоят из тех же элементов, что и все газотурбинные двигатели, основными из которых являются: входное устройство, компрессор, камера сгорания, турбина и сопло. Поскольку в принятой практике разработкой каждого такого элемента занималось отдельное подразделение двигателестроительного предприятия, то 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 для отдельных узлов. 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 МГТД. Развитие CFD технологий за последние годы позволило производить гораздо больший объём расчетов и моделировать рабочие процессы в более короткие сроки, чем при использовании традиционных методик. Так, использование данного расчётного инструмента позволило в короткое время значительно улучшить характеристики турбомашин и в частности компрессоров и турбин МГТД. Для камер сгорания в области их расчёта в последнее время также удалось достичь значительных успехов, как при моделировании процессов в локальных областях, при рассмотрении изменения различных режимных и конструктивных факторов и т.д. Все это вывело на передний план проблему расчёта процессов в проточной части всего двигателя в целом, что позволило бы более полно учитывать взаимное влияние соседних узлов на общие характеристики двигателя, получать более достоверную картину распределения параметров по этому тракту, установить закономерности совместной работы узлов и т.д.

В данном методическом пособии изложена технология создания единой виртуальной модели рабочего процесса газогенератора ГТД и расчёта его характеристик с её помощью.

Цель лабораторной работы: освоение расчёта рабочего процесса ГТД с помощью единой виртуальной модели.

Задачи лабораторной работы:

- изучение технологии создания единой виртуальной модели рабочего процесса ГТД;
- приобретение навыков расчёта рабочего процесса ГТД для его единой виртуальной модели.

1 Расчётное исследование рабочего процесса в газогенераторе

Расчёт рабочего процесса ГТД может быть осуществлен двумя путями:

- расчёт узлов газогенератора по отдельности, каждого с использованием программы, наиболее подходящей для моделирования данного 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 определённых упрощений.

Алгоритм расчета единого рабочего процесса газогенератора с применением специализированных программ показан на рисунке 1. В этом случае можно наиболее точно учесть процессы, происходящие в каждом отдельном узле (в компрессоре, камере сгорания и т. д.), но при этом возникают проблемы с передачей данных на границах узлов, а в итоге и с определением характеристик всего двигателя. Так, например, оптимизированная для расчёта турбины программа может быть не предназначена для качественного расчёта процессов горения, следовательно осуществить расчёт концентраций продуктов сгорания за турбиной и далее за соплом при использовании этой программы будет невозможно.

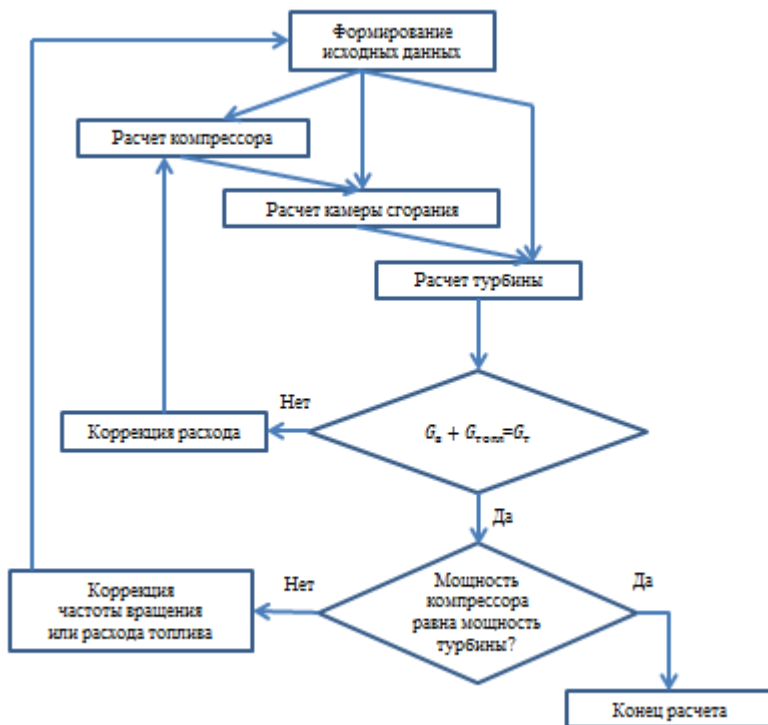


Рис. 1. Алгоритм расчета единого рабочего процесса газогенератора с применением специализированных программ

При использовании универсального программного комплекса значительно упрощается создание виртуальной модели и обмен данными между моделями узлов, появляется возможность учитывать изменение свойств рабочего тела по тракту. Однако при этом настройки модели и решателя будут «универсальными» и заведомо неоптимальными для конкретного узла. Кроме того, могут возникнуть и другие проблемы. Так, например, при моделировании процесса в единой программе расчет параметров состояния каждого вещества происходит во всех узлах, даже в тех, где это вещество может и не появиться. Это приведёт к увеличению времени расчета и потребных ресурсов компьютера.

Алгоритм расчета единого рабочего процесса газогенератора в одной универсальной программе показан на рис. 2.

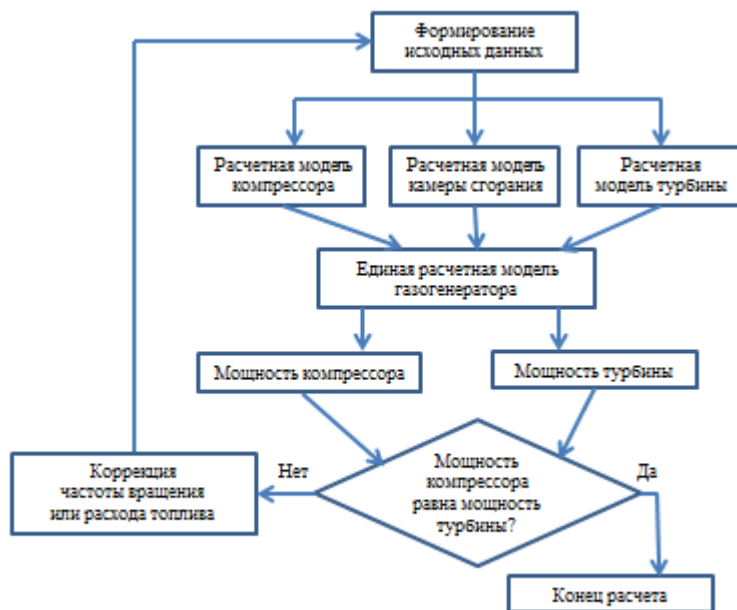


Рис. 2. Алгоритм расчета единого рабочего процесса газогенератора в одной универсальной программе

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

Для моделирования рабочего процесса в данной лабораторной работе был выбран второй путь, поскольку его проще осуществить на практике.

2 Технология расчета рабочего процесса ГТД с помощью единой виртуальной модели

Технология моделирования рабочего процесса для всего газогенератора в едином универсальном программном комплексе базируется на технологии моделирования газодинамических процессов в современных *CFD*-пакетах и может состоять из следующих основных этапов:

- термогазодинамический расчет газогенератора;
- задание цели моделирования и постановка задачи расчёта конкретных параметров рабочего процесса,
- выполнение одномерного расчёта отдельных узлов и формирование их предварительного облика;
- создание геометрических моделей расчетной области каждого узла, входящего в газогенератор;
- определение допущений, выбор границ расчетной области в целом и границ между узлами;
- разбиение (дискретизация) геометрии расчетной области каждого элемента сеткой конечных элементов;
- задание граничных условий и описание связей между границами узлов;
- непосредственно расчёт;
- обработка и анализ полученных результатов.

В общем виде схема моделирования рабочего процесса для всего газогенератора в едином универсальном программном комплексе представлена на рис. 3.

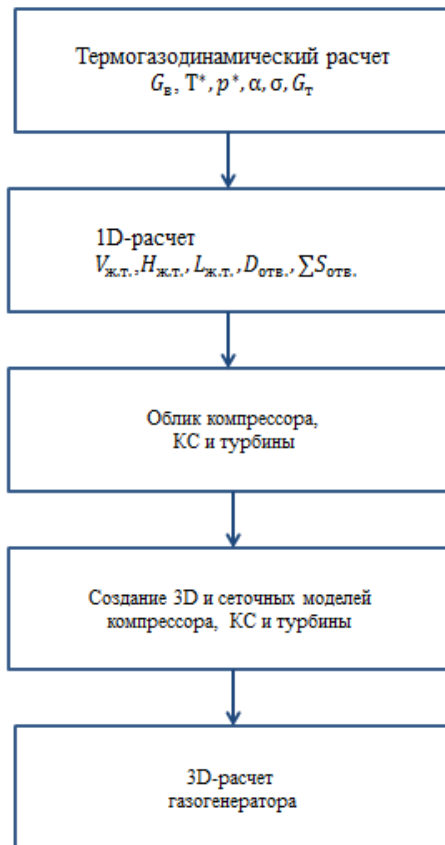


Рис. 3. Схема моделирования рабочего процесса ГТД в едином универсальном пакете

Первым этапом моделирования рабочего процесса ГТД является проведение термогазодинамического расчета. В ходе этого расчета получают основные параметры для газогенератора, такие как расходы воздуха и топлива, распределение полного давления и температуры по тракту и т.д. На основе термогазодинамического расчета выполняется одномерный проектировочный расчёт каждого узла, в ходе которого определяются с конструктивной схемой, основными габаритами, выбирают закон распределения воздушных потоков и т.д. В конечном итоге в конце этого этапа получают облик основных узлов газогенератора.

3 Построение геометрических и конечно-элементных моделей узлов газогенератора

После определения облика основных узлов газогенератора, переходят к построению их геометрических моделей. В нашем случае первоначально были выполнены расчёты основных размеров компрессора и турбины, а затем был выполнен проектировочный расчёт камеры сгорания. Одной из основных задач этого расчёта была необходимость вписать в заданные габариты (между компрессором и турбиной) противоточную камеру сгорания с заданными параметрами, такими как расход воздуха, топлива и т.д., взятыми из термогазодинамического расчёта. Подобная задача часто решается и на практике, где продольные размеры КС могут быть ограничены по разным соображениям, например из условия обеспечения жесткости вала компрессора и турбины. На рис. 4 представлена схема геометрии спроектированной проточной части газогенератора малоразмерного ГТД.

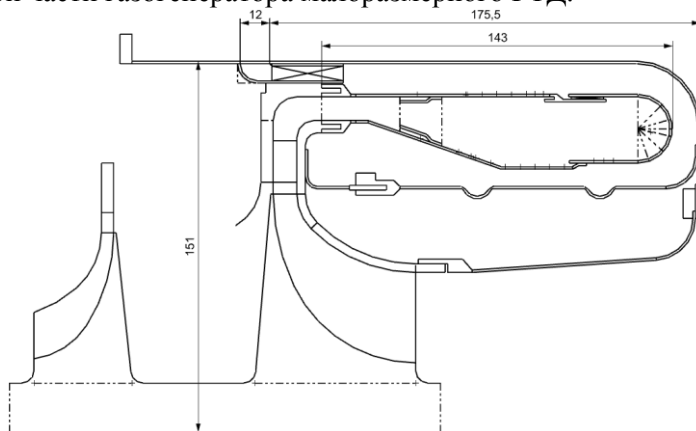


Рис. 4. Компоновочная схема МГТД

Прежде чем создать единую расчетную модель для исследования рабочего процесса в газогенераторе в едином универсальном *CFD* программном комплексе необходимо создать геометрические модели проточной части каждого узла входящего в состав газогенератора и разбить их качественной сеткой конечных элементов. При создании расчетных моделей узлов особое внимание следует уделить тому, что сопряженные границы расчетных областей описывающих смежные узлы должны иметь одинаковую геометрию.

Построение геометрических и сеточных расчётных моделей турбомашин производится следующим образом.

Для их создания необходимо полностью описать геометрию проточной части. При этом нужно знать геометрию рабочих и сопловых лопаток, а также геометрию втулочного и меридионального обводов меридионального сечения проточной части. Причем, поскольку создаваемая модель будет использована для построения единой расчетной модели рабочего процесса в газогенераторе, то имеет значение ее пространственное расположение относительно других элементов. Также важно помнить, что вход в расчетную область турбины должен быть полностью идентичным выходу из области камеры сгорания. Аналогично геометрия выходной границы области турбины должна совпадать с геометрией входной области сопла (если имеется).

Поскольку течение в турбомашине является периодическим, то нет необходимости моделировать его целиком. Для упрощения расчета и сокращения времени его выполнения, обычно рассматривают только один межлопаточный канал, налагая на соответствующие границы расчетной зоны периодическое граничное условие.

Процесс создания сеточных моделей проточной части осевой турбины состоит из четырех основных этапов:

- описание геометрии лопаточной машины;
- формирование топологии сетки;
- построение конечноэлементной сетки;
- анализ качества полученной сетки.

Создание расчетных сеточных модели проточных турбомашин для дальнейшего использования в программе *Ansys CFX* целесообразно проводить в программе *Turbo Grid*. Она позволяет легко и быстро в автоматизированном режиме создавать качественные расчетные модели для исследования течения в турбомашине с помощью *CFD*-программ. *Turbo Grid* имеет средства, позволяющие строить геометрию расчетной области, накладывая на созданную расчетную область конечно-элементную сетку высокого качества в автоматическом и полуавтоматическом режимах с минимальным количеством настроек.

Для автоматического построения геометрии расчетной области для исследования течения в межлопаточном канале турбомашин, в программе *Turbo Grid* необходимо описать форму пера лопатки (*blade*) и втулочный (*nub*) и меридиональный (*shroud*) обводы проточной части (рис. 5).

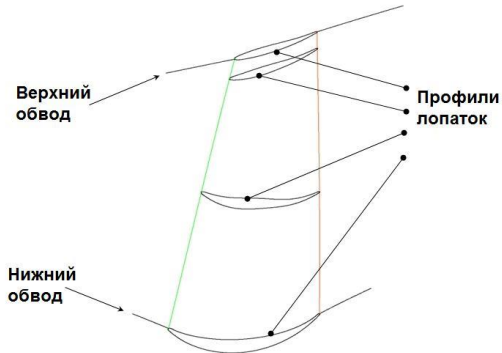


Рис. 5. Основные элементы, необходимые построения геометрии расчетной области венца турбомшины

Описав все геометрические параметры лопатки, программа Turbo Grid выполнит построение проточной части лопатки (рис. 6).

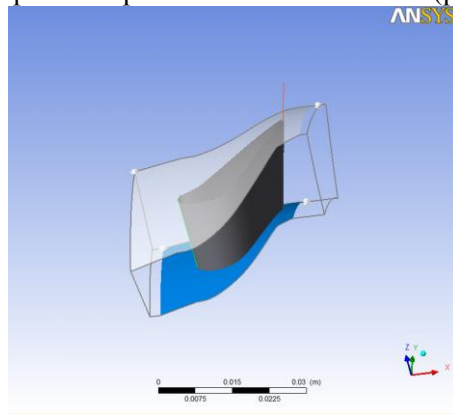


Рис. 6. Геометрия лопатки в Turbo Grid

Построение геометрической модели камеры сгорания также как и для турбомашин выполняется на основании её предварительного облика.

Для создания геометрии камеры сгорания широко используется метод вращения эскизов её различных элементов на 360° вокруг своей оси или оси двигателя. Чтобы в итоге получилось твердое тело, а не набор поверхностей, контуры в эскизе должны быть замкнутыми и не должны пересекаться.

С помощью операции «Вращение» могут быть выполнены стенки жаровой трубы, корпуса камеры сгорания (Рис. 7) и некоторые другие необходимые конструктивные элементы, например форсунка.

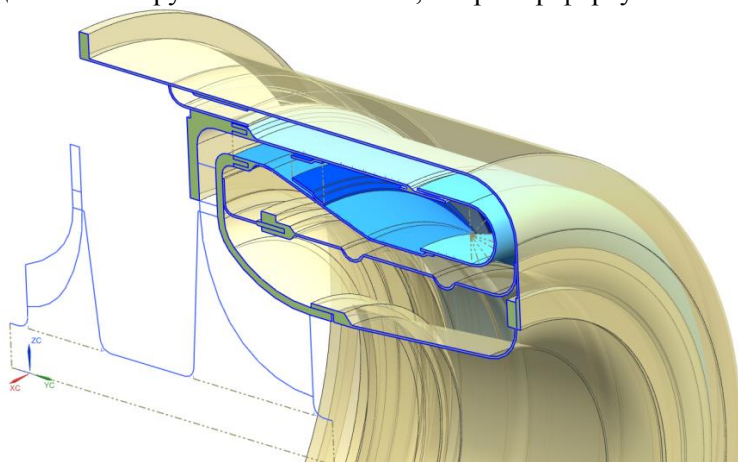


Рис. 7. Создание жаровой трубы и корпуса КС

При создании геометрической модели КС также часто используются операции «Вытягивание» и выполнение массива элементов путём копирования с определенным шагом. Так, например построение массива элементов широко используется при выполнении отверстий подвода воздуха в стенке жаровой трубы (рис. 8) и для создания лопаток спрямления потока (рис. 9).

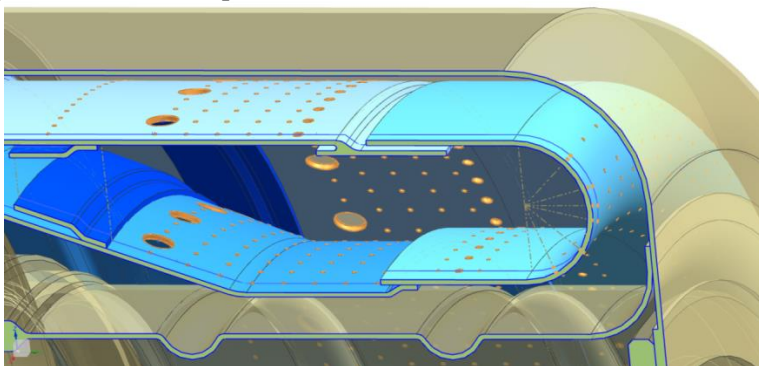


Рис. 8. Создание массива отверстий воздуха на стенке жаровой трубы

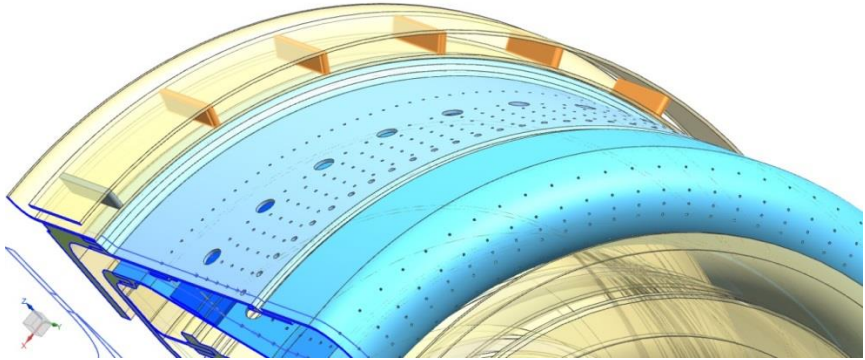


Рис. 9. Создание массива спрямляющих лопаток

Важным этапом численного моделирования, определяющим достоверность получаемых результатов расчёта, а иногда и принципиальную возможность их реализации, является создание конечно-элементной модели. Между тем возможности современных компьютеров накладывают ряд ограничений на этот процесс. Камера сгорания ГТД представляет собой сложный геометрический объект, в котором наличие завихрителей форсунок, отверстий системы охлаждения жаровой трубы, воздушных карманов, фигурных переходов между плоскостями и прочих элементов со сложной геометрией делает практически невозможным создание высококачественной конечно-элементной сетки необходимой плотности, позволяющей проводить расчеты на персональных компьютерах без ее оптимизации.

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

Для создания сеточной модели геометрическую модель КС вначале упрощают, внося изменения, не влияющие на результат расчёта интересующих параметров, а затем переходят к выделению расчетной области. Такой подход позволяет в значительной мере сократить потребные машинные ресурсы. Расчетная область представляет собой часть КС периодическое повторение которой позволяет с определен-

ными допущениями воспроизвести всю камеру сгорания. В зависимости от цели расчёта конфигурация расчётной области КС может быть различной. Так, при прочностных расчётах – это элементы конструкции, при расчёте рабочего процесса, как в нашем случае, - это область течения рабочего тела, а при исследовании, например, процессов передачи тепла – сопряженная модель, включающая как конструктивные элементы, так и область течения рабочего тела. Создание сеточной модели производится на расчётной области.

Для этого расчётную область импортируем в сеточный генератор Ansys Mesher и выбираем предварительные настройки генерирования сетки (рис. 10). Определяем граничные зоны и задаем им имена. Положение граничных зон необходимо определить на этапе генерирования сетки, хотя их тип может быть изменен впоследствии, при задании граничных условий.

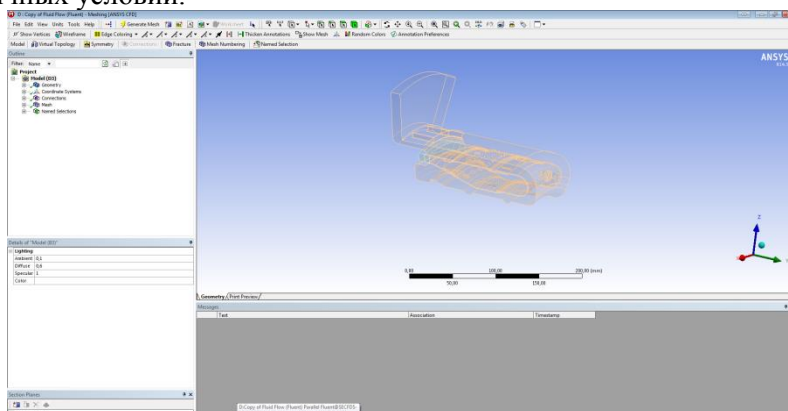


Рис. 10. Панель выбора физического решателя и единиц измерения

Под граничными зонами понимаются поверхности входа и выхода рабочего тела из расчетной области, а также непроницаемые стенки. В зависимости от целей расчета используются различные типы граничных зон.

На рис. 11 представлено расположение границы входа потока в расчетную область.

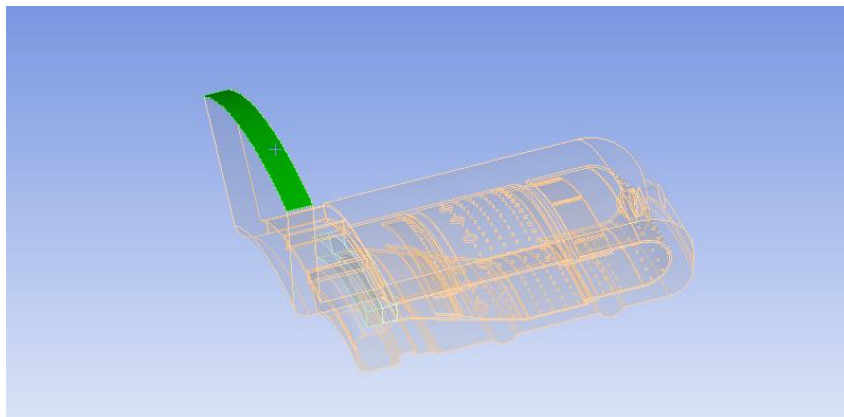


Рис. 11. Граница входа потока в расчетную модель

На рисунке 12 показана выходная граница.

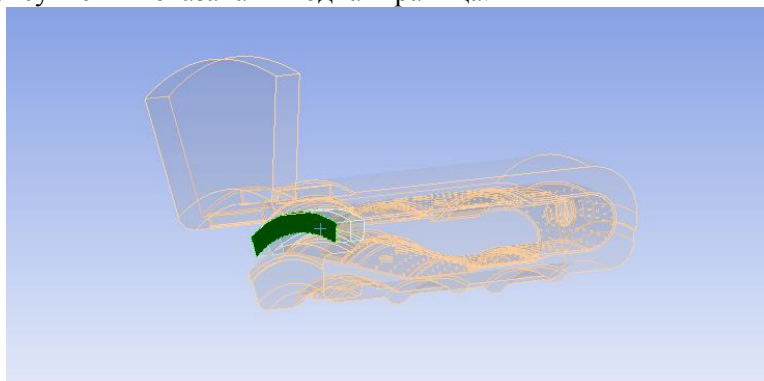


Рис. 12. Граничная зона выхода рабочего тела из расчетной области

Боковые поверхности называем «Periodic1» и «Periodic2» для последующего задания периодической границы, рис. 13. Остальные поверхности по умолчанию примут атрибут «Wall» – то есть непроницаемая стенка.

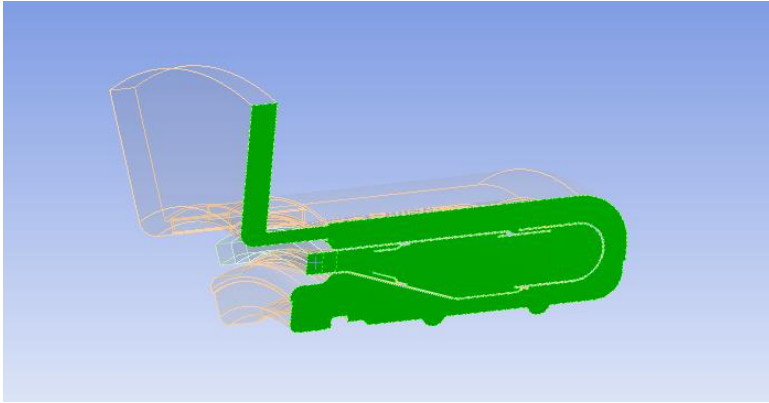


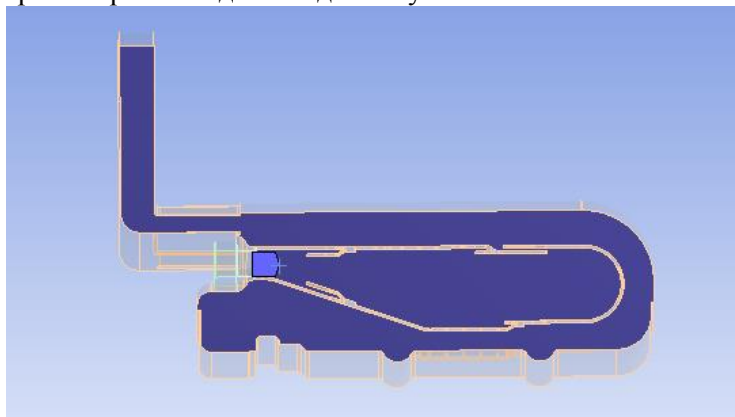
Рис. 13 – Боковая периодическая граница

Затем выполняется генерация грубой сетки в первом приближении для выявления проблемных мест в элементах геометрии, которые необходимо скорректировать для достижения лучшего качества сетки. Если проблемные зоны не получается убрать средствами пакета Ansys Mesher, то необходимо перейти в CAD-пакет, в котором создавалась геометрия и скорректировать модель там.

После доработки геометрии и достижения удовлетворительного результата, можно приступать к изменению глобальных настроек объемной сетки под конкретную задачу. Включаем расширенные размерные функции «Proximity and Curvature». Выбираем для параметра «Relevance Center» значение «Medium», что устанавливает значения параметров по умолчанию для генерации сетки среднего качества. Для опции «Transition» применяем значение «Fast». Опции «Curvature Normal Angle» присваиваем значения 30° , что гарантирует минимум 12 ребер конечных элементов при описании окружностей и отверстий. При этом значении геометрия отверстий будет искажаться сеткой незначительно. Необходимо также соблюсти корректное значение «Min Size» для описания отверстий наименьших диаметров в модели. Для этого необходимо выбрать отверстие с наименьшим диаметром, разбить длину его окружности на двенадцать частей, получившийся размер примерно соответствует длине грани необходимого конечного элемента.

Так как для расчета выбран сектор, а не вся камера сгорания, то для получения качественных результатов нужно задать определенное

условие, которое будет учитывать влияние соседних (виртуальных) секторов. Данное условие определяется как периодическая граница на боковых поверхностях модели, которые в «NamedSelection» обозначены как «Periodic1» и «Periodic2». Периодическая граница в физическом смысле означает, что в аналогичных точках на выбранных поверхностях у потока имеют место одни и те же параметры (давление, скорость, температура). Чтобы задать эти граничные условия необходимо выполнить до генерации сетки на модели операцию «Match Control», в которой выделяется каждая боковая поверхность, совпадающая по геометрии с симметричной ей. На рисунке 14 в качестве примера показаны две плоскости, связанные в операции «MatchControl» (красным выделена основная поверхность, синим – зависимая). Соответственно результатом этой операции будет являться то, что элементы сетки и ее узлы будут идентичными на выбранных поверхностях. В одной операции могут участвовать только две поверхности, поэтому поочередно повторяем это действие для каждой пары. При этом нужно указать ось камеры сгорания и сохранять порядок выбора поверхности для каждого случая.



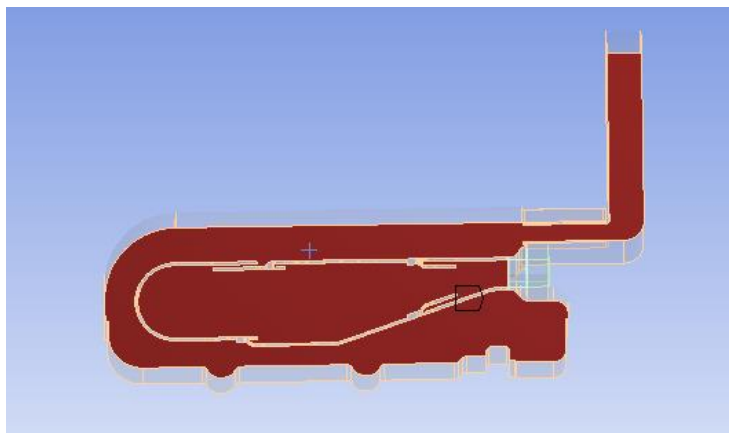


Рис. 14. Идентичные поверхности «Match Control»

Еще одним методом контроля сеточной модели является операция «Sizing», с помощью которой можно регулировать размер и количество элементов сетки на объекте, грани тела или ребре. На входном и выходном участке (B, C, D, E), как это показано на рисунке 15, задан размер элемента равный 0,8 мм, на показанных плоскостях (A, F) – 1 мм.

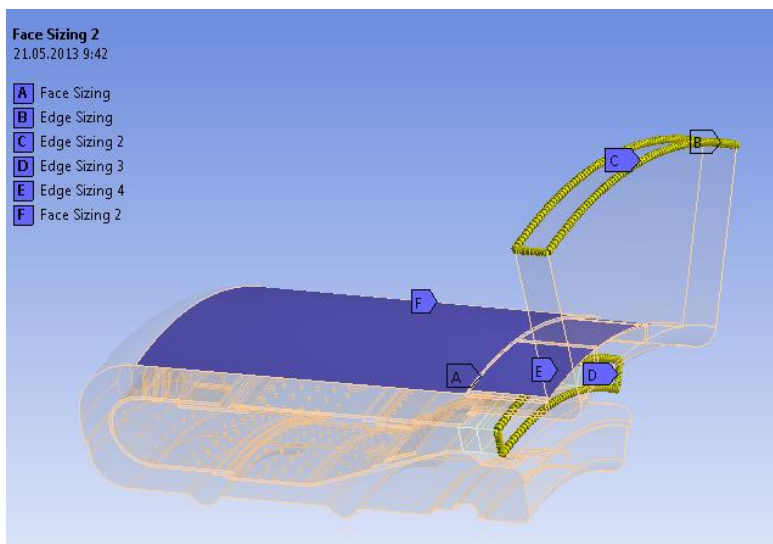


Рис. 15. Выбранные ребра и плоскости «Edge Sizing»

Так как используется периодическая граница, то все операции, производимые на одной границе, будут автоматически учитываться и на соответствующей ей.

Структурированная сетка была сгенерирована только на выходе из КС, т.к. она может быть использована в тех случаях, когда заранее известна принципиальная картина течения в данной области. В остальных случаях рекомендуется использовать неструктурированную сетку.

После генерации конечно-элементной сетки получаем результат, показанный на рис. 16.

После выполнения всех перечисленных выше действий конечно-элементная сетка получилась равномерной (с небольшими отклонениями в размерах конечных элементов) по всему объему модели. Общее количество конечных элементов составило около 4,4 миллионов.

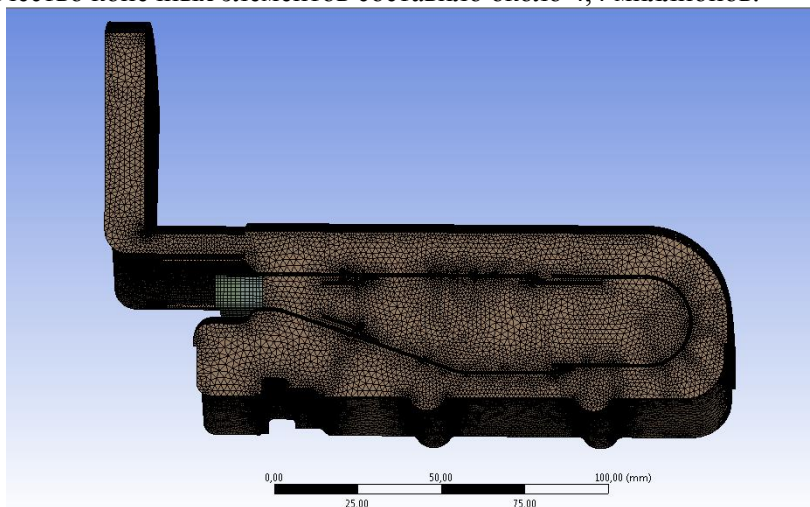


Рис. 16. Готовая сеточная модель

Сгущения сетки расположены на сложных элементах, таких как форсунки, кольца жаровой трубы и воздушные карманы (рис. 17).

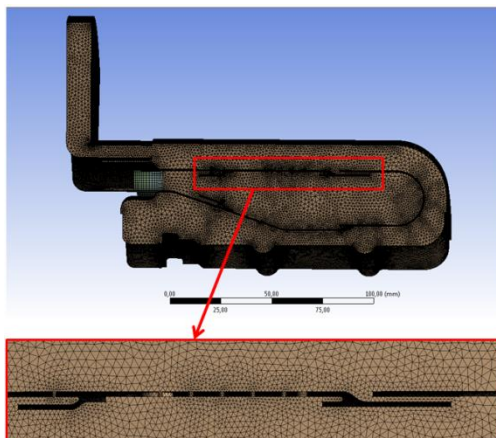


Рис. 17. Место сгущения сетки

Полученное качество сеточной модели позволяет проводить расчёт газодинамики с большой точностью.

После построения сеточных моделей всех узлов газогенератора, для его расчёта в едином программном комплексе необходимо их соединить в ANSYS CFX Pre, главное окно программы которого приведено на рис. 18.

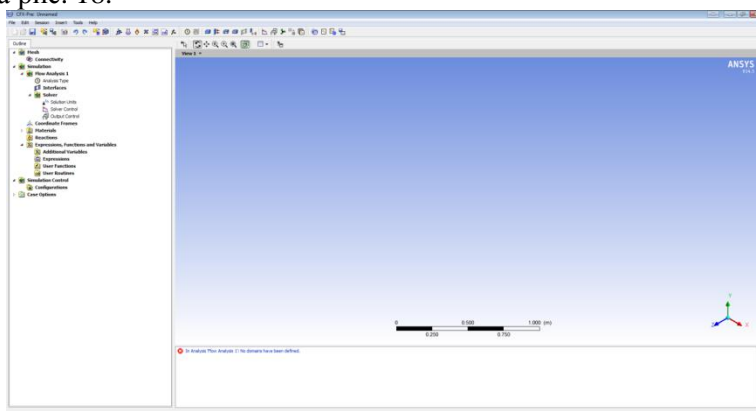


Рис. 18. Главное окно программы

Вначале необходимо загрузить сеточные модели всех узлов. Выбираем *File/Import/Mesh*, и поочередно открываем сеточные модели. Если модели изначально построены правильно по расположению относительно начала координат, то все узлы будут находиться в нужном

месте друг относительно друга. Если нет, то положение сеточные модели узлов можно перемещать и вращать с помощью функции Transform Mash (*Mesh/Transform Mesh*) - рис. 19. Во вкладке Transformation выбирается действие, совершаемое с моделью (перемещение или вращение), его ось и величина.

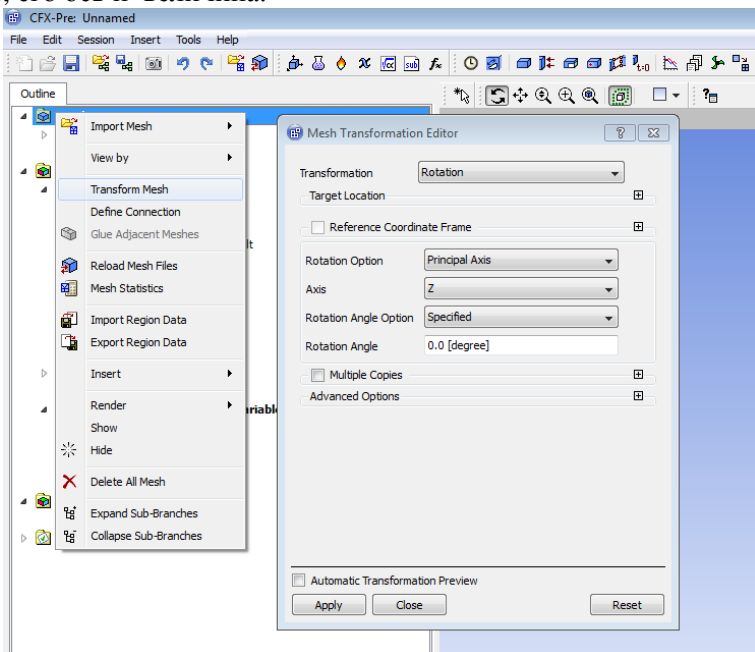


Рис. 19. Меню Transform Mesh

4 Задание начальных и граничных условий

Для проведения расчета необходимо назначить начальные и граничные условия для математической модели. Начальными условиями называют условия, которые характеризуют свойства рабочего тела (молярная масса, теплоемкость, плотность и т.д.) и внешние условия (давление, температура и т.д.). Граничными условиями называют условия, которые описывают математическую модель решателя (модель турбулентности, настройки доменов, задание интерфейсов и т.д.)

Назначение начальных и граничных условий производится в пакете ANSYS CFX Pre. Вначале необходимо определиться в какой постановке будет проводиться расчет: стационарной или нестационарной. В нашем случае в меню *Analysis Type*: выбираем *Steady State*(стационарный). Для подтверждения введенных или выбранных данных необходимо использовать кнопки *OK* или *Apply*.

После этого в дереве модели во вкладке *Materials* выбирается рабочее тело: *Air Ideal Gas*. Свойства нашего рабочего тела приведены в табл. 1.


Табл. 1. Свойства рабочего тела

Молярная масса, кг/кмоль	28,96
Теплоемкость Дж/кг*К,	1004,4
Динамическая вяз- кость кг/м*с	по закону Сазерленда: $\mu = 1,716e - 5 \times \left(\frac{273,15 + 110,56}{T + 110,56} \right) \times \left(\frac{T}{273,15} \right)^{1,5}$
Теплопроводность, Вт/м*К	0,0261

В CFX-PRE имеется довольно обширная встроенная база данных различных газов и жидкостей с уже настроенными термогазодинамическими свойствами. Нам необходимо изменить значение динамической вязкости с постоянного на вычисляемый по формуле Сазерленда. Для этого во вкладке *Material Properties* выбираем пункт *Transport Properties* и вводим следующие данные (табл. 2):

Табл. 2.

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

Затем, используя меню *Domain*  на панели быстрого доступа создаем домены (расчетные зоны) входной области, рабочего колеса компрессора, диффузора компрессора; камеры сгорания; соплового аппарата и рабочего колеса турбины (рис. 20). Удобно называть домены по имени того узла двигателя, которому они соответствуют. Создание большого количества расчетных зон вызвано потребностью в настройке частоты вращения подвижных элементов, а также применения интерфейсов позволяющих передавать параметры потока от неподвижных доменов к подвижным и наоборот.

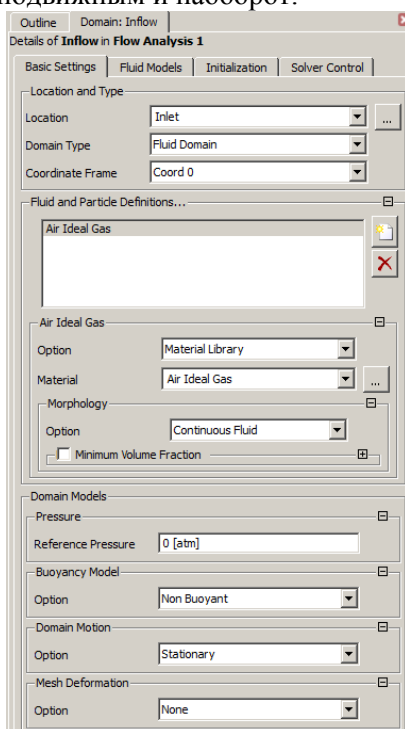


Рис. 20. Меню настройки свойств домена

После создания доменов, требуется их дополнительная настройка:

- во вкладке *Basic Settings* выбирается рабочее тело (Air Ideal Gas), устанавливается равным нулю справочное давление (*Reference-Pressure*), в подменю *Domain Motion* указывается неподвижный домен или он совершает вращательное движение. При задании вращения домена необходимо указать угловую скорость (в рад/с, об/мин, об/с) и ось вращения (Global X). У нас множество подвижных границ и доменов, поэтому для облегчения решения этой задачи можно воспользоваться функцией *Expressions*. 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 изменять настройки модели, вводя новое значение переменной. Для использования этой функции необходимо нажать на



и ввести буквенное значение переменной, например *n*. Затем в дереве проекта в меню *Expressions, Functions and Variables* в вкладке *Expressions* создается переменная с тем же обозначением (*n*) и в поле *Definition* вводится значение частоты вращения ($-60000 [rev\ min^{-1}]$). 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 *Total Energy*. Здесь же в подменю *Turbulence* выбирается модель турбулентности и ее настройки: у нас модель турбулентности *k-Epsilon*, функции стенки *Scalable Wall Function*. Параметры относящиеся к настройке всей расчетной модели (рабочее тело, теплообмен, модели турбулентности, модель горения и др.) применяются ко всем доменам модели.

В нашем случае соответственно были созданы домены: *Inflow, CBK, Diffuzor, ks, CA1, RKT1*. Подвижными будут моделироваться домены рабочих колес турбомашин.

После создания доменов для них назначаются граничные условия. Для создания граничного условия необходимо на панели быстрого



доступа левой кнопкой мыши нажать на иконку и выбрать домен которому будет принадлежать граничное условие. Для граничного условия на входе необходимо ввести данные представленные в табл. 3.

Табл. 3. Граничные условия на входе

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

Потом задаётся граничное условие на выходе, в домене рабочего колеса турбины (RKT) (табл. 4).

Табл. 4. Граничные условия на выходе

Name	out
Вкладка <i>Basic Settings</i>	
Boundary Type	выбирается тип Outlet
Location	выбирается выходная грань RKT
Вкладка <i>Boundary Details</i>	
Flow Regime	Subsonic
Mass And Momentum Option	Average Static Pressure
Relative Pressure	96259 (Pa)
Pres. Profile Blend	0.05
Pressure Averaging Option	Circumferential

Затем во вращающихся доменах рабочих колес турбомашин необходимо выделить неподвижные грани для корректного моделирования поведения потока в радиальных зазорах. В домене *СВК* создается граничное условие со следующими параметрами (табл. 5).

Табл. 5. Граничные условия для неподвижных граней

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

Аналогично задается неподвижная грань и для домена рабочего колеса турбины (*RKT*).

Для передачи данных между отдельными расчетными зонами служат специальные граничные условия проницаемости - интерфейсы (*Interfaces*), для работы с которыми имеется специальное меню - рис. 21.

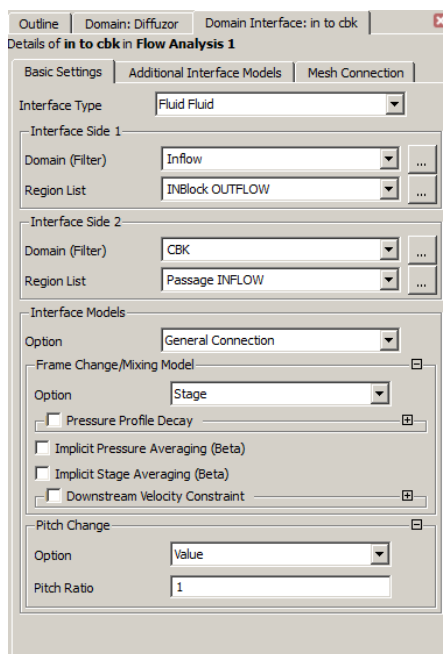


Рис. 21. Меню настройки свойств интерфейса


Чтобы создать интерфейс между доменами *Inflow* и *CBK* нужно на панели быстрого доступа нажать иконку  и ввести данные представленные в табл. 6.

Табл. 6 Граничные условия для создания интерфейсов

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

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 - 13/8, для интерфейса между доменами камеры сгорания и соплового аппарата соответственно 8/13, а для интерфейса между доменами соплового аппарата турбины и рабочего колеса турбины - 13/23.

Особенностью расчетных сеток вращающихся элементов лопаточных машин, созданных в сеткогенераторе *Ansys Turbo Grid* с учетом радиальных зазоров, является несовпадающая сетка в зазоре (рис. 22). В результате этой особенности в радиальном зазоре над лопаткой фактически установлены непроницаемые стенки. Для учета перетекания в зазоре рабочих колес лопаточных машин необходимо настроить интерфейсы в доменах *CBK* и *RKT*.

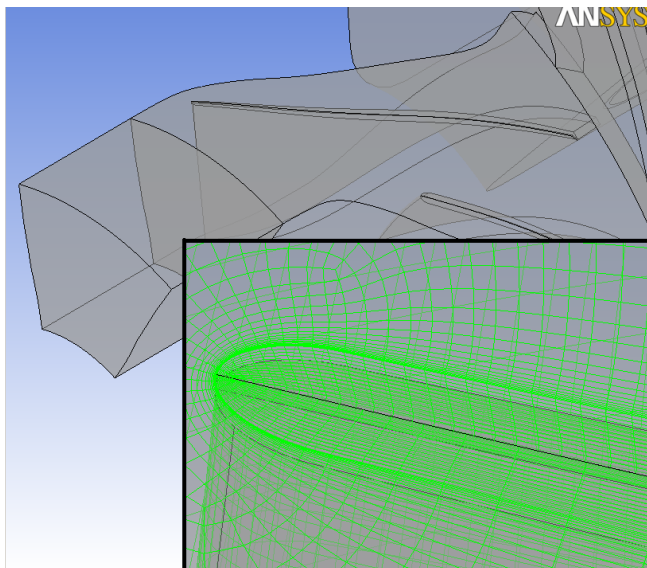


Рис. 22 Несовпадающая сетка в радиальном зазоре

Для этого необходимо создать внутренние интерфейсы над основной и дополнительной (сплиттером) лопатками рабочего колеса компрессора и над лопаткой рабочего колеса турбины, соответственно *cbkint1*, *cbkint2* и *rktint*. В табл. 7-9 приведены настройки для этих интерфейсов.

Табл. 7. Граничные условия для учета перетекания в зазоре рабочих колес лопаточных машин

Name	cbk int1
Вкладка <i>BasicSettings</i>	
InterfaceType	выбирается тип Fluid Fluid
Interface Side 1	СВК
Region List	выбирается первая грань в радиальном зазоре над основной лопаткой СВК: Main Blade SHROUDDTIPGGISIDE 1
Interface Side 2	СВК
Region List	выбирается вторая грань в радиальном зазоре над основной лопаткой СВК:

	Main Blade SHROUDTIPGGISIDE 2
Interface Models Option	General Connection
Frame Change/Mixing Model Option	None

Табл. 8. Граничные условия для учета перетекания в зазоре рабочих колес лопаточных машин

Name	cbkint2
Вкладка <i>Basic Settings</i>	
InterfaceType	выбирается тип Fluid Fluid
Interface Side 1	CBK
Region List	выбирается первая грань в радиальном зазоре над дополнительной лопаткой CBK: Splitter Blade 1 SHROUD TIP GGI SIDE 1
Interface Side 2	CBK
Region List	выбирается вторая грань в радиальном зазоре над дополнительной лопаткой CBK: лопаткой CBK: Splitter Blade 1 SHROUD TIP GGI SIDE 2
Interface Models Option	General Connection
Frame Change/Mixing Model Option	None

Табл. 9. Граничные условия для учета перетекания в зазоре рабочих колес лопаточных машин

Name	rktint
Вкладка <i>BasicSettings</i>	
InterfaceType	выбирается тип Fluid Fluid
Interface Side 1	RKT
Region List	выбирается первая грань в радиальном зазоре над лопаткой RKT: SHROUD TIP GGI SIDE 1

Interface Side 2	RKT
Region List	выбирается первая грань в радиальном зазоре над лопаткой RKT: SHROUD TIP GGI SIDE 2
Interface Models Option	General Connection
Frame Change/Mixing Model Option	None

После создания интерфейса в графическом окне на границах расчетных моделей, выбранных проницаемыми, появляются специальные символы в виде зеленых конусов (рис. 23).

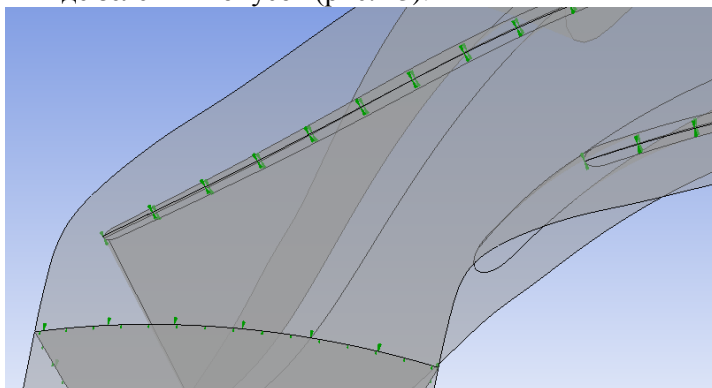


Рис. 23. Маркеры интерфейсов на расчетной модели

Так как лопаточные венцы моделируются с помощью одного межлопаточного канала, а камера сгорания одним сектором в 45^0 , то необходимо настроить граничное условие периодичности. Для этого также используется меню *Domain Interface* (рис. 24).

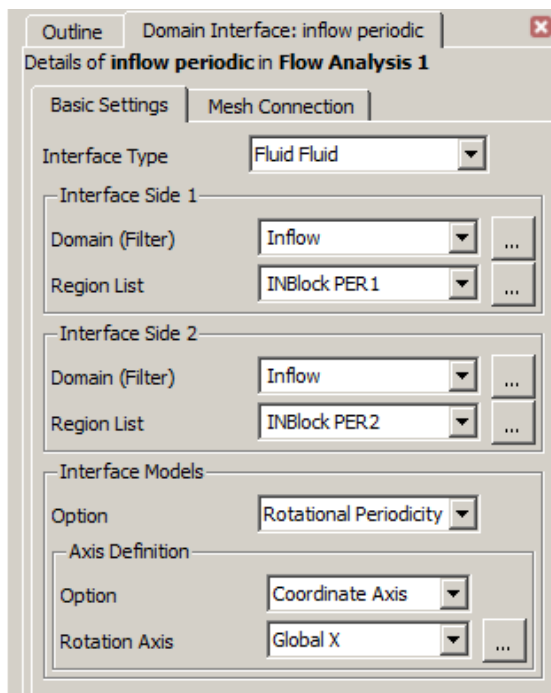


Рис. 24. Меню настройки граничного условия периодичности

Для настройки периодичности домена Inflow необходимо ввести следующие данные (табл. 10).

Табл. 10. Граничные условия периодичности

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

Таким же образом необходимо создать периодические граничные условия для всех расчетных зон. После задания граничных условий в графическом окне препроцессора на модели появляются маркеры, которые помогают определить грани на которые еще не наложены граничные условия (рис. 25).

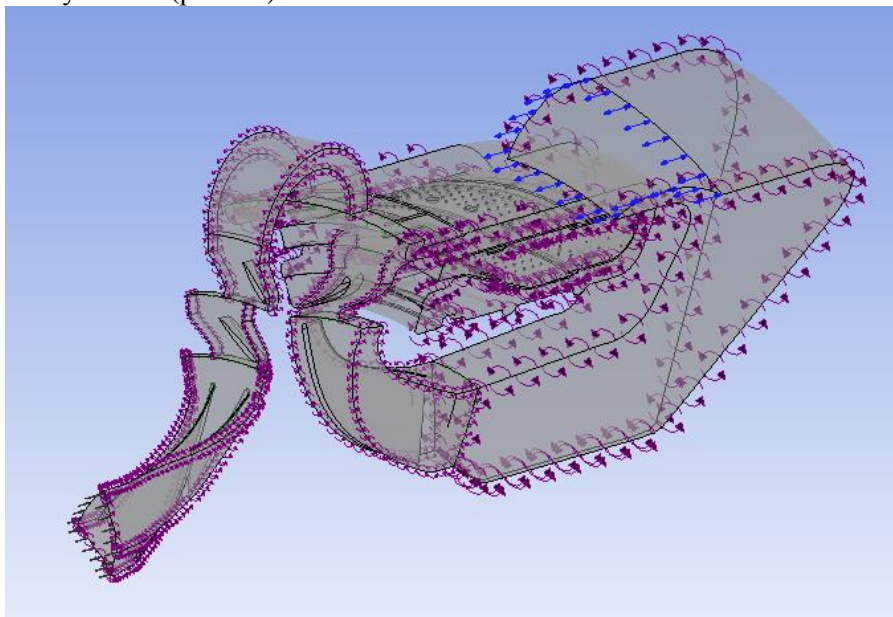


Рис. 25. Внешний вид модели с настроенными граничными и периодическими условиями

5 Настройка решателя

Далее необходимо настроить опции решателя. Настройка осуществляется в дереве проекта во вкладке *Solver, Solver Control* (рис. 26).

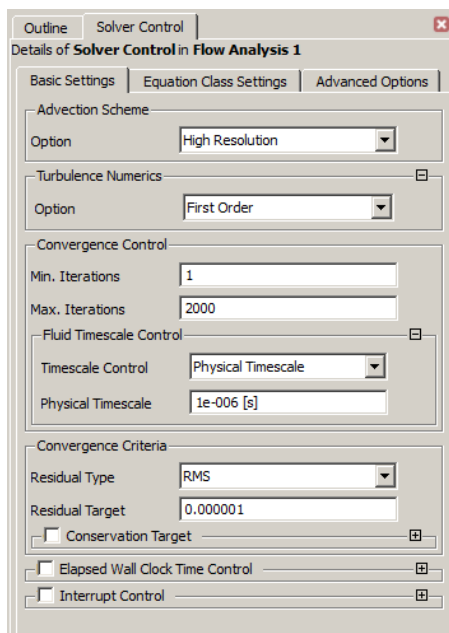


Рис. 26- Внешний вид меню Solver Control

Здесь указываются максимальное количество итераций, требуемый уровень невязок, порядок точности, а также настраиваются параметры, влияющие на скорость сведения решения. Для данного типа задач рекомендуется использовать физический масштаб времени табл. 11.

Табл. 11. Параметры сходимости

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

Для сложных расчетных моделей, состоящих из множества доменов, стандартный критерий схождения решения - значение невязок, недостаточен. Оценку схождения решения удобно проводить по графику изменения интегральных параметров потока во время расчета. Для расчётной модели газогенератора такими интегральными характеристиками удобно принять значения массового расхода на входе и выходе модели, степень сжатия в рабочем колесе компрессоре (π_k), коэффициент восстановления давления в диффузоре компрессора и степень расширения в турбине (π_r). Чтобы в процессе решения была возможность отслеживать изменения интересующих параметров необходимо в меню *Expressions* создать переменные, позволяющие рассчитывать интересующие нас параметры. Выражения записывается во вкладке *Definition* согласно табл. 12.

Табл.12. Выражения интегральных параметров потока

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

После создания выражений необходимо перейти в настройки *Solver*, вкладка *Output Control* (рис. 27).

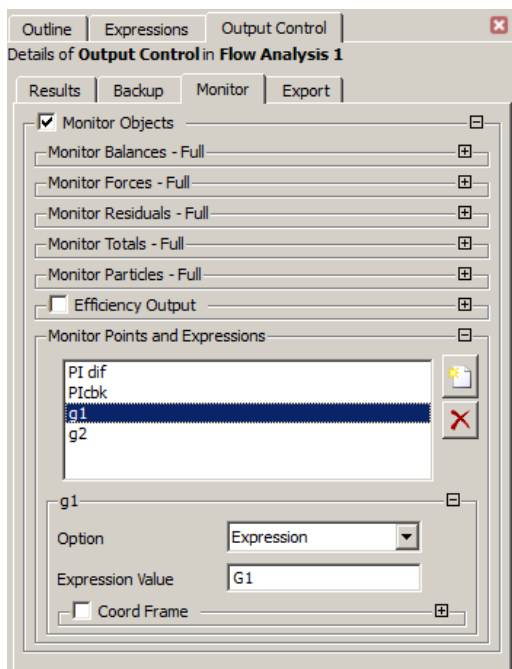




Рис. 27. Внешний вид меню Output Control

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

иконки  создаем переменную (название переменной не должно полностью совпадать с названием соответствующего выражения), выбираем в *Option Expression* и вводим имя соответствующей ей выражения.

После этого сохраняем файл с помощью иконки  на панели быстрого доступа в формате *.def. На этом создание расчетной модели газогенератора ГТД на режиме запуска завершено.

Методика моделирования рабочего процесса газогенератора микро газотурбинного двигателя на крейсерском режиме несколько отличается от методики моделирования ре-жима запуска. Основные отличия заключаются в следующем:

- вместо однокомпонентного рабочего тела необходимо использовать многокомпонентную смесь газов, состоящую из кислорода (O_2), азота (N_2), углекислого газа (CO_2), паров воды (H_2O), паров топлива (JetA);

- при расчете необходимо использовать дополнительную модель горения Eddy Dissipation. В данной работе рационально использовать модель горения, состоящую из одной стехиометрической химической реакции. Во-первых, погрешность по тепловыделению при использовании простой реакции будет небольшой, а во-вторых не приведет к существенному возрастанию времени счета;

- появляется дополнительное граничное условие расхода топлива на соплах форсунок камеры сгорания;

- необходима оценка разности потребляемой для привода компрессора мощности, и мощности вырабатываемой турбиной;

- необходимо использовать прединициализацию решения;

- из-за значительных изменений параметров в проточной части, во избежание "развала" решения на начальном этапе счета необходимо запускать расчет на достаточно-но небольших значениях Physical Timescale (около 10^{-9}), с последовательным увеличением шага по времени (рекомендуется кратно 10) до достижения значения Physical Timescale= 10^{-4} ... 10^{-3} .

В базе данных CFX имеются многокомпонентные смеси с уже настроенными теплофизическими свойствами и параметрами химических реакций. Сначала необходимо выбрать в библиотеке данных CFX многокомпонентную рабочую смесь JetA-Air. Для этого в главном дереве проекта на вкладке *Material s* нужно щелкнуть ПКМ и выбрать меню *Import Library Data* (рис. 28)

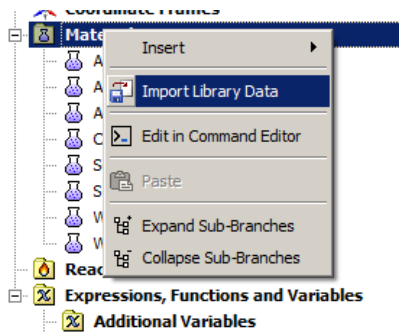



Рис. 28. Выбор нового рабочего тела

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. 29)

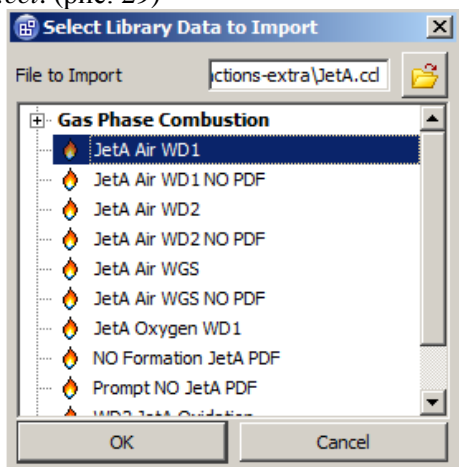


Рис. 29. Меню Import Library Data

После этого нужно выбрать *JetA Air WD1* и нажать *OK*. В результате в дереве проекта во вкладке *Materials* появятся новые компоненты: (O_2 , N_2 , CO_2 , H_2O , *JetA*).

Также во вкладке дерева проекта появятся доступные химические реакции: *JetA Air WD1* и *JetA Oxygen WD1*. 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 *Fluid IOption* поменять с *Material Library* на *Material Definition* (рис. 30). Таким образом, появляется возможность задать в качестве рабочего тела реагирующую смесь.

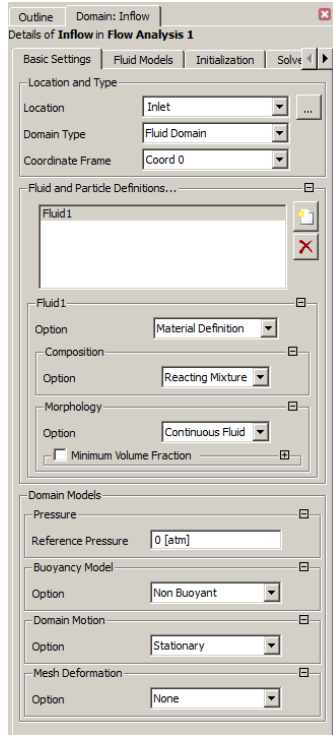


Рис. 30. Меню настройки домена *Inflow*

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. 31).

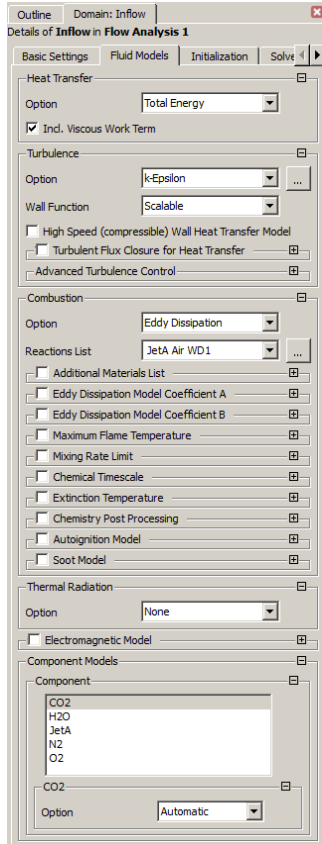


Рис. 31. Меню настройки моделей в домене *Inflow*

Необходимо также проверить, чтобы в поле *Component Models* для азота (N_2) выбрана опция *Constraint*, что означает вычисление концентрации в ячейке по остаточному принципу. Для сохранения изменений нажимаем клавишу *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 создаем граничное условие (табл. 13).

Табл. 13. Начальные условия подачи топлива

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

Затем необходимо внести изменения в уже созданное граничное условие на входе в домене входной области (табл. 13).

Табл. 14. Начальные условия на выходе

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

Для облегчения запуска расчета многокомпонентной смеси необходимо задать начальное распределение компонентов в расчетной модели - прединициализацию. Для этого во всех доменах расчетной модели зададим распределение массовых долей O2 - 0,23; N2 - 0,77. В меню настройки домена необходимо перейти во вкладку *Initialization* (рис. 32), активировать опцию *Domain Initialization* и ввести данные согласно табл. 14.

Табл. 14. Условия пред инициализации

O2 Option	Automatic with Value
Mass Fraction	0.23

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

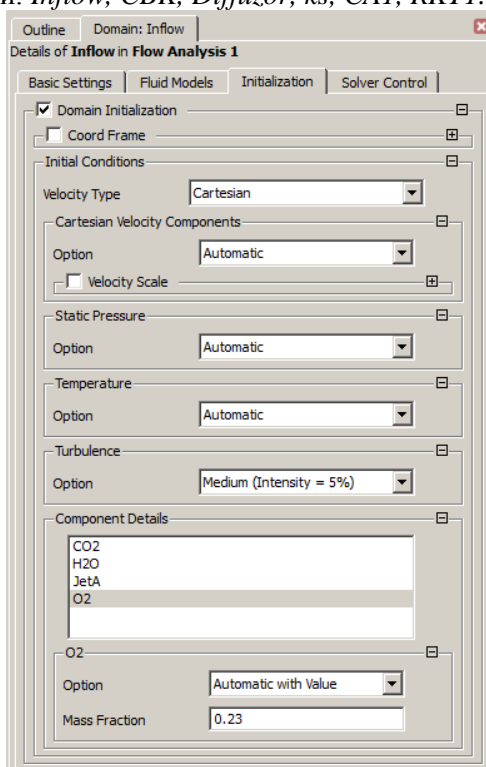


Рис. 32. Настройка пред инициализации в домене *Inflow*

Далее переходим во вкладку Expressions дерева проекта. Здесь необходимо создать переменные для отображения в ходе расчета новых интегральных параметров: крутящего момента турбины и компрессора, коэффициент потерь камеры сгорания и среднюю температуру перед сопловым аппаратом турбины. Новые переменные создаются согласно табл. 15.

Табл. 15. Создания переменных для отображения в ходе расчета

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

Затем переходим во вкладку Solver главного дерева проекта для настройки параметров счета и включения новых параметров для отображения. Во вкладке Solver Control устанавливаем максимальное количество итераций 3000 и значение Physical Timescale = 10^{-9} . Во вкладке Output Control создаем новые параметры для отображения во время расчета: Mkrcompressor, Mkr turbine, Sigma, Tg, как описано выше (рис. 33).

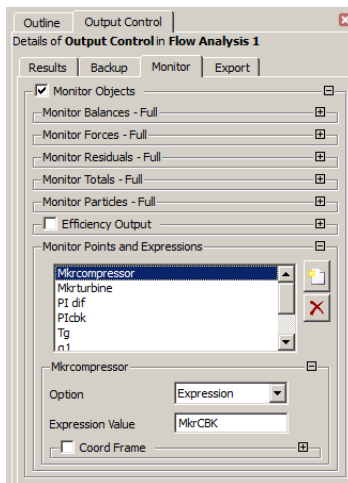
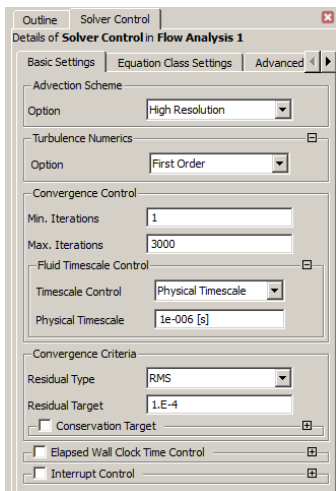



Рис. 33. Настройка параметров счета

Следующим шагом сохраняем проект и записываем файл для решателя *CFX-Solver Manager*. На этом создание расчетной модели газогенератора ГТД на крейсерском режиме работы завершено.

6 Расчет и условия сходимости

Решатель CFX отделен от препроцессора и выделен в отдельную программу *CFX-Solver Manager*. Запуск программы осуществляется непосредственно из препроцессора CFX с помощью иконки : сначала записывается исходный файл расчета в формате *.def, а после этого автоматически запускается *CFX-Solver Manager* (рис. 34).

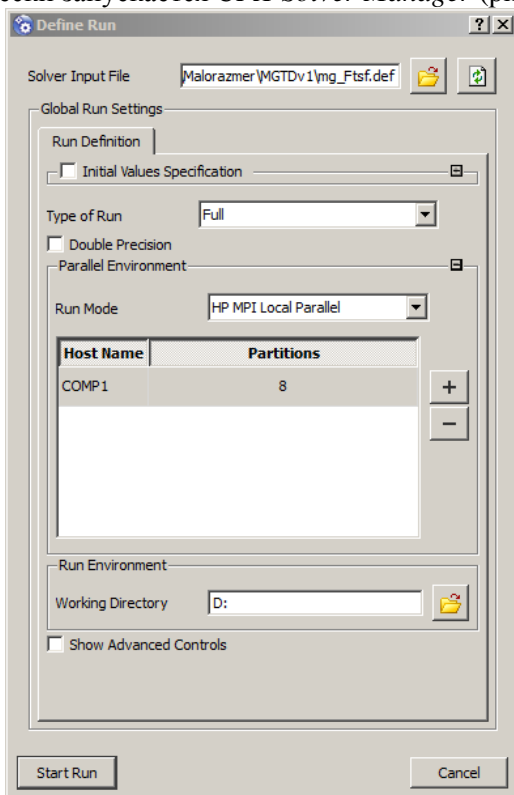


Рис. 34. Внешний вид меню Define Run

В качестве метода распараллеливания решения выбираем *HPMPI Local Parallel* и указываем число доступных для работы ядер процессора вычислительной машины. Затем для начала счета нажимаем кнопку *Start Run*. В процессе счета автоматически будут отображаться пользовательские переменные в окне *User Points* (рис. 35).

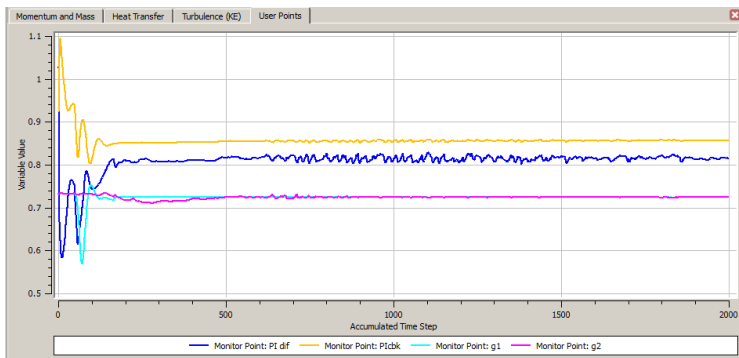


Рис. 35. Характер изменения пользовательских переменных во время расчета

После того как невязки (амплитуда колебания графиков) начали снижаться, можно повышать значение Physical Timescale для снижения времени вычисления. CFX Solver Manager позволяет вносить изменения в настройки счета, не останавливая сам расчет. При помощи



иконки можно перейти в меню динамического управления счета, где ввести новое значение Physical Timescale, отличающее от предыдущего на порядок (Рис. 36). Завершать расчет газогенератора ГТД на режиме запуска рекомендуется при значении Physical Timescale равным 10^{-1} секунды, на крейсерском режиме - 10^{-4} секунды.

Name	Value
DOMAIN INTERFACE : R1 to S1	
DOMAIN INTERFACE : S1 to S1 Periodic...	
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	First Order
ADVECTION SCHEME :	
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. 36. Изменение шага по времени во время расчета

В процессе решения необходимо следить не только за поведением невязок стандартных параметров, но и за невязками интегральных параметров (рис. 37). Наибольшее время установления у параметров ка-

меры сгорания: коэффициента восстановления полного давления и среднemasсовой температуры торможения на выходе.

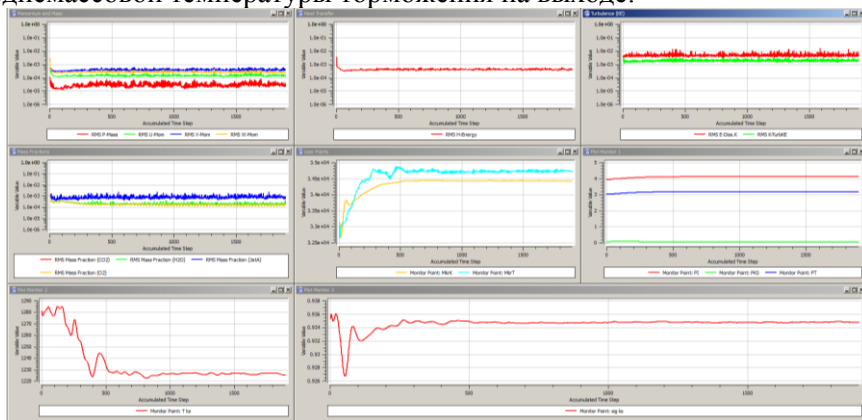



Рис. 37. Изменение невязок во время расчета

После установления решения при максимальных рекомендованных значениях временного шага и достижения потребной погрешности по крутящему моменту ($<4\%$), можно переходить к постпроцессингу.

Завершение расчета происходит автоматически по достижении указанного числа итераций, либо значения невязок. Для принудительной остановки расчета можно воспользоваться иконкой .

7 Визуализация результатов расчета

По окончании расчета автоматически создается файл результатов (.res) и появляется окно предлагающее запустить CFD- Post для анализа результатов. При запуске постпроцессора появляется окно *Domain Selector* где есть возможность выбрать домены необходимые для работы (рис. 38).

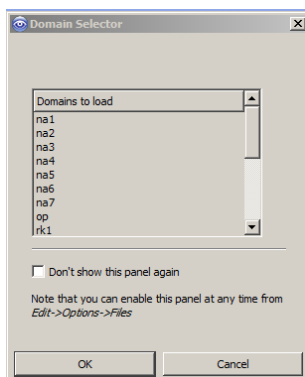


Рис. 38. Окно *Domain Selector*

При большой размерности задачи для облегчения работы с постпроцессором имеет смысл загружать отдельные компоненты ГТД. После нажатия ОК появляется основное окно программы (рис. 39)

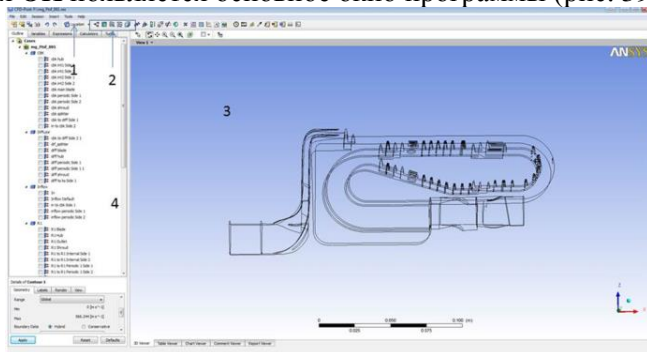


Рис. 39. Основное окно программы

На рисунке 39 выделены основные элементы рабочего окна:

- 1) Создание локаций (точек, линий, плоскостей и т.д.)
- 2) отображение векторов потока, контуров (полей параметров), линий тока, и визуализация течения отдельных частиц.

3) Окно визуализации параметров

4) Дерево проекта

Во вкладке Outline (4) находится дерево проекта, там же будут появляться и вновь создаваемые поверхности, плоскости и элементы визуализации потока. В верхнем меню находится ряд иконок,



, служащих для визуализации параметров потока, соответственно: отображение векторов потока, контуров (полей параметров), линий тока, и визуализация течения отдельных частиц. При работе с меню настройки различных инструментов визуализации потока необходимо указать домены для которых проводится анализ, указать поверхность для отображения, выбрать параметр для отображения (давление, температура, скорость) и диапазон параметра (по всей расчетной модели, либо только на выбранных поверхностях). В верхнем меню во вкладке Location предусмотрено создание пользовательских поверхностей. Для получения интегральных параметров необходимо перейти во вкладку Calculators и выбрать Function Calculator. Для расчета нажимаем кнопку Calculate, и в окне Results появляется рассчитанное значение.

В качестве примера рассмотрим создание поля скоростей в срединном сечении модели. Для этого вначале необходимо создать вертикально расположенную плоскость, проходящую через ось камеры сгорания. Выбираем Location/Plane (Рис. 40).

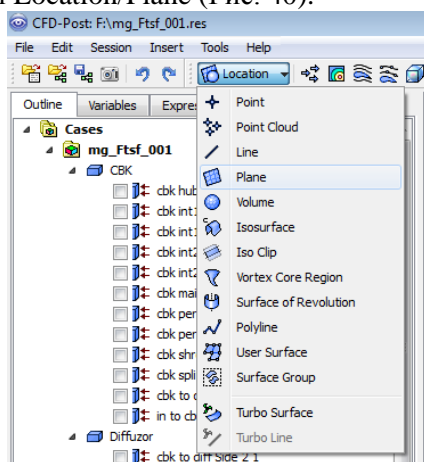


Рис. 40. Создание плоскости

Вводим обозначение для созданной плоскости - Plane. После этого появляется окно выбора деталей создания плоскости (рис. 41)

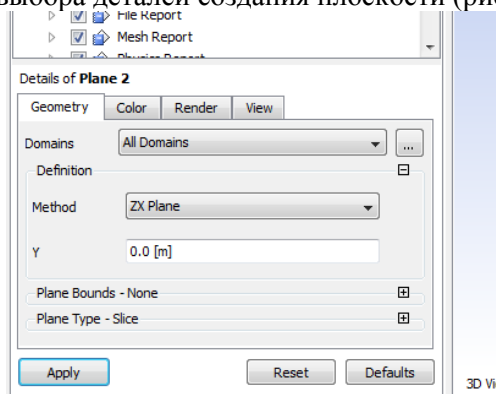


Рис. 41. Окно Details of plane

В этом окне во вкладке Domains выбираются домены, в которых будет выделена эта плоскость, по умолчанию используется установка All Domains, означающая, что плоскость будет проходить через всю модель. Во вкладке Method выбираем плоскость ZX Plane, в Y выбираем 0, нажимаем Apply. После этих операций в окне для визуализации появиться созданная плоскость (рис. 42)

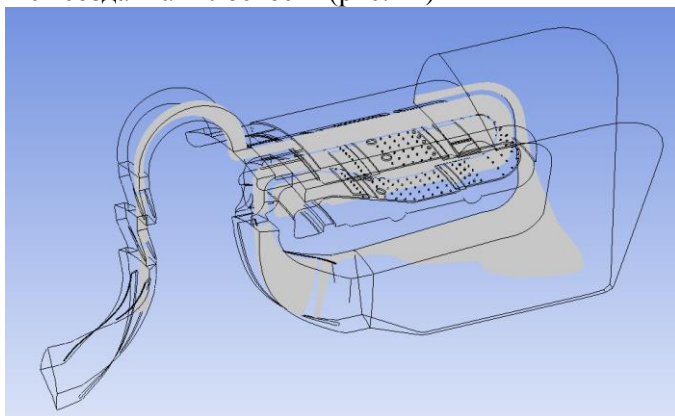



Рис. 42. Построенная плоскость

Затем переходим к созданию поля скорости. Для этого нажимаем кнопку Contour , вводим обозначение для создаваемого поля,

например Contour 1. После этого появиться окно Details of Contour (рис. 43).

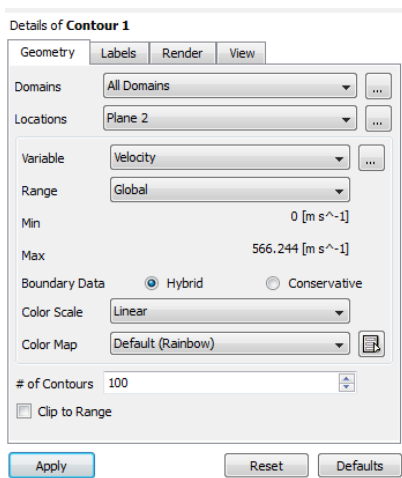


Рис. 43. Меню Details of Contour

В поле Domains выбираем All Domains, а в Location выбираем созданную плоскость. Во вкладке Variable выбирается параметр, который будет отображен на плоскости: скорость, температура, давление, турбулентная вязкость и т.д. Во вкладке Range выполняется ранжирование значений: глобальное или местное. В поле # of Contours ставим значение 100 (количество делений шкалы) и нажимаем Apply. После этого в окне визуализации появиться поле скоростей (рис. 44).

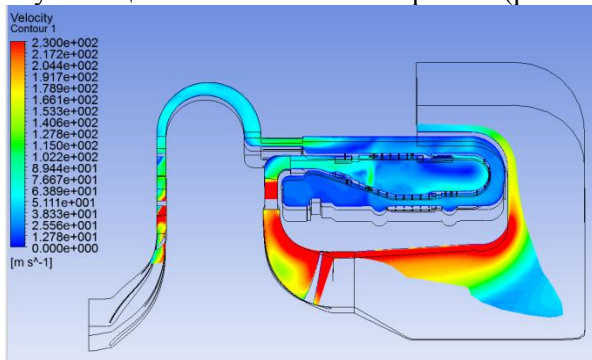



Рис. 44. Поле скоростей

Аналогично можно построить векторное поле скоростей, нажав кнопку *Vector*  (Рис. 45).

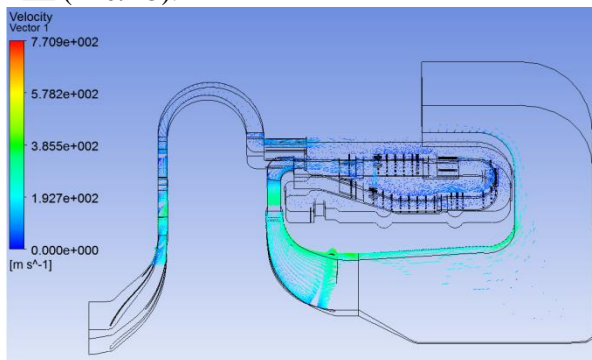



Рис. 45. Настройки для визуализации векторов скоростей

Аналогично можно построить линии тока на созданной поверхности или внутри камеры сгорания с помощью функции *Streamline*  (рис. 46 - 47).

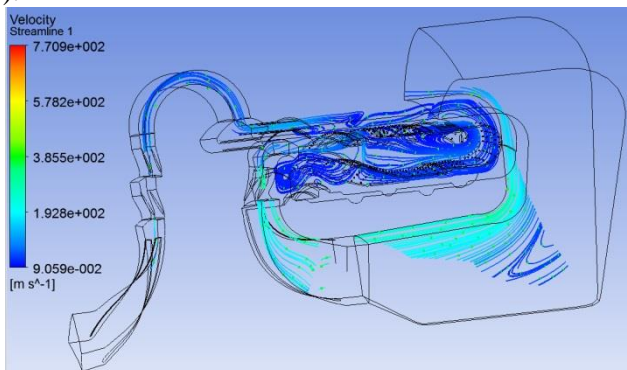


Рис. 46. Настройки для визуализации линии тока на пользовательской поверхности в камере сгорания

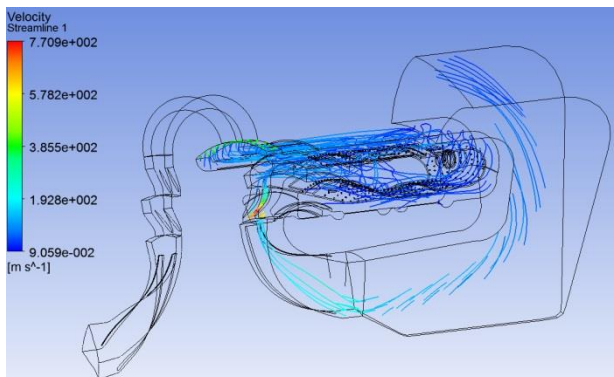


Рис. 47. Настройки для визуализации линии тока внутри камеры сгорания

Определим среднюю скорость потока на входе в камеру сгорания. Для этого в дереве проекта выбираем вкладку Calculator, в которой выбираем поле Function Calculator (Рис. 48).

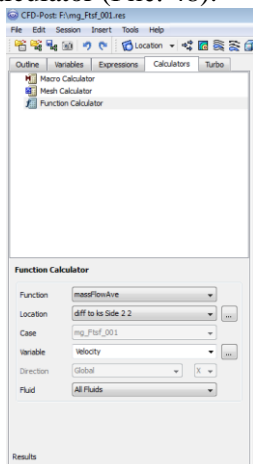


Рис. 48. Меню Function Calculator

В меню Function Calculator, во вкладке Function (в табл. 15 представлены доступные функции калькулятора) выбираем massFlowAve (будет производиться среднемассовое осреднение параметров). Во вкладке Location выбирается плоскость, к которой будет применена выбранная функция, в данном случае необходимо выбрать плоскость входа в камеру сгорания (рис. 48).

Табл. 15. Доступные функции калькулятора *CFD Post*

area	площадь	Mass Flow	массовый расход
Area Ave	осреднение по площади	Mass Flow Ave	осреднение по массовому расходу
ave	осредненный	Max Val	максимальное значение
count	число узлов	Min Val	минимальное значение
force	сила	torque	момент
length	длина	volume	объем
Length Ave	средний по длине	Volume Ave	осреднение по объему

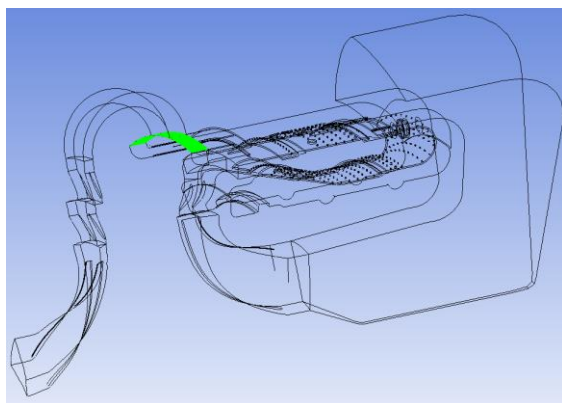


Рис. 48 - Выбор плоскости для осреднения

Во вкладке *Variable* выбираем параметр осреднения *Velocity* (также можно выбрать такие параметры как: плотность, давление, температура, скорость, угловая скорость, меридиональная скорость, вязкость и т.д.). Нажимаем *Calculate* и в окне *Results* появиться осредненное значение (рис. 49).

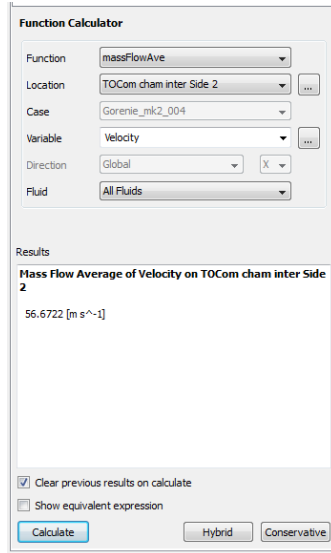


Рис. 49. Окно Results

Варианты заданий

№	Давление на входе, Па	Давление на выходе, Па	Температура на входе, К
1	101325	96260	288
2	101325	96260	283
3	101325	96260	278
4	101325	96260	273
5	96000	91200	288
6	96000	91200	283
7	96000	91200	278
8	98500	93575	288
9	98500	93575	283
10	98500	93575	278

Контрольные вопросы

1. Какие алгоритмы расчета газогенератора известны в настоящее время?
2. Назовите основные этапы расчета газогенератора ГТД с помощью единой виртуальной модели.
3. Опишите последовательность построения геометрической и сеточной моделей лопаточных машин.
4. Опишите последовательность построения геометрической и сеточной моделей камеры сгорания ГТД.
5. Что понимают под начальными и граничными условиями?
6. Какие отличия наблюдаются при реализации расчетов рабочего процесса газогенератора на режиме запуска и крейсерском режиме работы ГТД?
7. Какие параметры потока можно визуализировать в ANSYS CFX?

Заключение

Рабочий процесс в газогенераторе ГТД представляет собой набор сложных физических явлений. В данном методическом пособии были изложены все основные этапы расчета газогенератора на режиме запуска и на крейсерском режиме работы двигателя. В связи с разработкой нового алгоритма совместного расчета газогенератора ГТД, методика представляет значительный научный и практический интерес.

В данном учебном пособии:

- систематизированы алгоритмы расчета газогенератора
- приведена технология расчета газогенератора
- рассмотрены вопросы визуализации рассчитанных параметров.

Данное пособие предназначено для специалистов в области проектирования камер сгорания и лопаточных машин ГТД и студентов вузов.

Учебное издание

*Матвеев Сергей Геннадьевич
Орлов Михаил Юрьевич
Матвеев Сергей Сергеевич*

**РАСЧЕТ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ГТД
С ПОМОЩЬЮ ЕДИНОЙ ВИРТУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ
ЕГО РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА**

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

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

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