

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)» (СГАУ)

О. В. Батурич, Д. А. Колмакова, А. В. Кривцов

Численное исследование рабочего процесса во входных и выходных устройствах ГТД

Электронное учебное пособие

Работа выполнена по мероприятию блока 2 «Развитие и повышение эффективности научно-инновационной деятельности» и блока 3 «Развитие информационной научно-образовательной среды и инфраструктуры» Программы развития СГАУ на 2009 – 2018 годы по проекту «Разработка технологии создания виртуального ГТД и проектирование на ее основе микрогазотурбинного двигателя»

Соглашение № 2/12 от 03 июня 2013 г.

С А М А Р А

2013

УДК СГАУ: 621.515 (075)

ББК: 39.55

Б28

Авторы: **Батурич Олег Витальевич**
Колмакова Дарья Алексеевна
Кривцов Александр Васильевич

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

Батурич, О. В. Численное исследование рабочего процесса во входных и выходных устройствах: электрон. учеб. пособие / О. В. Батурич, Д. А. Колмакова, А. В. Кривцов; М-во образования и науки РФ, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). – Электрон. текстовые и граф. дан. (4,5 - Мбайт). - Самара, 2013. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

Учебное пособие содержит краткие сведения о расчетном исследовании рабочего процесса в неподвижных каналах ГТД таких как сопло, входное устройство с использованием современного CFD-программного комплекса Ansys CFX, основанного на решении уравнений Навье - Стокса. Подробно описаны процесс создания расчетной модели, создания сетки конечных элементов, наложение граничных условий, проведения расчета и обработки его результатов.

Учебное пособие предназначено для подготовки специалистов, обучающихся по специальности 160302.65 «Авиационные двигатели и энергетические установки» (ФГОС-2), изучающих дисциплину «Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок», «в 6 и 7 семестрах, для магистров по направлению 160700.68 «Двигатели летательных аппаратов» (ФГОС-3), изучающих дисциплину «Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок», «

Разработано на кафедре теории двигателей летательных аппаратов СГАУ

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2013

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ПОДХОДЫ К РАСЧЕТНОМУ ИССЛЕДОВАНИЮ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ВО ВХОДНЫХ И ВЫХОДНЫХ УСТРОЙСТВАХ ТУРБОРЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ	7
2. ПОСТРОЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ ОБЛАСТИ	11
3. РАЗБИЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ ОБЛАСТИ СЕТКОЙ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ	27
4. СОЗДАНИЕ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ ПОТОКА ГАЗА В СОПЛЕ	34
5. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ	50
6. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ	55
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	73

ВВЕДЕНИЕ

Как известно в состав газотурбинного двигателя входят входное устройство, компрессор, камера сгорания, турбина и сопло. При анализе рабочего процесса ГТД обычно основное внимание уделяется камере сгорания и турбомашинам, поскольку процессы, происходящие там наиболее сложны. Кроме того указанные узлы испытывают наибольшие нагрузки и определяют ресурс двигателя. По этой причине неподвижные сопло и входное устройство, особенно авиационных двигателей с дозвуковой скоростью полета или наземного применения, имеющие простую конструкцию, не испытывающие критических напряжений и обладающие относительно простым рабочим процессом обычно находятся на втором плане, и им не уделяется должного внимания при проектировании и доводке.

Однако не стоит забывать о них, поскольку их гидравлическое совершенство оказывает заметное влияние на рабочий процесс и эффективность двигателя в целом. Кроме того они оказывают существенное влияние на смежные узлы. Например, ошибки при проектировании входного устройства приведут к возникновению отрывов потока на входе в компрессор, что отрицательно скажется на его устойчивости.

Наибольшую информацию о рабочем процессе сопла или входного устройства может дать расчетное исследование с применением численных методов газовой динамики (*CFD* методы).

В их основе вычислительной газовой динамики лежат система уравнений Навье-Стокса, описывающая течение жидкости или газа с минимально возможными допущениями. *CFD* методы позволяют наиболее точно, по сравнению с другими расчетными технологиями, описать явления трехмерного потока в каналах любой пространственной формы, предсказывать отрывы, вторичные течения и т.п.. Возможности *CFD* методов на данный момент таковы, что позволяют с большой достоверностью исследовать

довать влияние нестационарных процессов на течение в канале в относительно небольшие сроки. Методы вычислительной газовой динамики не имеют расчетных аналогов при оценке нестационарных явлений на стадии проекта.

Многokrратно доказано, что результаты, получаемые с помощью *CFD* методов, с высокой степенью достоверности предсказывают поведение потока. Для относительно простых каналов отличия данных численного расчета обычно не отличаются более чем на 5%. Тем не менее, не смотря на некоторое количественное несовпадение, современные *CFD* программы позволяют предсказывать изменения параметров потока и интегральных параметры при варьировании режимными и геометрическими факторами с точностью до погрешности эксперимента.

По своей сущности *CFD* методы являются методами поверочного расчета, т.е. они позволяют изучить течение в канале, геометрия которого известна. Подобным образом в эксперименте определяются характеристики потока посредством прямых физических замеров. Учитывая это, а также сказанное выше, можно прийти к выводу, что применение численных методов газовой динамики позволит заменить большую часть экспериментальных исследований расчетом. Это существенно сокращает число необходимых для доводки компрессора и двигателя в целом испытаний, и как следствие, сокращаются сроки и стоимость создания нового изделия.

Таким образом, *CFD* - это мощное средство в руках грамотного проектировщика, способное существенно расширить его представления о физической картине процесса, имеющего место в конкретном изделии, рассчитать течение в нем с минимальными допущениями, рассмотреть большее число вариантов исполнения геометрии в относительно короткие сроки и найти пути существенного повышения эффективности, многократно сократить потребное число испытаний, уменьшить временные и материальные затраты. Но следует помнить, что результаты *CFD* расчетов – это решение дифференциальных уравнений, отражающих наше представление о физике процесса. Поэтому эксперимент навсегда останется окончательной инстанцией по проверке правильности принятых проектных решений и подтверждению достигнутых в расчете результатов.

Подходы к численному моделированию рабочих процессов сопла, входного устройства, как и любого другого неподвижного канала, мало

отличаются друг от друга. По этой причине технология их расчетного исследования приводится ниже на примере сопла ГТД.

1. ПОДХОДЫ К РАСЧЕТНОМУ ИССЛЕДОВАНИЮ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ВО ВХОДНЫХ И ВЫХОДНЫХ УСТРОЙСТВАХ ТУРБОРЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Исследование течения рабочего тела в неподвижном канале ГТД проводится на примере истечения газа из сопел турбореактивного двухконтурного двигателя (ТРДД) (рис. 1).

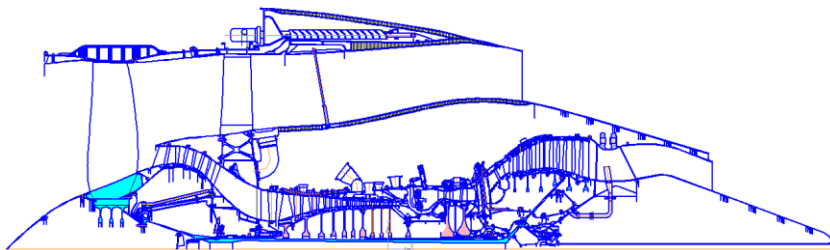


Рис. 1. Исследуемое сопло в составе двигателя

Исходными данными для создания геометрической модели расчетной области являются меридиональные обводы канала, обычно получаемые из чертежа двигателя.

При моделировании сопла кроме самого канала в состав расчетной области должна входить достаточно протяженная выходная область (рис. 2). Эта область необходима для моделирования взаимодействия вытекающей струи с атмосферой вокруг для корректного вычисления эпюр изменения параметров на срезе сопла. В качестве граничных условий при CFD расчете сопла обычно используются следующее сочетание: полное давление p^* и температура T^* , а также направление потока α на входе в сопло, принимаемые обычно по результатам термогазодинамического расчета

двигателя, либо детального проектирования предыдущего узла. На выходе, по границе присоединенной выходной области, обычно задается статическое давление, равное атмосферному p_n . Сопло авиационного ГТД и расчетная область для его моделирования представляют собой тело вращения. Однако для сокращения потребных компьютерных ресурсов обычно рассматривается только сектор с периодическим граничным условием на боковых границах. Угол сектора выбирается по числу стоек находящихся в сопле (если они есть). Если стойки в канале сопла отсутствуют, то угол периодичности может быть принят произвольно.

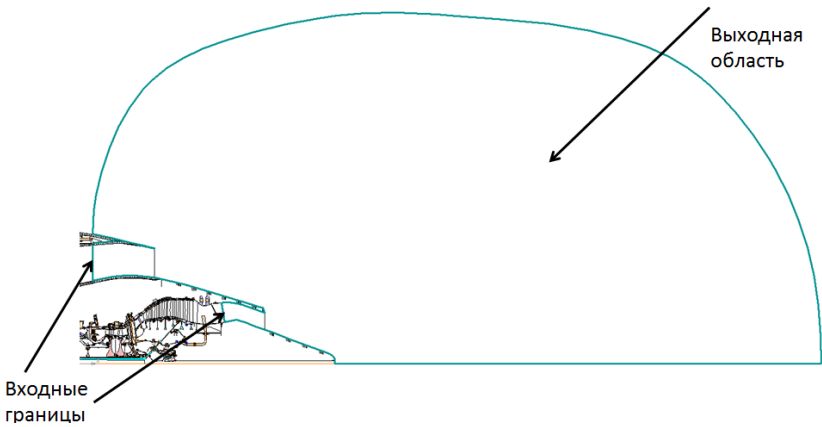


Рис. 2. Расчетная область при численном моделировании сопла

Подход к созданию расчетных моделей во входном устройстве во многом аналогичен описанным выше. Отличие заключается лишь в том, что присоединенный объем добавляется во входной части (рис. 3). Это позволяет точнее рассчитать поля параметров во входном сечении, сильно влияющие на характеристики входного устройства и обычно достоверно не известные. При моделировании воздухозаборника на границе присоединенного объема задаются полное давление p^* и температура T^* воздуха, направленные нормально к границе. На выходе из входного устройства целесообразно задавать расход воздуха G через двигатель. Здесь также имеет смысл моделировать сектор канала с периодическими граничными условиями на боковых границах. Подход к выбору периода такой же, как в сопле.

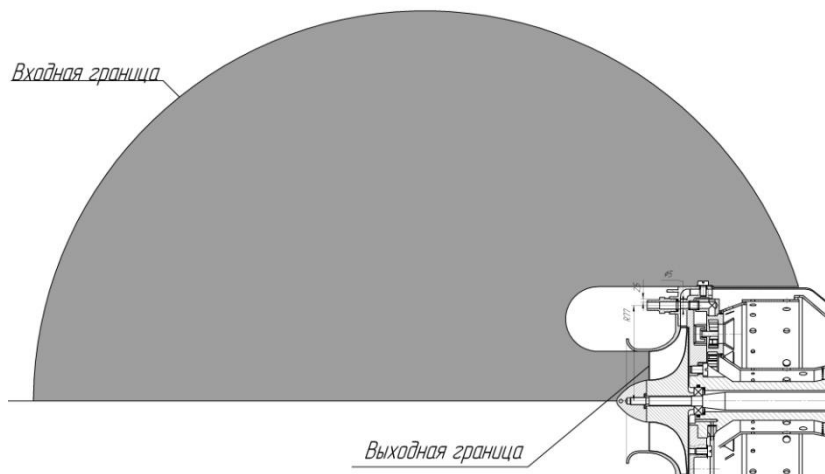


Рис. 3. Расчетная область при численном моделировании входного устройства

В ряде случаев, если не удастся добиться устойчивого решения при использовании описанного выше сочетания граничных условий, можно применять условия, изображенные на рис. 4.

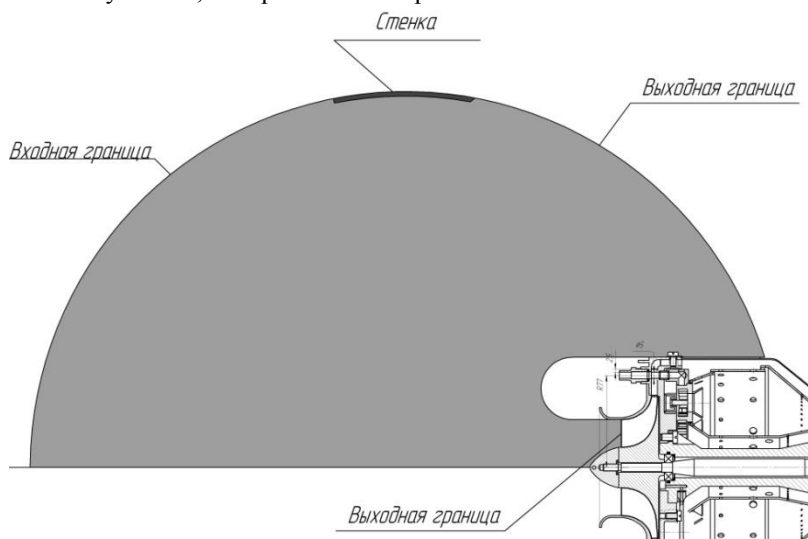


Рис. 4. Альтернативное сочетание граничных условий при моделировании входного устройства

2. ПОСТРОЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ ОБЛАСТИ

Шаг 1. Создание контура расчетной области

Поскольку расчетная область как входного, так и выходного устройства представляет собой осесимметричное тело, то для ее построения целесообразно построить контур меридионального сечения и затем получить требуемую форму вращением контура на периодический угол.

Построение контура расчетной области, а также построение трехмерной модели может осуществляться в любой CAD программе. В данном примере построение велось в программе «Компас».

При построении контуров расчетной области следует придерживаться ряда рекомендаций, позволяющих наиболее точно и правильно описать расчетную область на чертеже.

1. Расчетную область необходимо строить с помощью сплайнов, а не отрезков.
2. При построении формы контура по возможности следует избегать прямых углов.
3. Сплайны, описывающие форму контура расчетной области, должны содержать как можно меньше число точек (рис. 5). Это позволит избежать дальнейших проблем при генерации сетки конечных элементов и проведении расчетов. Тем не менее, число точек должно быть достаточным для описания геометрии канала без искажения.
4. Входные границы могут быть заданы двумя способами. Первый способ – это построение границы перпендикулярно оси двигателя (рис. 6,а). Второй способ – это задание границы под некоторым углом к меридиональным обводам (рис. 6,б).

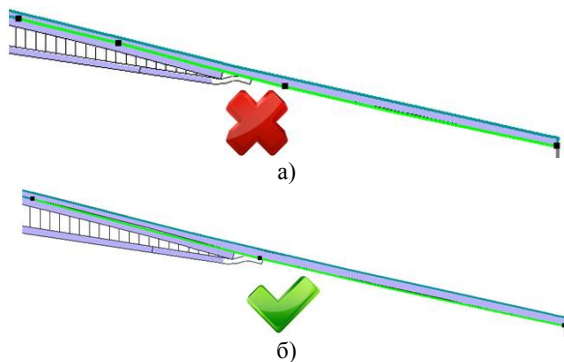


Рис. 5 Описание расчетной области: неверное (а); верное (б).

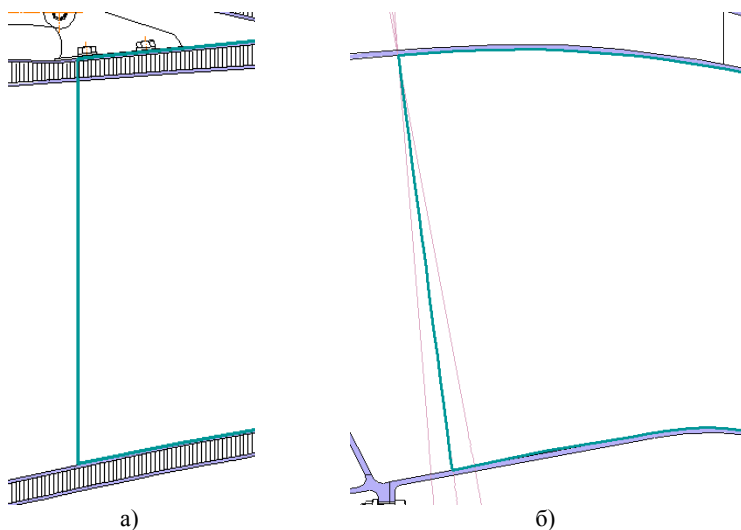
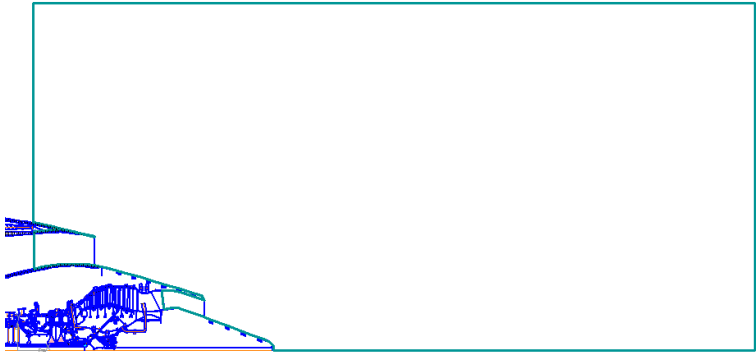
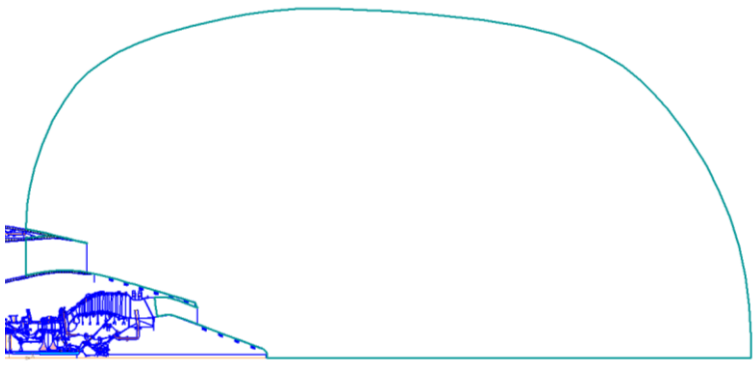


Рис. 6. Способы задание входных границ

5. Обычно выходная расчетная область строится прямоугольной формы с помощью отрезков (рис. 7,а). Однако для более корректного моделирования правильнее задавать выходную область с помощью тех же сплайнов и избегать прямых углов (рис. 7,б).
6. Размеры выходной области должны быть таковыми, чтобы высота расчетной области составляет не менее двух диаметров сопла наружного контура, а ширина не менее пяти диаметров (рис. 8).



а)



б)

Рис. 7. Варианты формы выходной области

Входная область для расчетной модели входного устройства строится по тем же рекомендациям, что и выходная область сопла.

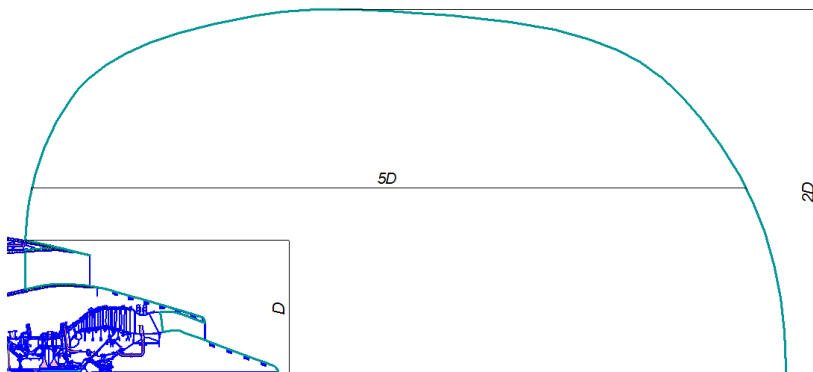



Рис. 8. Размеры выходной области

Шаг 2. Построение трехмерной модели сопла

Контур расчетной области, созданный на предыдущем шаге, состоит из отдельных сплайнов. Это неприемлемо для создания трехмерной модели. Прежде всего, необходимо объединить отдельные сплайны в единый контур. Для удобства работы необходимо скопировать обрисованный контур сопла на отдельный рабочий лист с привязкой к началу системы координат.

Объединение контура сопла происходит с помощью команды «Собрать контур» на панели инструментов «Геометрия» (1 на рис. 9). Далее с помощью ЛКМ  выбирается любой сплайн, и если между ним и соседними сплайнами нет разрыва, контур собирается в единое целое автоматически. При выполнении данной команды обязательно нужно выбрать опцию «Удалить исходные объекты» (2 на рис. 9). В результате выполнения команды, получается единый контур сечения меридионального сечения расчетной области (3 на рис. 9).

Шаг 3. Построение геометрии расчетной области путем вращения меридионального контура относительно оси двигателя

На этом этапе контур расчетной области нужно передать 3D модуль программы «Компас» (рис 10). Там для создания трехмерной модели сопла будет использована операция «Вращение», которая требует наличия в

эскизе оси вращения. Ее необходимо дорисовывать с помощью стандартной геометрической панели инструментов (рис. 11).

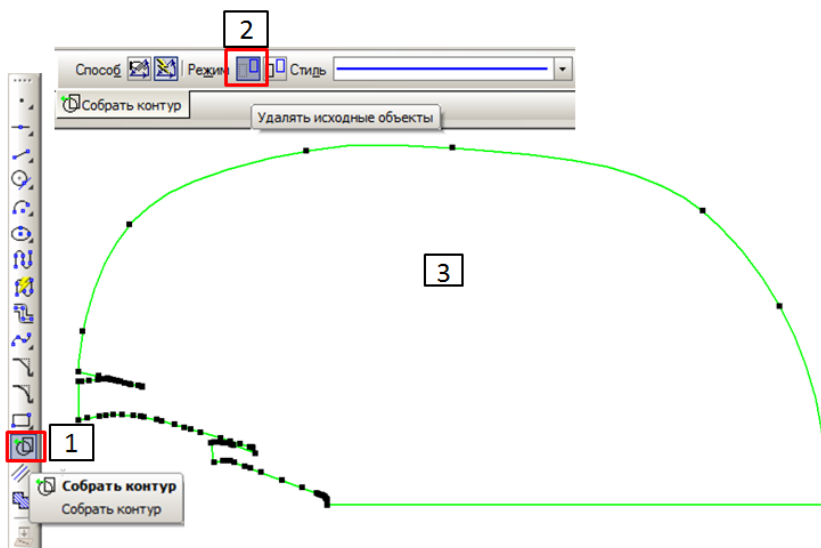


Рис. 9. Выполнение команды «Собрать контур» и ее результат

Процесс построения геометрии расчетной области путем вращения меридионального контура относительно оси двигателя выполняется согласно схеме приведенной на рис. 12. Поскольку сопло, приведенное в примере, не содержит в себе стоек, то периодический угол был выбран произвольным образом равным 20° . В случае если в проточной части сопла имеются z стоек, то периодический угол следует выбирать равным $360/z$.

В результате выполнения описанных выше действий получается трехмерная модель расчетной области для исследования рабочего процесса сопла (рис. 13).

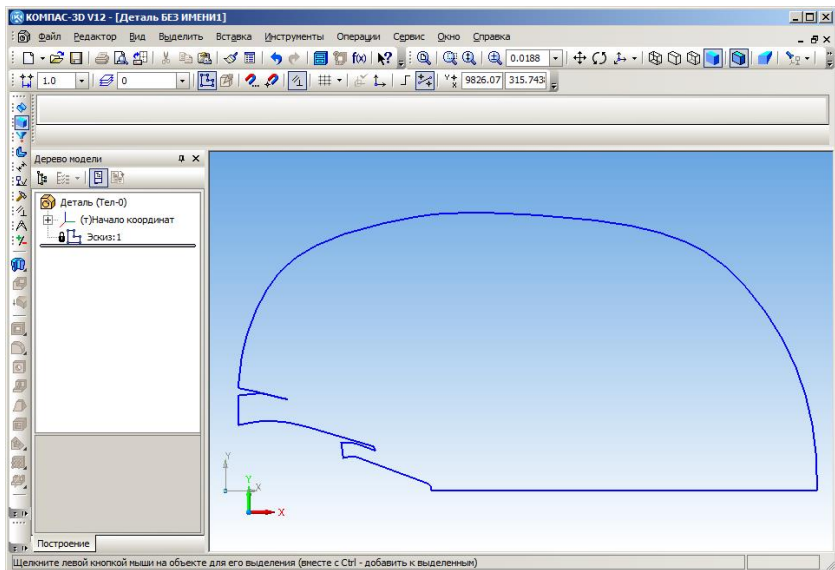


Рис. 10. Импорт контура в модуль «Компас 3D»

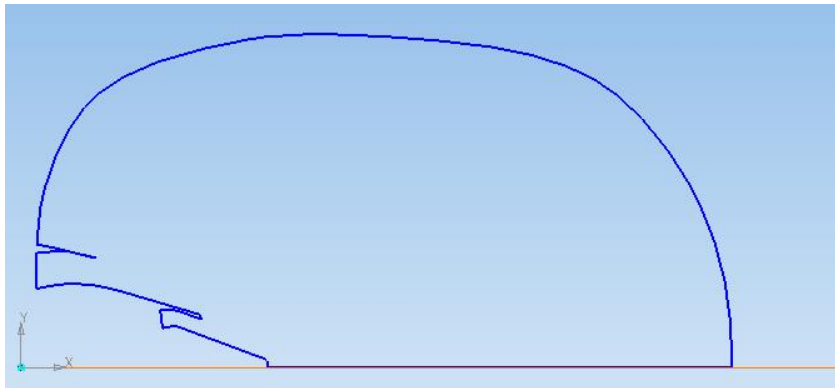


Рис. 11. Задание оси вращения контура

Для дальнейшей передачи в программу генерации сетки конечных элементов ее необходимо сохранить в универсальном формате *Parasolid* (*.x_t), как в наиболее удобном для дальнейшего импортирования в расчетные программы. После этого рабочее окно программы «Компас» можно закрыть.

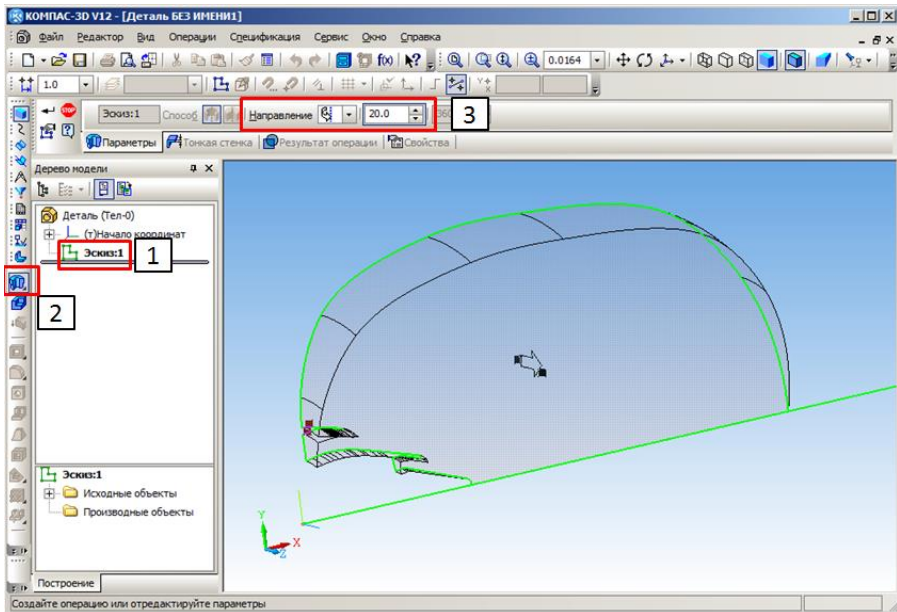


Рис. 12. Построение геометрии расчетной области путем вращения меридионального контура относительно оси двигателя

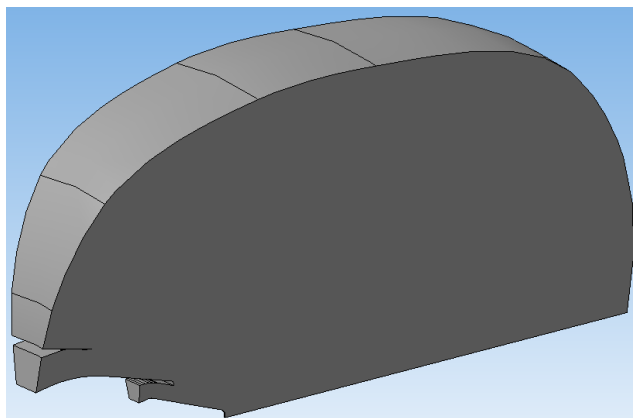


Рис. 13. Трехмерная модель исследуемого сопла

Дальнейшее исследование рабочего процесса в сопле происходит в программном комплексе *Ansys* под управление платформы *Workbench*.

Шаг 4. Создание нового проекта в программном комплексе Ansys Workbench

Программная оболочка Workbench запускается из меню «Пуск» ОС «Windows»:

Пуск → Программы → Ansys 14.5 → Workbench 14.5.

После этого появится рабочее окно программы, которое показано на рис. 14.

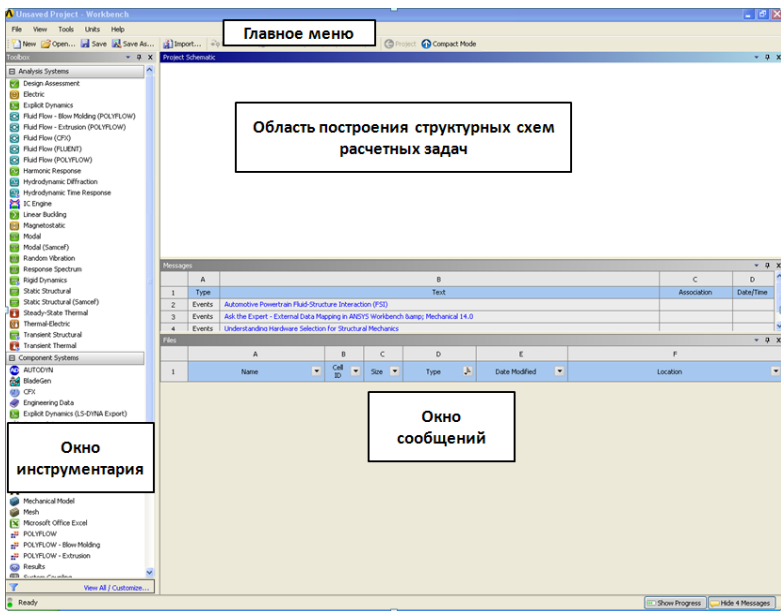


Рис. 14. Рабочее окно программы Workbench 14.5

Шаг 5. Присвоение имени новому проекту (модели)

Для задания имени нового проекта необходимо щелкнуть ЛКМ на кнопке **Save As...** в главном меню Ansys Workbench и в появившемся меню указать желаемое расположения проекта на диске компьютера и его имя. После выполнения описанных выше манипуляций, в указанном месте, будет создан управляющий файл с расширением *.wbj


и папка с тем же именем, куда будут записываться файлы, содержащие информацию об элементах проекта.

Важно помнить, что при необходимости перенести модель на другой компьютер следует копировать туда файл с расширением *.wbpj и одноименную папку.

Шаг 6. Выбор типа проводимого анализа

Для подключения модуля *Fluid Flow (CFX)* в котором будет проводиться исследование газодинамических характеристик исследуемого канала необходимо добавить соответствующий значок в область построения структурных схем *Ansys Workbench*. Для этого его необходимо найти в окне инструментария (рис. 14), нажать на данном пункте ЛКМ и, не отпуская кнопки мыши, перетащить элемент в один из зеленых прямоугольников, который появится в области построения структурных схем. Как только курсор достигнет одного из прямоугольников, его граница станет красной. Если в этот момент отпустить ЛКМ в данном прямоугольнике появится блок *Fluid Flow (CFX)* (рис 15). Созданный блок включает в себя все пункты, которые необходимы для проведения расчетного исследования: создание (импорт) геометрии (*Geometry*), формирование сетки конечных элементов (*Mesh*), настройки модели и решателя (*Setup*), решение (*Solution*), анализ результатов (*Results*).

Шаг 7. Импортирование трехмерной геометрической модели

Поскольку геометрическая модель уже была создана, то теперь необходимо ее импортировать в *Ansys Workbench* и отредактировать. Для этого двойным щелчком ЛКМ  на пункте *Geometry* запускается модуль *Design Modeler*. После открытия его рабочего окна (рис. 16) выбираются рабочие геометрические единицы измерения (в данном случае – миллиметры).

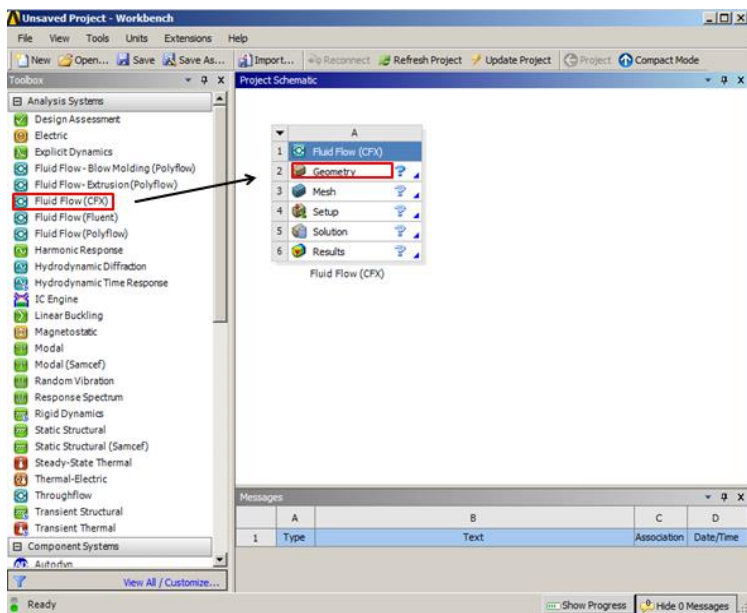


Рис. 15. Создание нового блока анализа в Workbench 14.5

Импортирование файла созданной ранее расчетной области производится с помощью команды (рис. 17):

File → *Import External Geometry File*

После нажатия кнопки *Generate*, в рабочем окне появляется изображение модели (рис. 18), а в дереве проекта зеленые галочки напротив пунктов *Import* и *1 Part, 1 Body*.

Внимание! *Ansys* является англоязычной программой и не примет никаких русских названий, а геометрическая модель создавалась в русскоязычной программе «Компас». Поэтому, если в дереве проекта раскрыть пункт *1 Part, 1 Body*, появляется русское название, например «Деталь». Во избежание проблем в дальнейшем, необходимо переименовать его с применением латинских букв или цифр. Для этого ПКМ выбирается пункт *Деталь* и в выпадающем меню выбирается пункт *Rename*, задается произвольное имя только латинскими буквами (рис. 19).

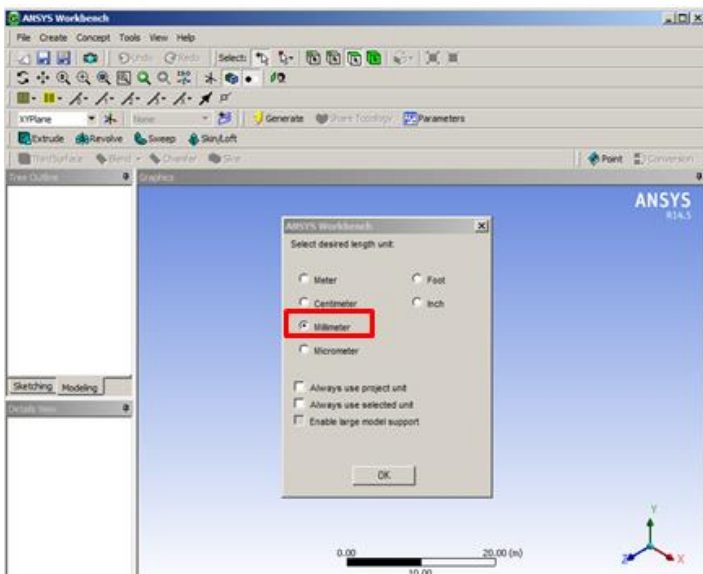


Рис. 16. Запуск модуля *Design Modeler*

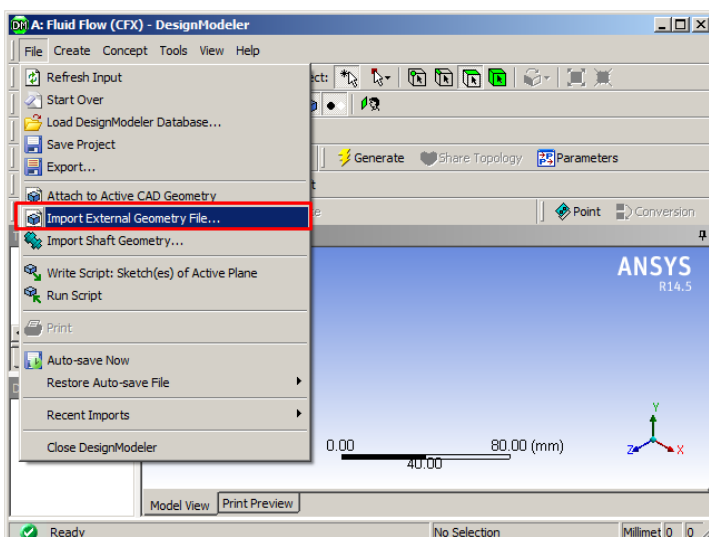


Рис. 17. Загрузка файла с геометрией сопла

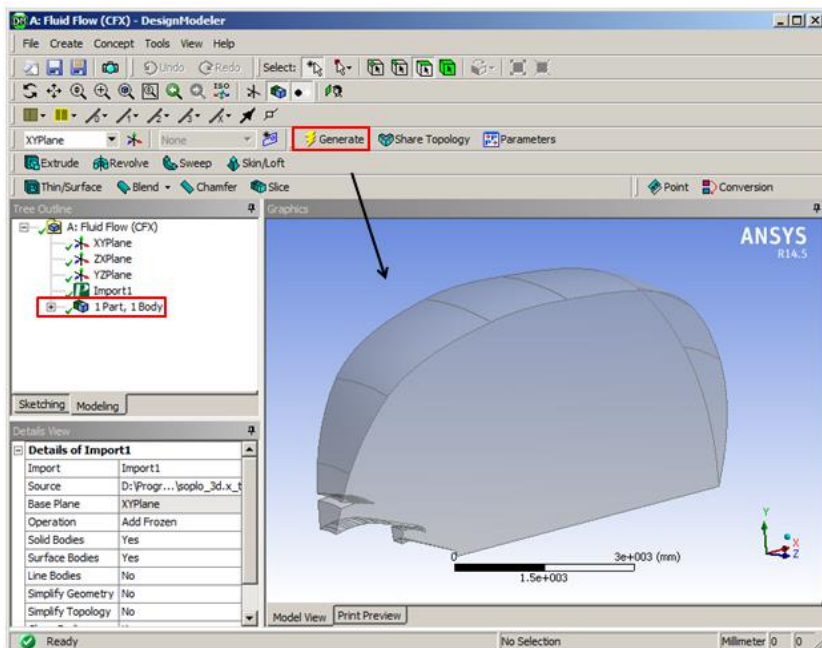


Рис. 18. Построение геометрической модели сопла после загрузки

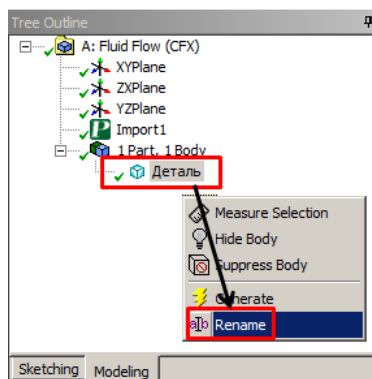


Рис. 19. Изменение имени геометрической модели

Шаг 8. Объединение поверхностей расчетной модели

Некоторые поверхности загруженной геометрической модели состоят из нескольких поверхностей (рис. 20). Это связано с тем, что при построе-

нии сплайнов контура было использовано большое количество точек. Чтобы избежать проблем при построении сетки конечных элементов, следует «сшить» эти части между собой при помощи команды *Merge*.

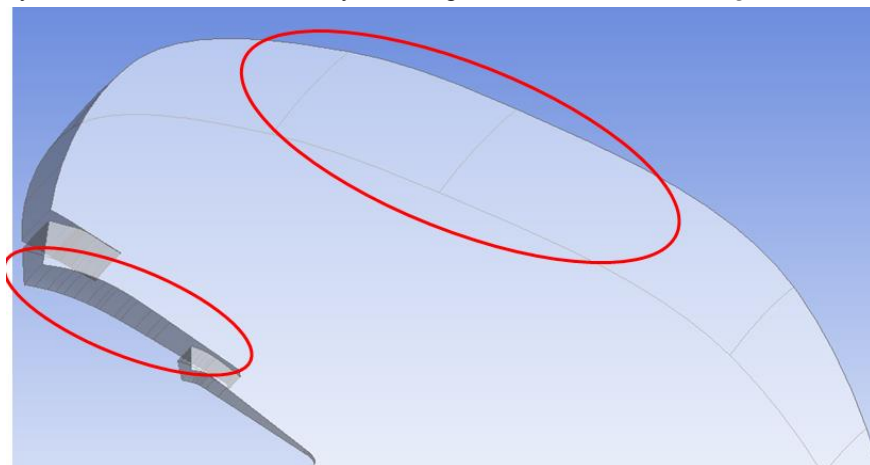


Рис. 20. Поверхности расчетной области, разбитые на части

Для объединения соседних поверхностей в одну следует выполнить следующие действия:

1. Выделяется любая из частей будущей объединенной поверхности, и затем в меню *Extend Selection* запускается команда *Extend to Limits* (рис. 21). Результатом ее выполнения станет выделение всех частей, относящихся к выбранной поверхности (рис. 22).
2. Далее в меню *Tools* выбирается команда *Merge*, а в меню *Details View* нажимается кнопка *Apply* (рис. 23).
3. Для запуска процесса объединения необходимо щелкнуть ПКМ на пункте *Merge* и в выпадающем меню выбрать пункт *Generate*. В результате несколько разрозненных поверхностей будут объединены в одну (рис. 24).

Описанную последовательность действий необходимо проделать для всех «разбитых» поверхностей. В результате получается модель, показанная на рис. 25.

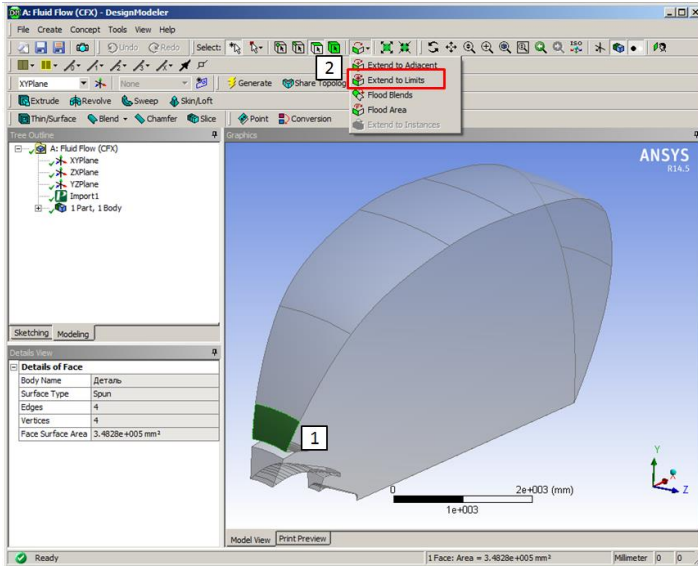


Рис. 21. Выделение части будущей объединенной поверхности

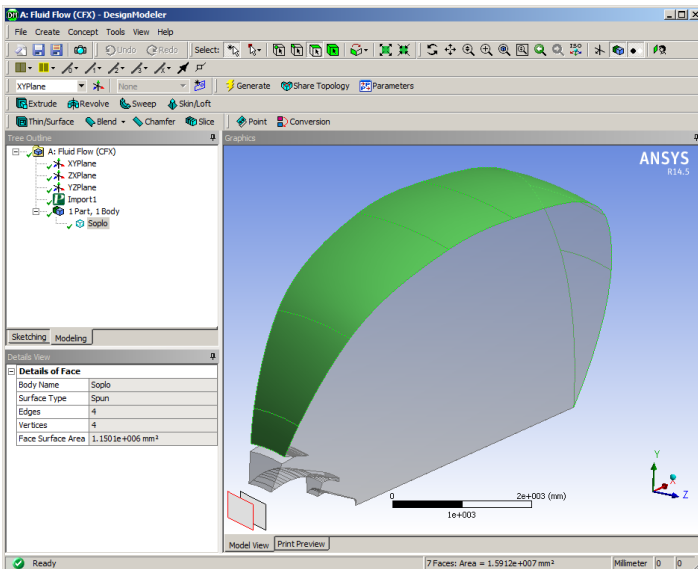


Рис. 22. Выбранные поверхности, которые будут входить в объединенную поверхность

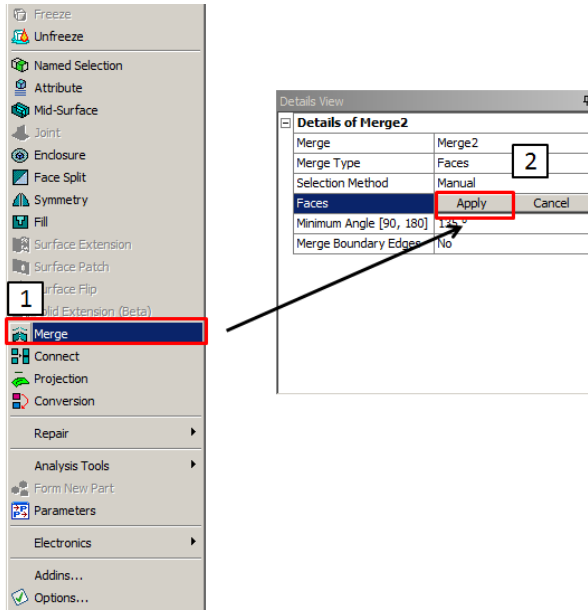


Рис. 23. Запуск команды Merge

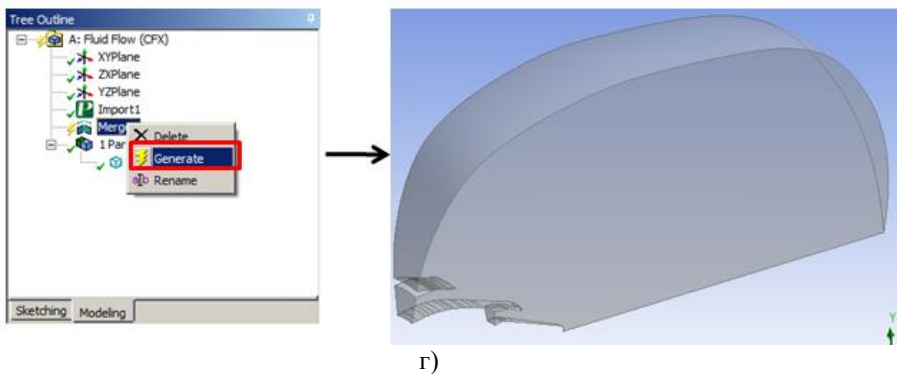


Рис. 24. Объединение разрозненных поверхностей в одну

После этого окно программы *Design Modeler* можно закрыть. А в блоке анализа напротив пункта *Geometry* появится зеленая галочка, свидетельствующая о заданной геометрии (рис. 26).

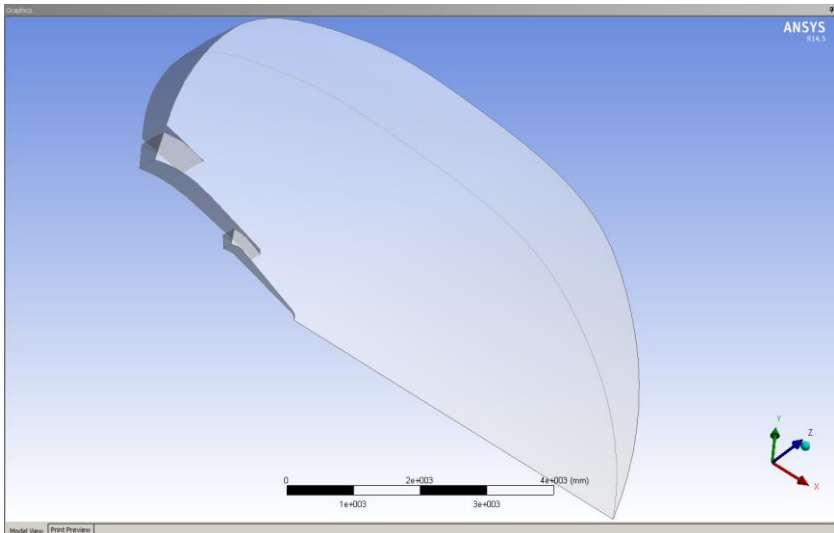


Рис. 25. Окончательный вид трехмерной геометрической модели расчетной области

A	
1	Fluid Flow (CFX)
2	Geometry ✓
3	Mesh ↙
4	Setup ?
5	Solution ?
6	Results ?

Fluid Flow (CFX)

Рис. 26. Обозначение заданной геометрии в блоке анализа

3. РАЗБИЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ ОБЛАСТИ СЕТКОЙ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Шаг 9. Запуск программы генерации сетки конечных элементов

Для построения сетки конечных элементов необходимо двойным щелчком ЛКМ на пункте *Mesh* запустить программу *Meshing* (рис. 15 и 26).

В результате откроется рабочее окно программы с уже загруженной геометрией, созданной в разделе 2 (рис. 27).

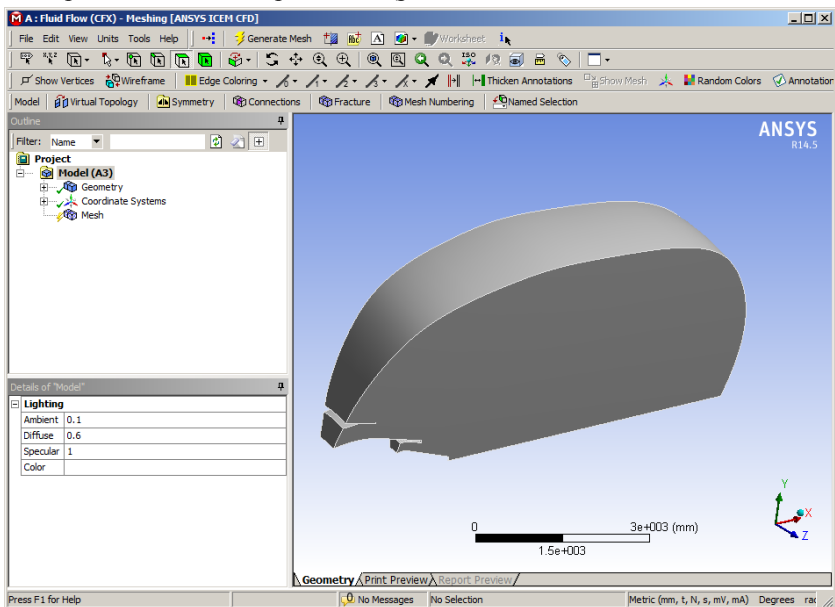


Рис. 27. Окно программы *Meshing* с загруженной в нее геометрией расчетной области

Перед началом работы в программе необходимо убедиться, что выбрана метрическая система единиц измерения с заданием размеров в миллиметрах (рис. 28). Она наиболее удобна для задания параметров сетки в элементах ГТД.

Шаг 10. Генерация сетки конечных элементов

Для разбиения созданной расчетной области неструктурированной сеткой конечных элементов с призматическим подслоем необходимо выполнить следующие действия:

1. Провести предварительное разбиение расчетной области неструктурированной сеткой конечных элементов с параметрами указанными на рис. 29. Результат построения приведен на рис. 30.

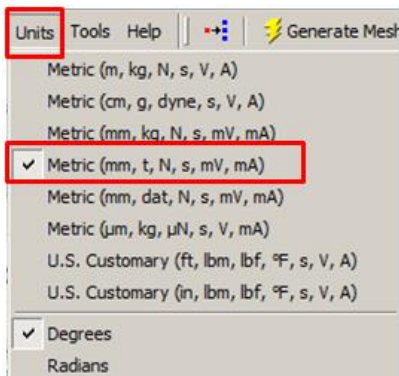


Рис. 28. Уточнение системы измерения

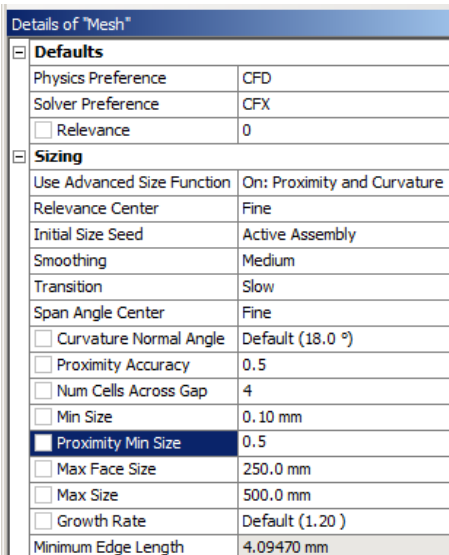


Рис. 29. Параметры предварительной неструктурированной сетки конечных элементов

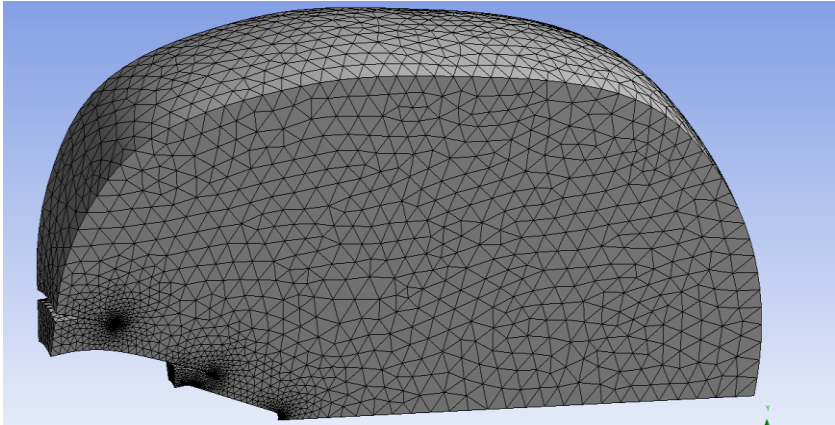


Рис. 30. Предварительная неструктурированная сетка конечных элементов

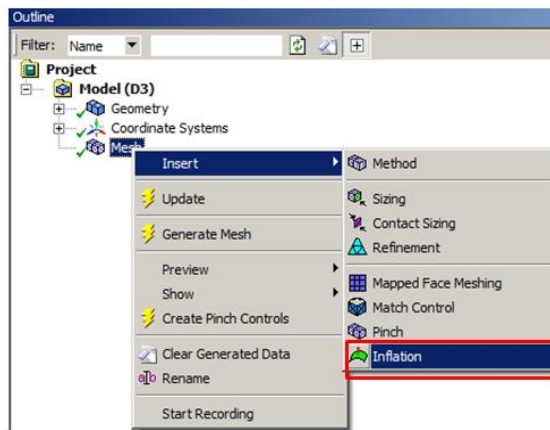


Рис. 31. Запуск команды *Inflation*

2. С помощью инструмента *Inflation*, который можно вызвать нажатием ПКМ на пункте *Mesh* в дереве проекта (рис. 31), в местах образования пограничного слоя на поверхности канала строится структурная сетка на основе призматических элементов. Для этого необходимо задать геометрию, для которой будет вводиться сгущение (*Geometry*) и границы (*Boundary*), как показано на рис. 32. В качестве геометрии выбирается вся трехмерная модель расчетной

области, а в качестве границ – поверхности, соответствующие металлическим стенкам канала проточной части сопла (рис. 32). Выбор нескольких поверхностей осуществляется с помощью ЛКМ с зажатой клавишей *Ctrl*. Выбор подтверждается нажатие кнопки *Apply*. Параметры сгущения показаны на рис. 33. После определения всех параметров необходимо повторно сгенерировать сетку, нажав кнопку *Update*. Результат построения неструктурированной сетки конечных элементов с призматическим подслоем показан на рис. 34.

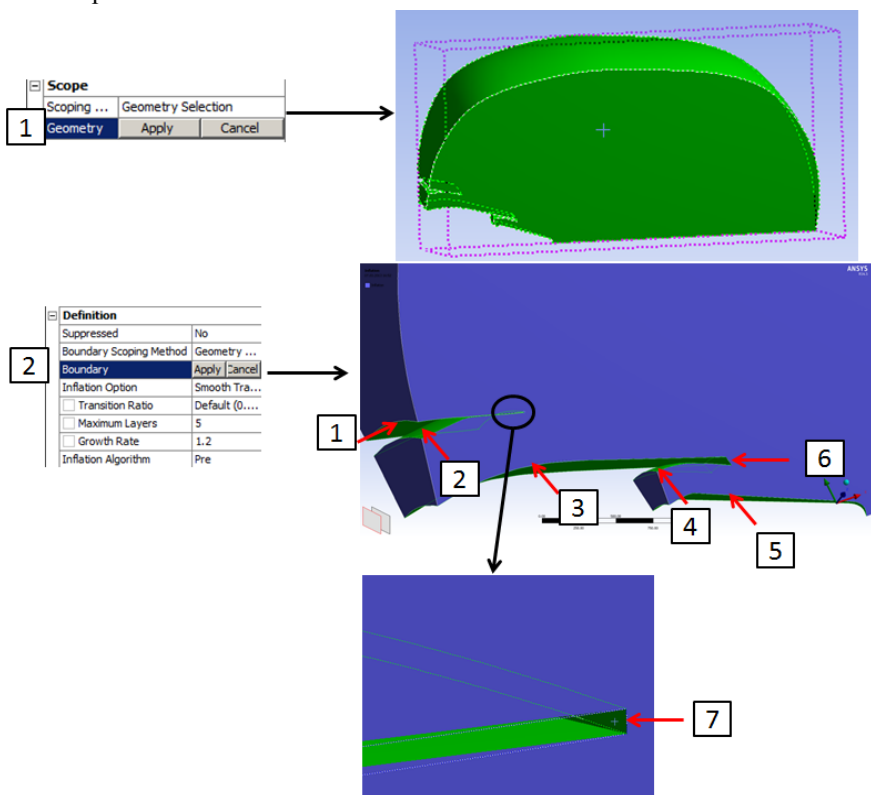


Рис. 32. Задание сгущения с помощью инструмента *Inflation*

Details of "Inflation" - Inflation	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
Definition	
Suppressed	No
Boundary Scoping Method	Geometry Selection
Boundary	5 Faces
Inflation Option	First Layer Thickness
<input type="checkbox"/> First Layer Height	1. mm
<input type="checkbox"/> Maximum Layers	10
<input type="checkbox"/> Growth Rate	1.2
Inflation Algorithm	Pre

Рис. 33. Параметры сгущения сетки

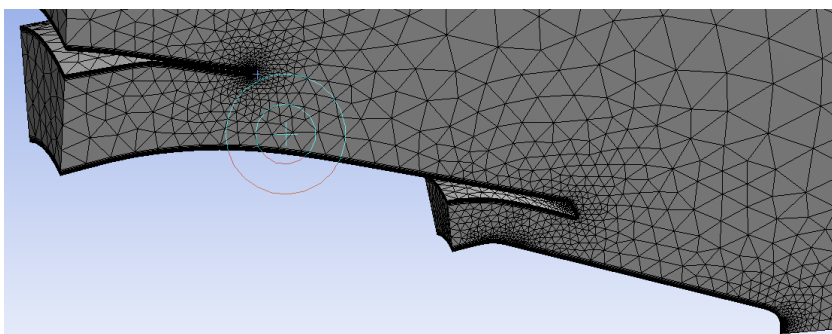


Рис. 34. Результат работы команды *Inflation*

- Для повышения достоверности моделирования необходимо, чтобы каждая грань сечения расчетной области была разбита не менее чем на 5 элементов. В случае если данные элементы имеют относительно небольшие размеры как входные кромки лопаток, или стенки у выходной кромки сопла (поверхности 6 и 7 на рис. 32), то на них может прийти меньшее число элементов. По этой причине, на таких участках сетку конечных элементов следует сгустить. Для этого используется инструмент *Sizing* (рис. 35). Вначале выбирается поверхность 6 и для нее вводятся параметры, указанные на рис. 36. Аналогичные действия следует выполнить и для других аналогичных мест (например, для поверхности 7 (рис. 32)).

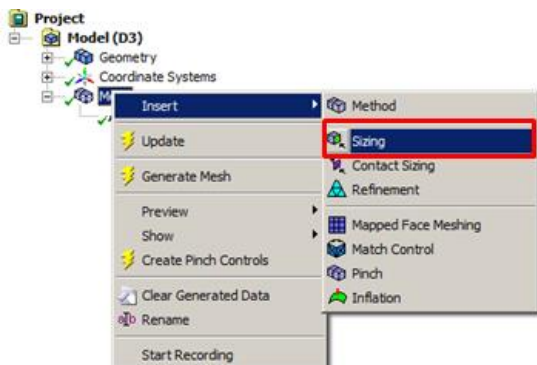


Рис. 35. Инструмент Sizing

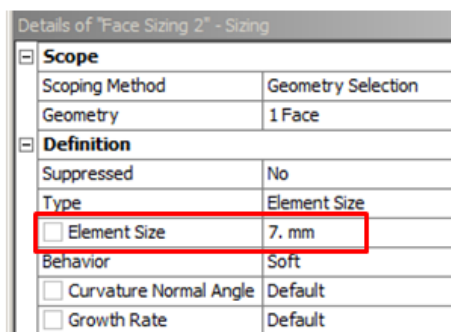


Рис. 36. Параметры измельчения сетки для поверхности 6

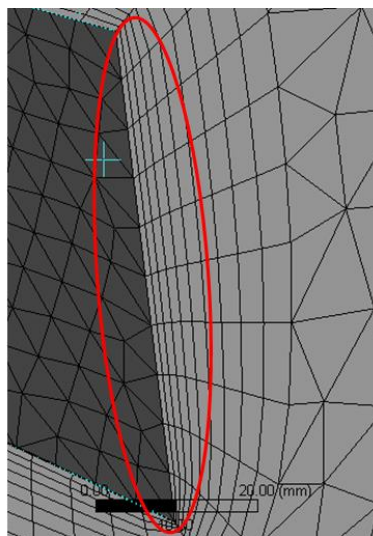


Рис. 37. Результат действия инструмента Sizing

Примечание. Размер элементов (*Element Size*) для этой поверхности равный 7 мм выбирается исходя из размеров данной поверхности, таким образом, чтобы по высоте было примерно 10 элементов (рис. 37).

После действий, описанных в пункте 3, необходимо заново сгенерировать сетку, нажав *Update*. Окончательный вариант сетки конечных элементов показан на рис. 38.

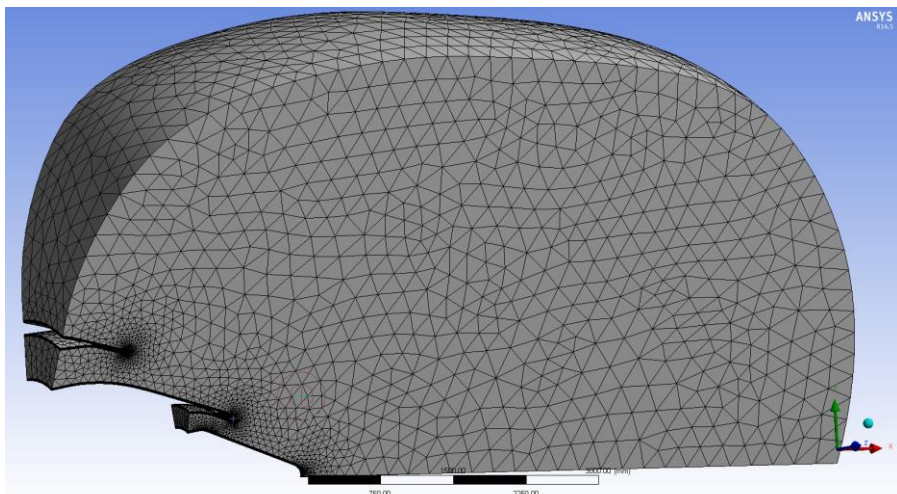


Рис. 38. Окончательный вид сетки конечных элементов

Теперь окно программы *Meshing* можно закрыть. В блоке анализа напротив пункта *Mesh* появится зеленая галочка, свидетельствующая о построенной сетке конечных элементов (рис. 39).

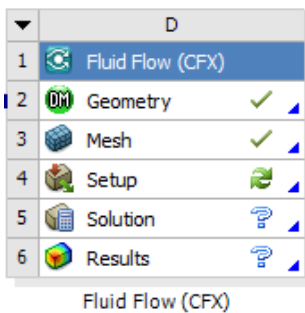


Рис. 39. Обозначение построенной сетки в блоке анализа

4. СОЗДАНИЕ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ ПОТОКА ГАЗА В СОПЛЕ

Шаг 11. Запуск программы Ansys CFX – Pre

Для построения расчетной модели рабочего процесса в исследуемом канале на базе созданной ранее сеточной модели необходимо запустить программу *CFX-Pre* двойным щелчком ЛКМ на пункте *Setup* модуля *Fluid Flow (CFX)* в области построения мнемосхем *Ansys Workbench* (рис. 15 и 39).

В результате откроется рабочее окно программы (рис. 40) с автоматически загруженной сеткой конечных элементов. По умолчанию в дереве проекта указана одна расчетная область – домен - *Default Domain* (рис. 41). Для удобства дальнейшей работы можно переименовать его, нажав на него ПКМ, выбрав пункт *Rename* (рис. 41) и задав новое имя, например *Soplo*.

Шаг 12. Определение свойств расчетного домена

Для описания свойств домена, необходимо запусти соответствующее меню двойным нажатие по пункту домена (*Soplo*) в девере проекта. На вкладках *Basic Settings* и *Fluid Models* задаются параметры, указанные на рис. 42 и 43. Таким образом, указывается величина справочного давления, относительно которого измеряются величины давлений в расчете, подключается к расчету уравнение энергии и учитывается тепло вязкого трения. Задание параметров подтверждается нажатие кнопки *OK*.

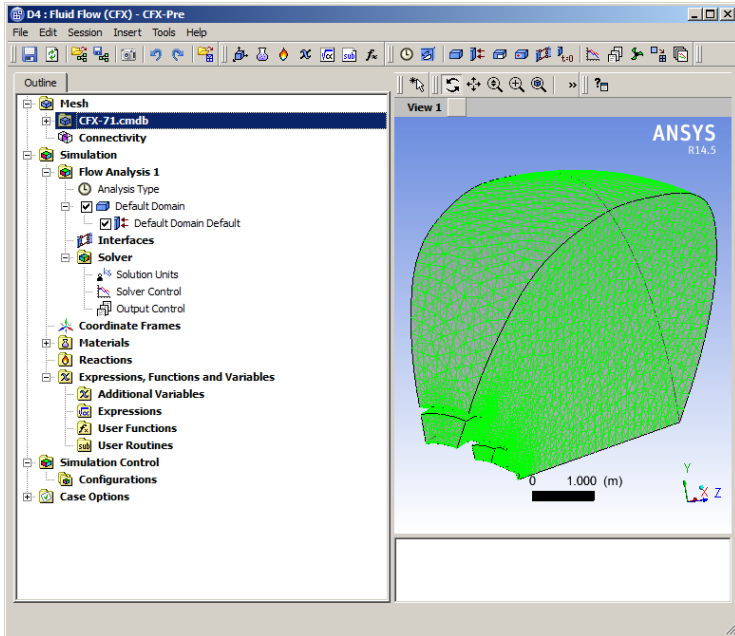


Рис. 40. Рабочее окно CFX-Pre

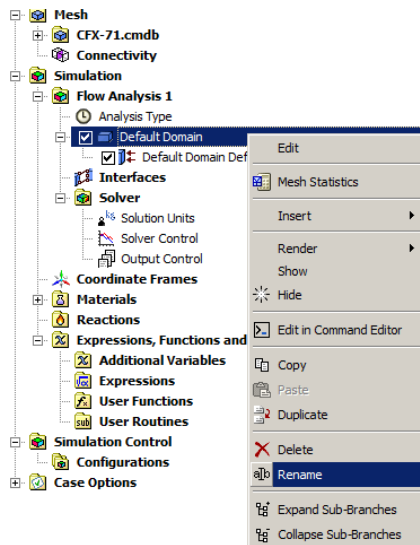


Рис. 41. Изменение имени домена

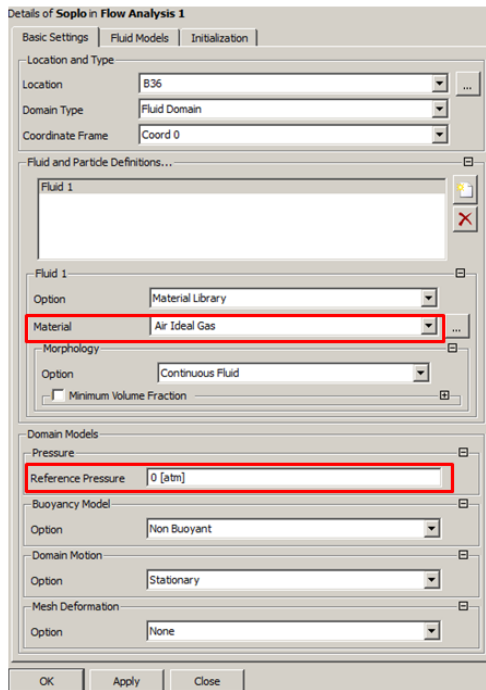


Рис. 42. Параметры на вкладке *Basic Settings*

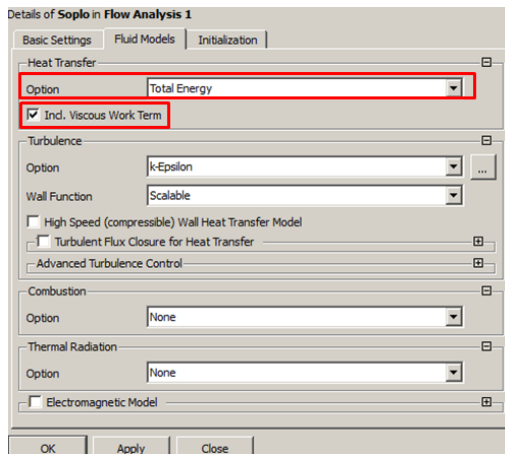


Рис. 43. Параметры на вкладке *Fluid Models*

Шаг 13. Задание входных и выходных граничных условий

В качестве граничных условий при исследовании рабочего процесса в сопле, как было указано в разделе 1, используются: величины полного давления и температуры на входе в расчетную область и статическое давление, равное атмосферному на границе присоединенного объема.

Для указания того, что на некоей поверхности будет установлено граничное условие, нужно воспользоваться командой: *Insert* → *Boundary* (рис. 44), вызываемой щелчком ПКМ на пункте домена (*Soplo*) в дереве проекта. После этого появится диалоговое окно, в котором следует ввести желаемое имя границы (рис. 45). Выбор поверхности, на которой будет находиться граница, осуществляется во вкладке *Basic Settings*, а численные значения параметров потока на вкладке *Boundary Details* (рис. 46).

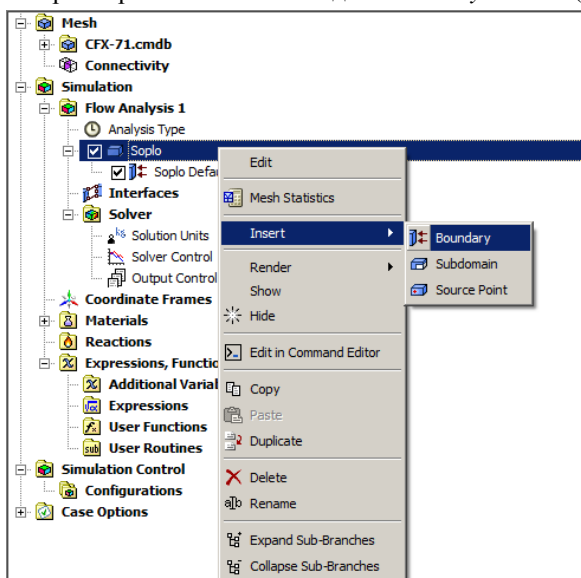


Рис. 44. Добавление новой границы в расчетную область

Местоположение и параметры для входных и выходной границы приведены ниже на рис. 47 и 48. Они выбираются из списка в открывшемся меню из списка в поле *Location*, во вкладке *Basic Settings*. В той же вкладке указывается тип граничного условия (*Inlet* для входа и *Opening* для выхода).

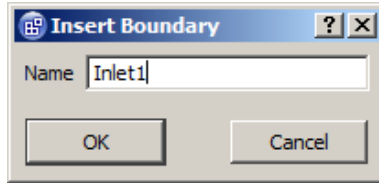


Рис. 45. Назначение имени границы

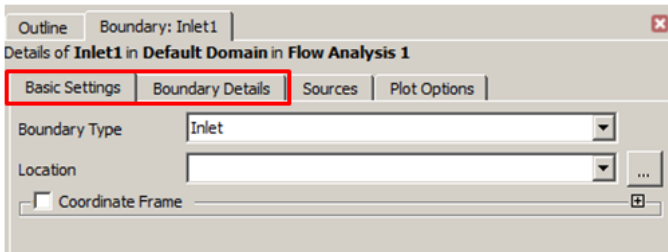


Рис. 46. Вкладки *Basic Settings* и *Boundary Details*

Затем необходимо перейти во вкладку *Boundary Details*, в которой следует указать, какие граничные условия применяются, и ввести их числовые значения. Для входного граничного условия в этой вкладке, в области *Mass And Momentum*, в поле *Option* указывается, что на данной границе задается полное давление *Total Pressure*, а в поле *Relative Pressure* – вводится его численное значение и при необходимости корректируются единицы измерения.

В области *Heat Transfer* в поле *Option* указывается, что на данной границе будет указана полная температура (*Total Temperature*) и в поле *Total Temperature* вводится ее численное значение (рис. 49 и 50). Задание указанных параметров подтверждается нажатием кнопки *OK*.

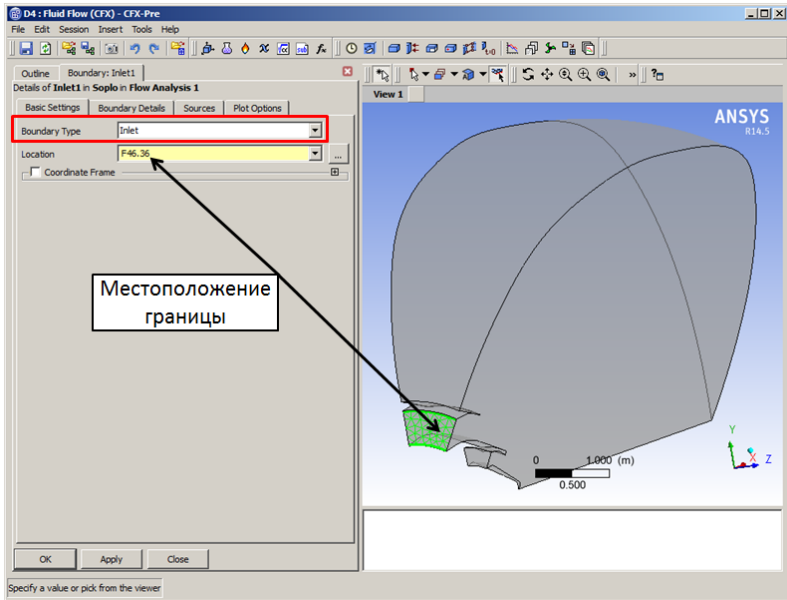


Рис. 47. Местоположение первой входной границы в тестовом сопле

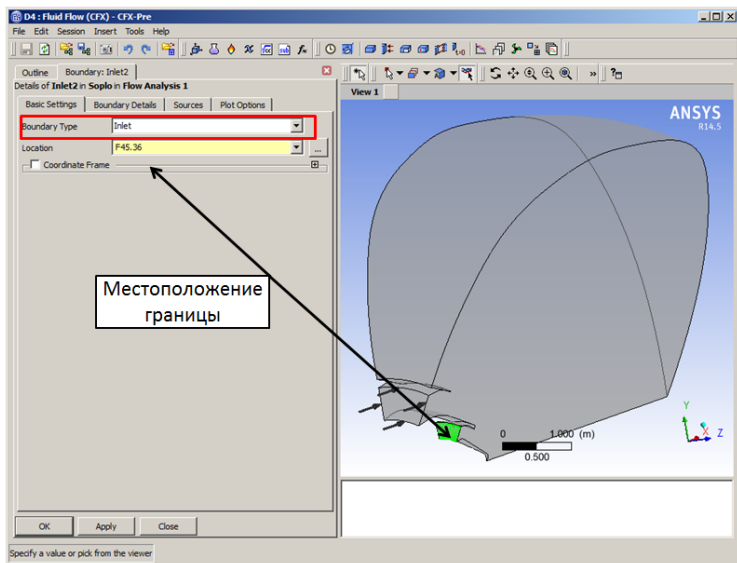


Рис. 48. Местоположение второй входной границы в тестовом сопле

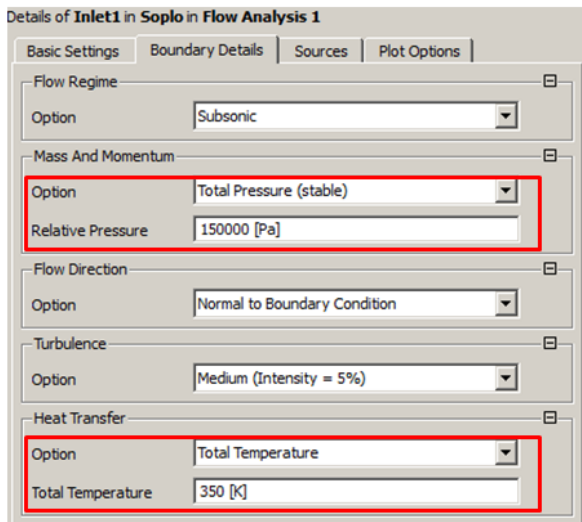


Рис. 49. Настройки первой входной границы для тестового сопла

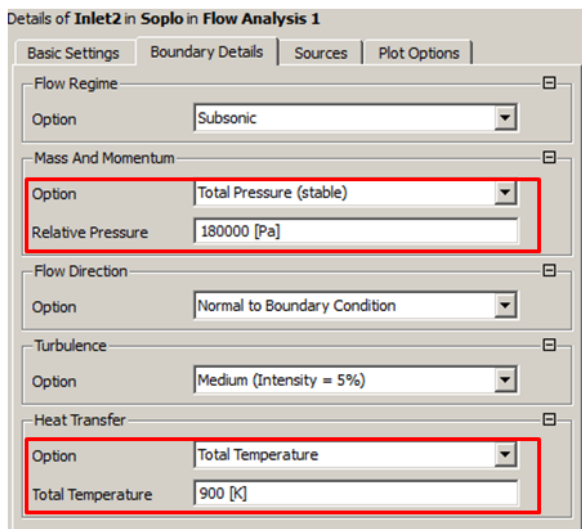


Рис. 50. Настройки второй входной границы для тестового сопла

Для выходного граничного условия (рис. 51) во вкладке *Boundary Details*, в области *Mass And Momentum*, в поле *Option* указывается, что на

данной границе задается статическое давление *Entertainment*, а в поле *Relative Pressure* –вводится его численное значение и при необходимости корректируются единицы измерения.

В области *Pressure Option* устанавливается условие *Opening*, что указывает на то, что рабочее тело может втекать внутрь расчетной области через данную границу.

В области *Heat Transfer* в поле *Option* указывается, что на данной границе будет указана статическая температура втекающего воздуха (*Opening Temperature*) и в поле *Opening Temperature* вводится ее численное значение равное атмосферным условиям (рис. 52). Задание указанных параметров подтверждается нажатием кнопки *OK*.

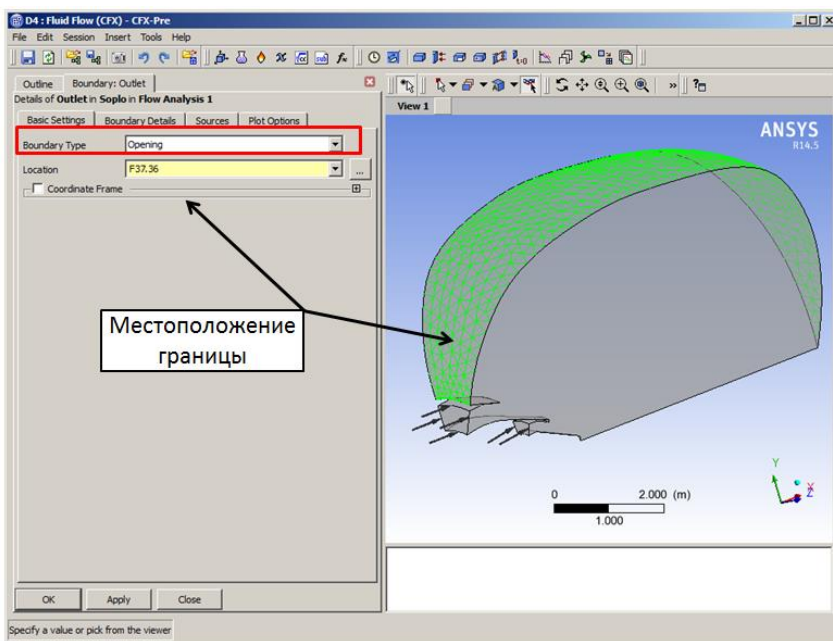


Рис. 51. Местоположение второй входной границы в тестовом сопле

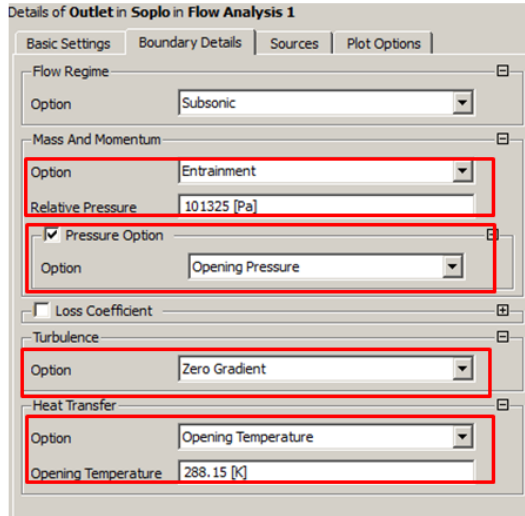


Рис. 52. Настройки выходной границы для тестового сопла

После описания входного и выходного граничных условий расчетная область будет иметь следующий вид (рис. 53).

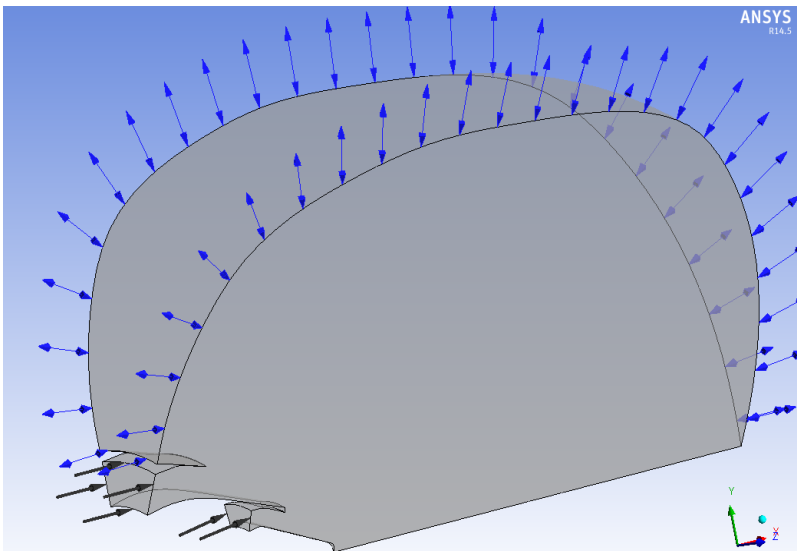


Рис. 53. Расчетная область с определенными входными и выходными граничными условиями

Шаг 14. Описание периодических границ

Поскольку расчетная модель представляет собой периодический сектор, то на его боковые границы наложить условие периодичности. Для этого добавляется новый интерфейс (рис. 54) нажатием ПКМ на пункте *Interfaces* в дереве проекта. Далее задаётся желаемое имя интерфейса или оставляется имя по умолчанию. Обычные настройки интерфейса для периодической границы показаны на рис. 55.

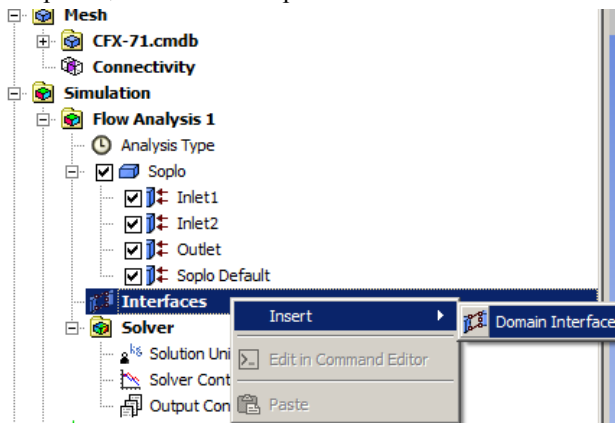


Рис. 54. Добавление нового интерфейса

Шаг 15. Задание свойств рабочего тела

На следующем этапе определяется, что в качестве рабочего тела используется воздух или продукты сгорания керосина (в зависимости от рабочего процесса, происходящего в исследуемом узле), подчиняющийся закону идеального газа, теплоемкость и вязкость которого изменяются в зависимости от температуры потока. Для этого необходимо выполнить следующие действия:

1. В дереве проекта, находящемся в левой части окна программы, в пункте *Materials* следует выбрать подпункт *Air Ideal Gas* (рабочее тело подчиняющееся закону идеального газа, выбранное ранее) (рис. 56) и дважды щелкнуть по нему ЛКМ. На экране появится вкладка *Basic Settings* задания свойств материала (рис. 56).

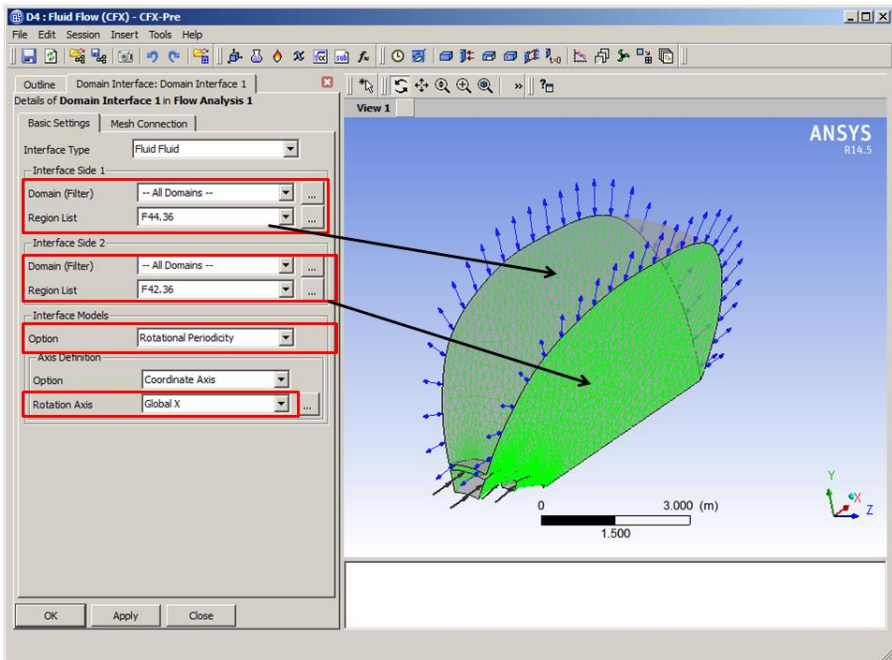


Рис. 55. Параметры интерфейса периодичности

2. Во вкладке *Basic Settings* в поле *Material Data* следует выбрать пункт *Air Data* (рис. 56).
3. Перейти во вкладку *Material Properties* (свойства материала).
4. Для того чтобы описать изменение теплоемкости, необходимо открыть вкладку *Thermodynamic Properties* (термодинамические свойства), нажав на плюс слева от названия. Значения, которые необходимо ввести в меню для воздуха и продуктов сгорания керосина, приведены в табл. 1 и 2.
5. Для того чтобы задать зависимость изменения вязкости от температуры по формуле Сатерленда, следует открыть вкладку *Transport Properties* в панели *Material Properties* и ввести следующие значения (в табл. 3 и 4 приведены настройки для воздуха и продуктов сгорания).
6. Для сохранения принятых изменений следует нажать *OK*.

Таблица 1

Настройка параметров во вкладке *Thermodynamic Properties* для описания зависимости теплоемкости воздуха от температуры

Параметр	Значение
<i>Equation of State</i> → <i>Option</i>	<i>Ideal Gas</i>
<i>Equation of State</i> → <i>Molar Mass</i>	28,96 [kgkmol ⁻¹] (кг ² /кмоль)
<i>Specific Heat Capacity</i>	<input checked="" type="checkbox"/>
<i>Specific Heat Capacity</i> → <i>Option</i>	<i>Zero Pressure Polynomial</i> Зависимость теплоемкости от температуры будет вводиться при помощи полинома ¹
<i>Specific Heat Capacity</i> > <i>a1</i>	3.559363
<i>Specific Heat Capacity</i> > <i>a2</i>	-0.000820022 [K ⁻¹]
<i>Specific Heat Capacity</i> > <i>a3</i>	2.20517e-06 [K ⁻²]
<i>Specific Heat Capacity</i> > <i>a4</i>	-9.70039e-10 [K ⁻³]
<i>Specific Heat Capacity</i> > <i>a5</i>	0 [K ⁻⁴]
<p>¹ Полином зависимости удельной теплоемкости при постоянном давлении c_p от температуры T в программе имеет следующий вид:</p> $\frac{c_p}{R} = a_1 + a_2T + a_3T^2 + a_4T^3 + a_5T^4, (*)$ <p>где $R = 8341 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$</p> <p>Таким образом, имеющиеся зависимости теплоемкости от температуры необходимо приводить к виду (*) и на основе этого находить значения коэффициентов a.</p>	

Настройка параметров во вкладке *Thermodynamic Properties* для описания зависимости теплоемкости продуктов сгорания керосина от температуры

Параметр	Значение
<i>Equation of State</i> → <i>Option</i>	<i>Ideal Gas</i>
<i>Equation of State</i> → <i>Molar Mass</i>	28,92 [kgkmol ⁻¹] (K ² /кмоль)
<i>Specific Heat Capacity</i>	<input checked="" type="checkbox"/>
<i>Specific Heat Capacity</i> → <i>Option</i>	<i>Zero Pressure Polynomial</i>
<i>Specific Heat Capacity</i> > a1	2.88417
<i>Specific Heat Capacity</i> > a2	0.001762783 [K ⁻¹]
<i>Specific Heat Capacity</i> > a3	-6.69704e-7 [K ⁻²]
<i>Specific Heat Capacity</i> > a4	9.51791e-11 [K ⁻³]
<i>Specific Heat Capacity</i> > a5	0 [K ⁻⁴]

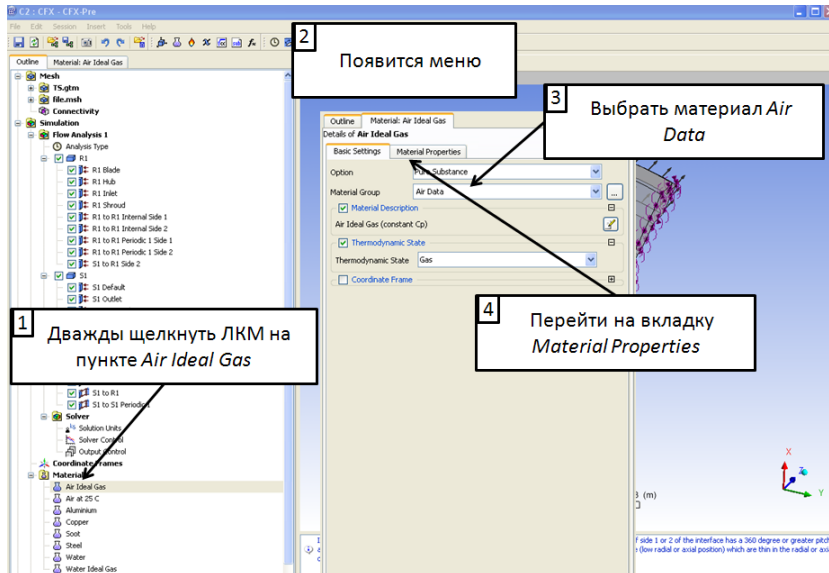


Рис. 56. Настройка свойств рабочего тела

Настройка параметров во вкладке *Transport Properties* для описания изменения вязкости воздуха по уравнению Сатерленда

Параметр	Значение
<i>Dynamic Viscosity</i>	<input checked="" type="checkbox"/>
<i>Dynamic Viscosity</i> → <i>Option</i>	<i>Sutherlands Formula</i> ¹
<i>Dynamic Viscosity</i> → <i>Ref. Temperature</i>	273 [K]
<i>Dynamic Viscosity</i> → <i>Reference Viscosity</i>	17.12e-6 [Pa s]
<i>Dynamic Viscosity</i> → <i>Sutherlands Constant</i>	111 [K]
<i>Dynamic Viscosity</i> → <i>Temperature Exp.</i>	1,5
¹ Формула Сатерленда в программе имеет следующий вид: $\frac{\mu}{\mu_0} = \frac{T_{ref} + S}{T + S} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^n$ где μ_0 – ссылочная вязкость (<i>Reference Viscosity</i>); S – постоянная Сатерленда (<i>Sutherlands Constant</i>); T_{ref} - ссылочная температура (<i>Ref.Temperature</i>); n – показатель степени (<i>Temperature Exp.</i>).	

Таблица 4

Настройка параметров во вкладке *Transport Properties* для описания изменения вязкости продуктов сгорания керосина по уравнению Сатерленда

Параметр	Значение
<i>Dynamic Viscosity</i>	<input checked="" type="checkbox"/>
<i>Dynamic Viscosity</i> → <i>Option</i>	<i>Sutherlands Formula</i>
<i>Dynamic Viscosity</i> → <i>Ref. Temperature</i>	273 [K]
<i>Dynamic Viscosity</i> → <i>Reference Viscosity</i>	1.49e-5 [Pa s]
<i>Dynamic Viscosity</i> → <i>Sutherlands Constant</i>	200 [K]
<i>Dynamic Viscosity</i> → <i>Temperature Exp.</i>	1,5

Шаг 16. Настройка параметров решателя

Прежде чем перейти к процессу решения необходимо сделать ряд настроек решателя программы *Ansys CFX*. Для этого нужно дважды щелкнуть ЛКМ на пункте *Solver Control*, и в появившемся меню сделать настройки, перечисленные ниже:

- убедиться, что в полях *Turbulence Numeric* и *Advection Scheme* выбран высокий порядок дискретизации уравнений потока и турбулентности (*High Resolution*) (рис. 57);
- указать максимальное число итераций процесса решения (*Max. Iterations*), не менее 500 (рис. 57);

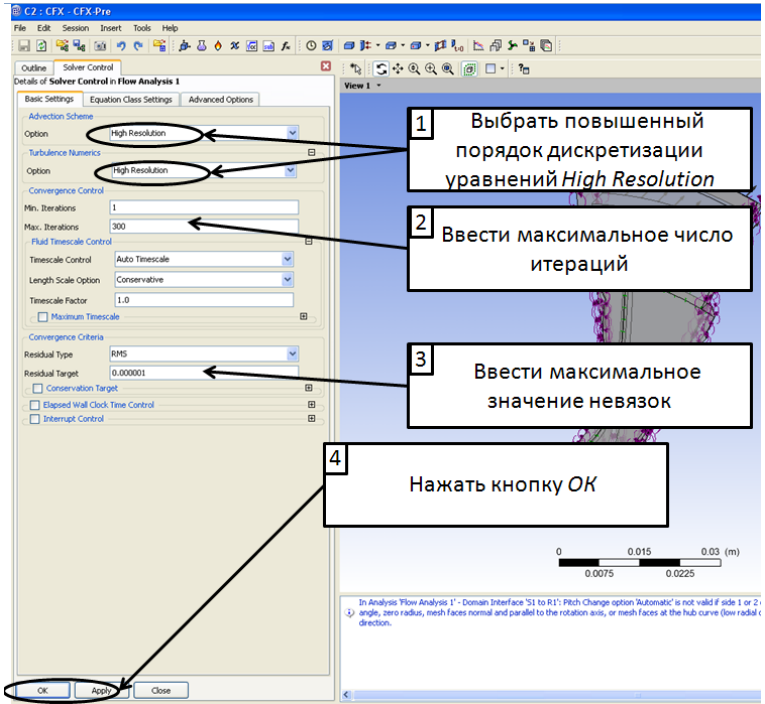


Рис. 57. Настройка параметров решателя

- в поле *Residual Target* назначить максимальную величину невязок равную $0,000001$ (рис. 57);
 - на данном этапе выбирается сравнительно низкий шаг по времени (*Timescale Factor*) равный $0,1$. Этого необходимо для того, чтобы задача могла сходиться на начальном этапе решение.
 - для сохранения принятых изменений следует нажать кнопку *OK*.
- Окончательный вид расчётной модели представлен на рис. 58. Теперь окно программы *CFX-Pre* можно закрыть. В блоке анализа напротив пунк-

та *Setup* появится зеленая галочка, свидетельствующая о созданной расчетной модели (рис. 59).

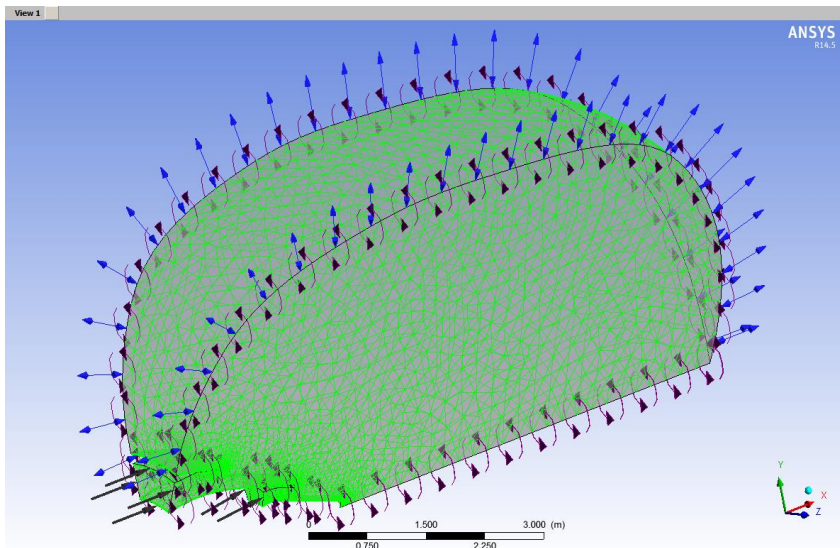


Рис. 58. Расчетная модель потока в сопле

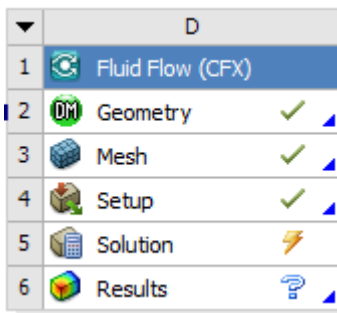


Рис. 59. Обозначение созданной расчетной модели в блоке анализа

5. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Шаг 17. Проведение расчета

Расчет течения с помощью созданной численной модели осуществляется в программе *Ansys CFX Solver*. Для ее запуска следует дважды щелкнуть ЛКМ на строке *Solution* подблока *CFX* в окне построения мнемосхем *Ansys Workbench*. В результате откроется окно программы, в котором нужно выполнить следующие действия (рис. 60):

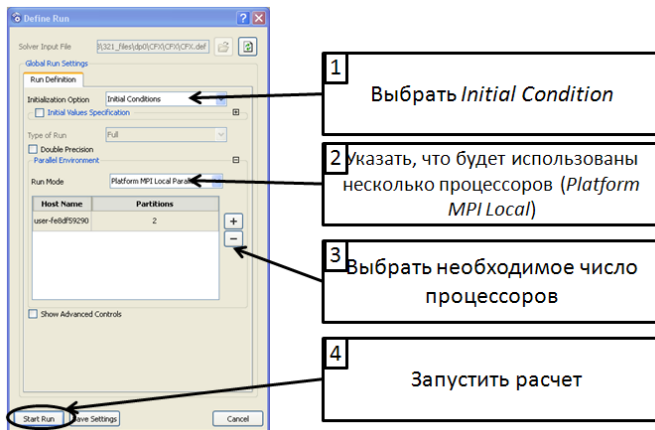


Рис. 60. Запуск процесса решения задачи

- в списке *Initialization Option* указать, что задача будет решаться с «чистого листа» (*Initial Condition*);
- в списке *Run Mode* указать, что задача будет решаться с применением нескольких процессоров одного компьютера (если используемый компьютер их имеет) (*Platform MPI Local Parallel*);

- с помощью кнопок «+» и «-» задать требуемое количество ядер для решения задачи;
- запустить процесс счета нажатием кнопки *Start Run*.

После этого запуститься процесс решения задачи и в окне программы *Ansys CFX Solver* будет отображаться изменение невязок в виде текстового файла и графиков (рис. 61).

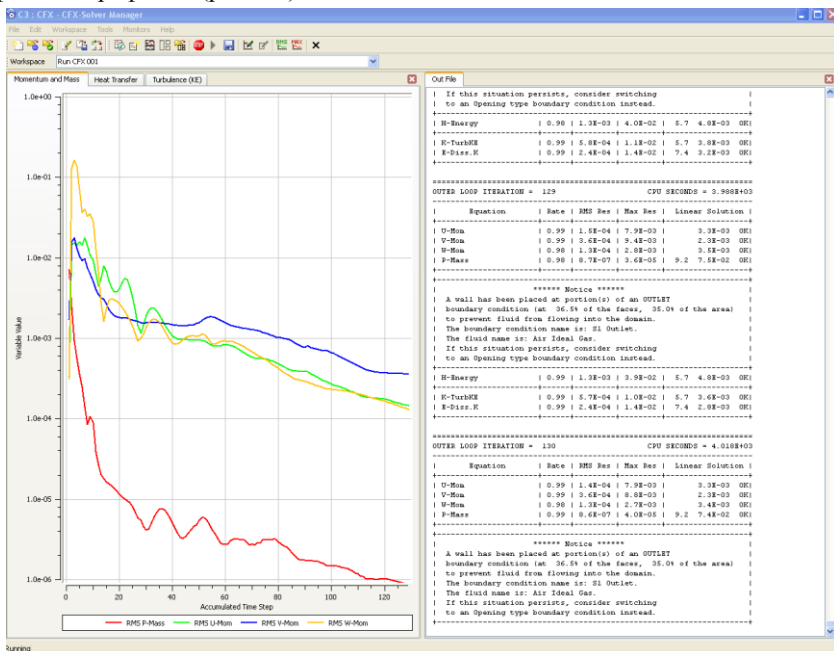


Рис. 61. Вид окна программы *Ansys CFX Solver* в процессе решения задачи

Шаг 18. Изменение шага по времени (*Timescale Factor*)

После того, как прошло несколько десятков итераций, и задача относительно установилась (невязки идут горизонтально как на рис. 62) можно повысить шаг по времени. Для этого необходимо вызвать меню динамического редактирования параметров нажатием ЛКМ на иконке



на панели инструментов. Программа запросит необходимость создания резервного (*backup*) файла (рис. 63), необходимо подтвердить и нажать кнопку *Yes*. В результате появится окно, изображенное на рис. 64. Двойным нажатием ЛКМ на пункте *Solver Control* → *Timescale Factor* вызывается окно редак-

тирования (*Edit Parameter*) и задается вводиться новое значение равное 1. Ввод подтверждается нажатием кнопки ОК. После этого необходимо сохранить измененные настройки, выбрав пункт *Save* в меню *File* (рис. 65). Теперь окно редактирования параметров можно закрыть.

В выходном файле программы отобразятся внесённые изменения (рис. 66).

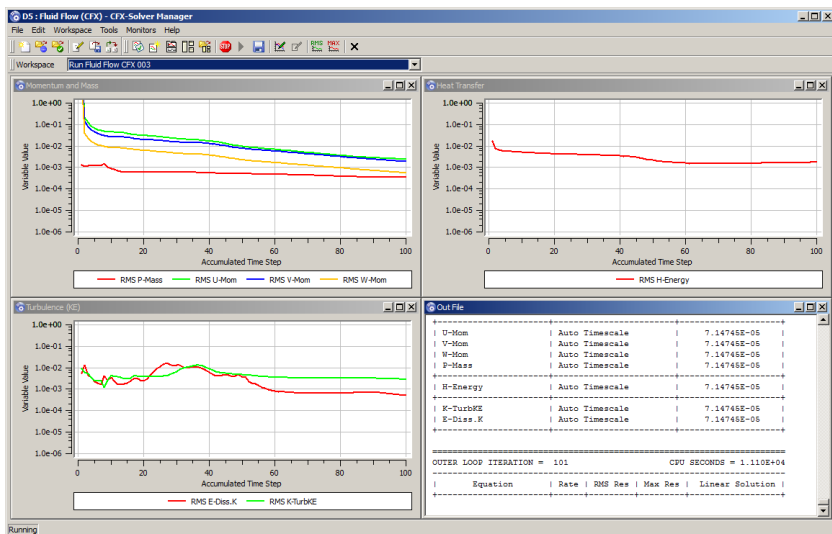


Рис. 62. Параметры решения установившейся задачи

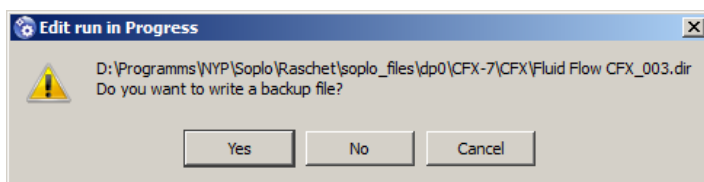


Рис. 63. Запрос на создание backup файла

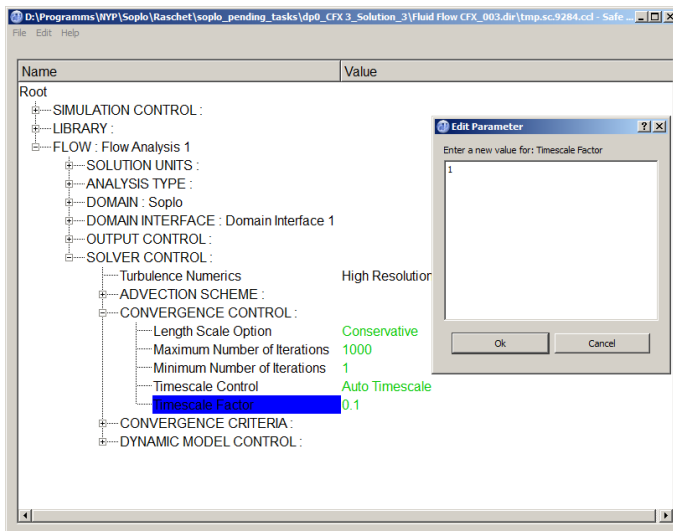


Рис. 64. Меню динамического редактирования параметров

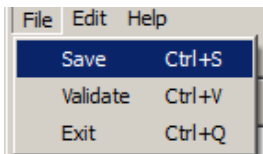


Рис. 65. Сохранение внесенных изменений

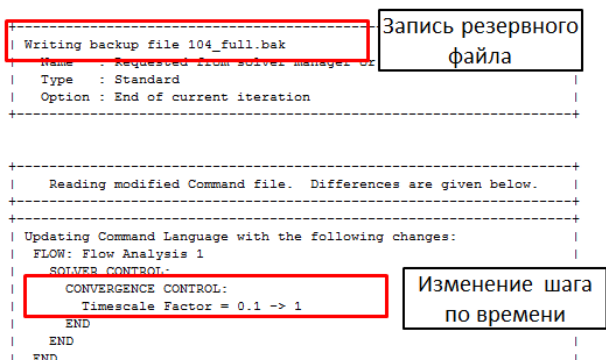



Рис. 66. Подтверждение изменения параметров в выходном файле

При необходимости в дальнейшем можно еще больше повысить шаг по времени, проделав вышеописанные действия.

Шаг 19. Окончание решения задачи

Процесс решения остановится автоматически в том случае, если будет выполнено максимальное число итераций, заданное при настройке параметров решателя, либо величины невязок для всех уравнений будут меньше заданного значения.

В случае необходимости процесс решения может быть остановлен нажатием кнопки  в верхнем меню.

После того, как решатель завершит свою работу, запишется файл результатов и выдаст об этом сообщение (рис. 67).

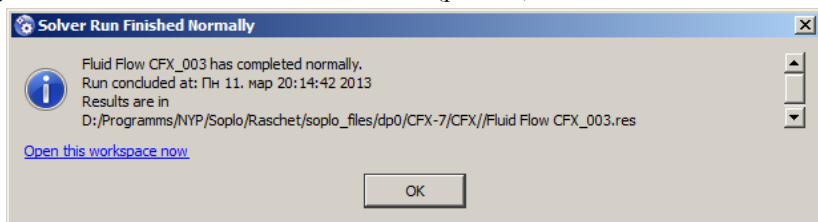


Рис. 67 Сообщение о завершении решения

Теперь окно программы *CFX-Solver Manager* можно закрыть. В блоке анализа напротив пункта *Solution* появится зеленая галочка, свидетельствующая о получении файла результатов (рис. 68).

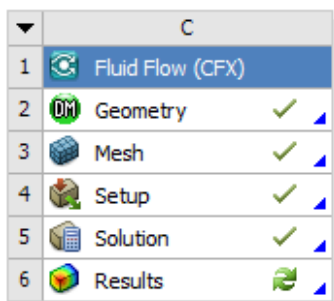



Рис. 68. Обозначение полученного файла результатов в блоке анализа

6. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для анализа результатов необходимо запустить программу *CFD-Post* двойным щелчком ЛКМ  по пункту *Results* (рис. 14). В результате откроется рабочее окно программы (рис. 69).

Анализ полученных результатов состоит из двух этапов: вывод полей распределения параметров потока, и оценка эффективности сопла.

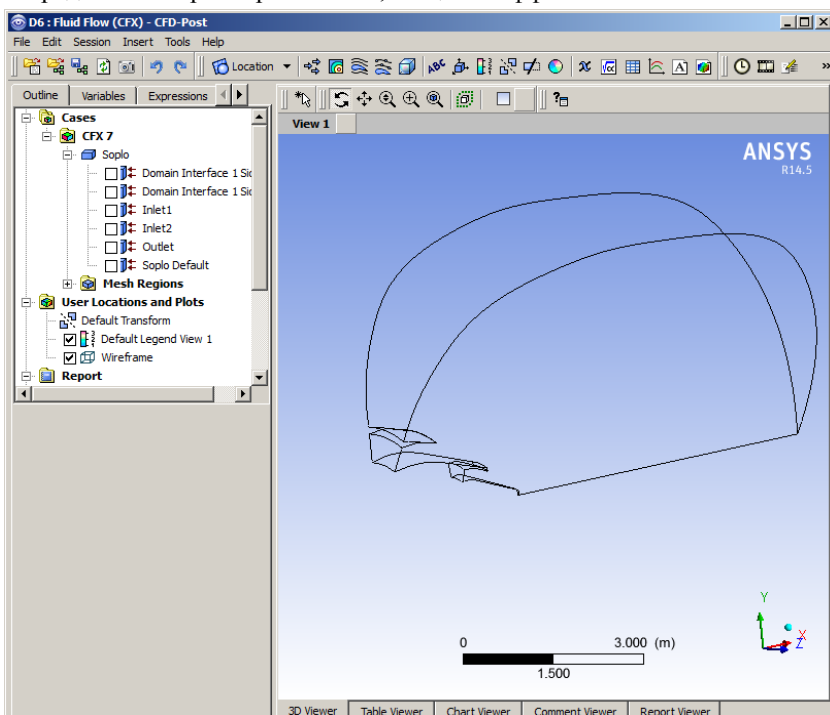


Рис. 69. Рабочее окно программы *CFD-Post*

Шаг 20. Вывод полей распределения параметров потока

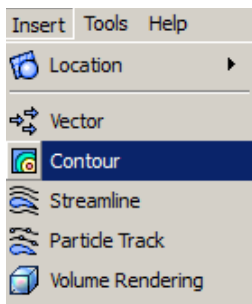


Рис. 70. Добавление нового контура

Поля распределения параметров выводятся при помощи команды *Insert* → *Contour* (рис. 70). После этого требуется ввести имя для нового контура или можно оставить его по умолчанию. Параметры нового контура приведены на рис. 71. В качестве полочки для создания контура (*Location*) используется одна из периодических границ модели. А в качестве рассматриваемой переменной (*Variable*) может использоваться

любой параметр из предлагаемого списка (таблица 5), в данном случае статическое давление (*Pressure*). Введённые данные подтверждаются нажатием кнопки *Apply*. Результат применения команды показан на рис. 72.

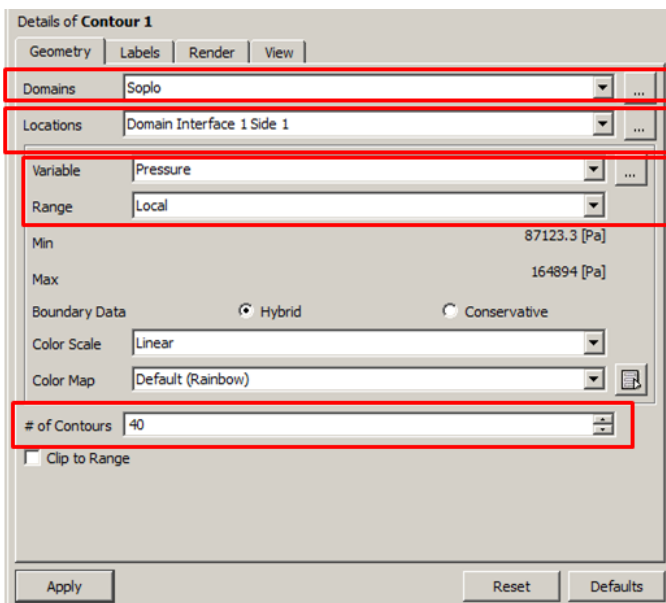


Рис. 71. Настройки отображения контура распределения статического давления

Таблица 5

Обозначение наиболее употребимых параметров потока в программе *Ansys CFX*

Переменная	Обозначение	Название в списке
Плотность	ρ	<i>Density</i>
Число Маха в текущей СК	M_w	<i>Mach Number</i>
Число Маха в стационарной СК	M	<i>Mach Number in Stn Frame</i>
Статическое давление	p	<i>Pressure</i>
Давление торможения в текущей СК	p_w^*	<i>Total Pressure</i>
Давление торможения в стационарной СК	p^*	<i>Total Pressure in Stn Frame</i>
Статическая температура	T	<i>Temperature</i>
Температура торможения в текущей СК	T_w^*	<i>Total Temperature</i>
Температура торможения в стационарной СК	T^*	<i>Total Temperature in Stn Frame</i>
Скорость в текущей СК	w	<i>Velocity</i>
Скорость потока в неподвижной СК	c	<i>Velocity in Stn Frame</i>

Шаг 21. Вывод линий тока

Аналогично происходит отображение линий тока потока. Для этого используется команда *Insert* → *Streamline* (рис. 70). Параметры линий тока приведены на рис. 73. Если для первых линий тока (*Streamline 1*) задать стартовую границу (*Start From*) *Inlet1*, а для *Streamline 2* – *Inlet2*, получится картина, показанная на рис. 74.

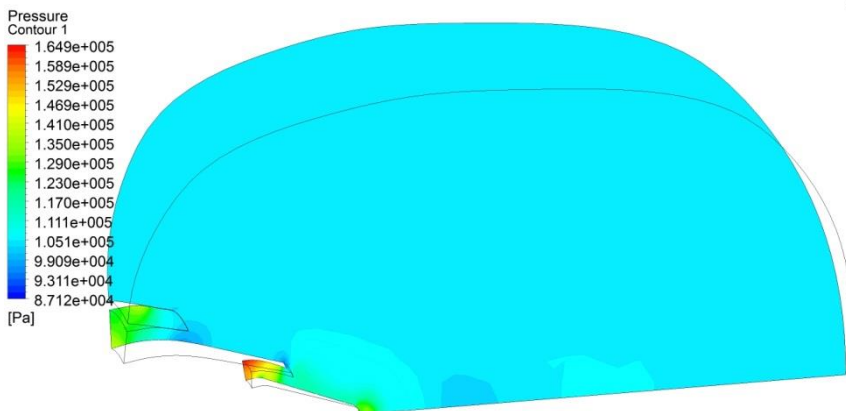


Рис. 72. Поля распределения статического давления

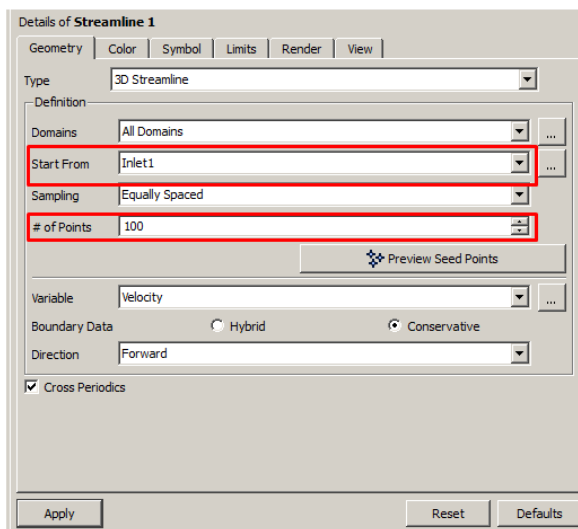


Рис. 73. Параметры отображения линий тока

Также ниже на рис. 75...78 приведены поля распределения других параметров потока: полного давления, статической и полной температуры, абсолютной скорости и линий тока.

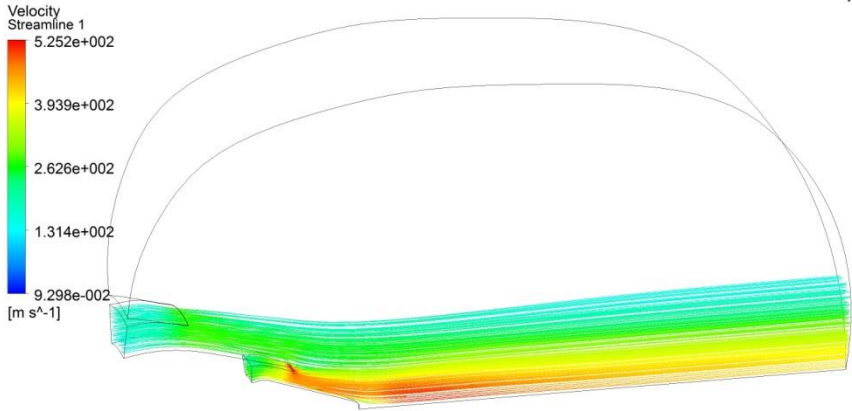


Рис. 74. Линии тока в сопле

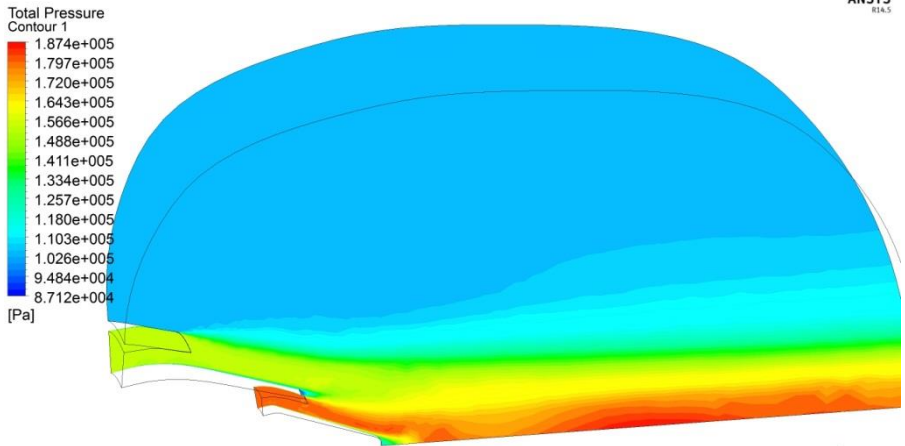


Рис. 75. Поля распределения полного давления

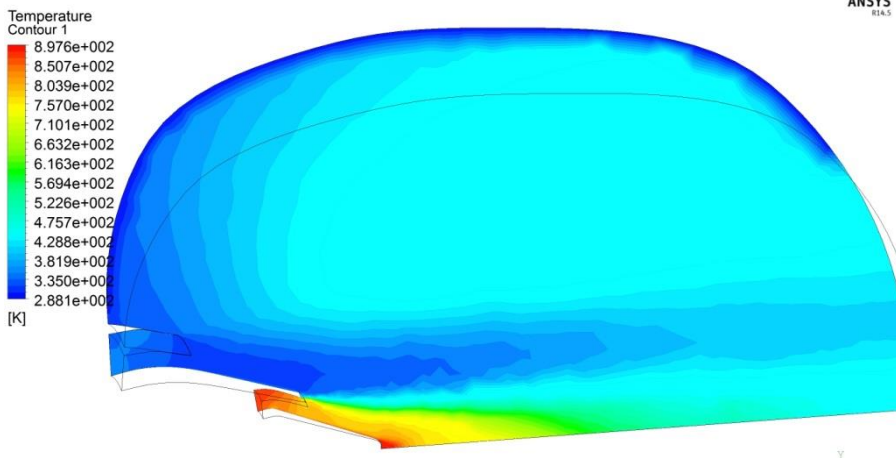


Рис. 76. Поля распределения статической температуры

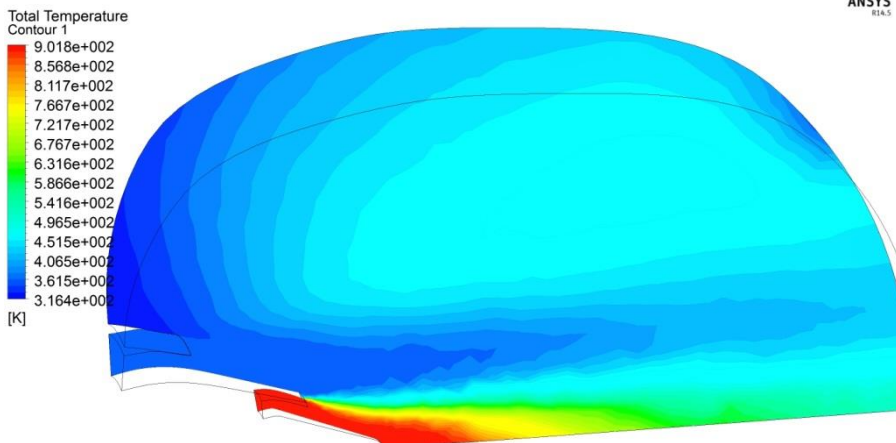


Рис. 77. Поля распределения полной температуры

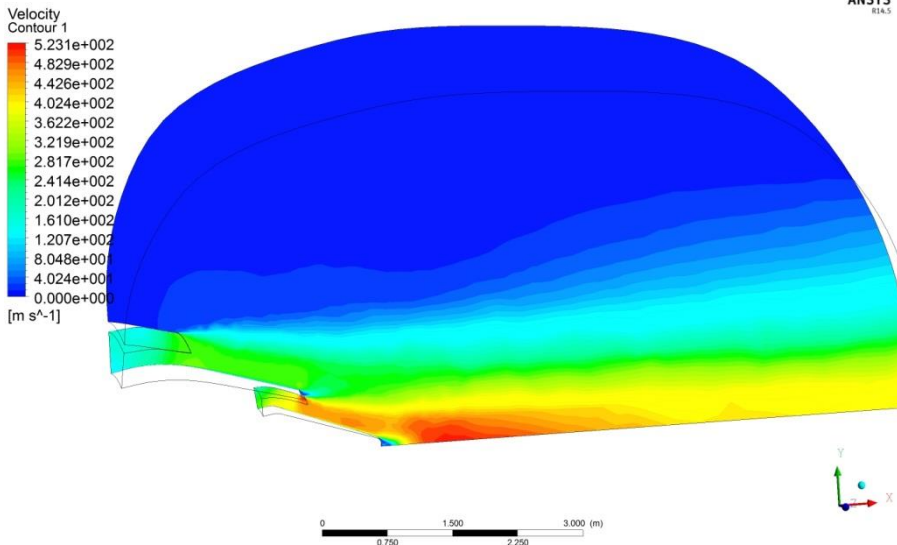


Рис. 78. Поля распределения скорости

Шаг 22. Оценка эффективности сопла

Для оценки эффективности сопла будут использоваться 2 параметра: коэффициент скорости φ_c в каждом контуре и коэффициент восстановления полного давления σ .

Для того чтобы получить указанные параметры на срезе сопла каждого контура необходимо измерить: статическое давление, абсолютную скорость и полное давление, а также полное давление и температуру на входе в сопло.

Для этого необходимо выполнить следующий алгоритм действий (на примере одного сопла, для другого сопла порядок действия аналогичен):

- 1 Создать плоскость измерения параметров, соответствующую срезу сопла. Для этого используется команда *Insert* → *Plane*. Параметры плоскости указаны на рис. 79, а ее вид на рис. 80. Координата плоскости по оси *X* должна быть чуть меньше соответствующей координаты, полученной с чертежа (рис. 81).

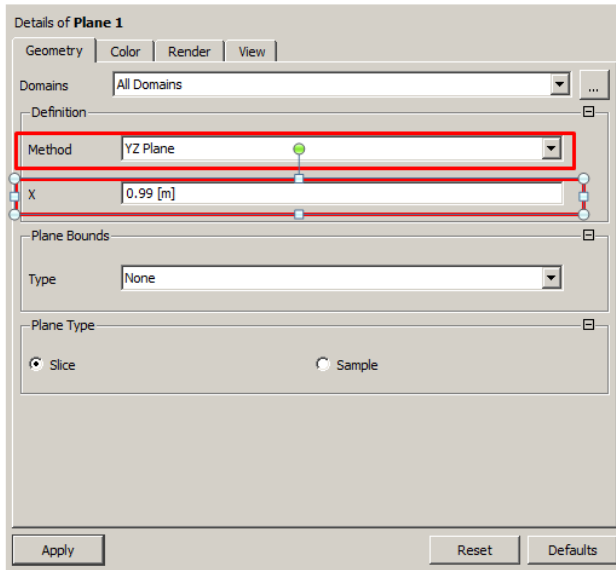


Рис. 79. Параметры плоскости измерения на срезе сопла

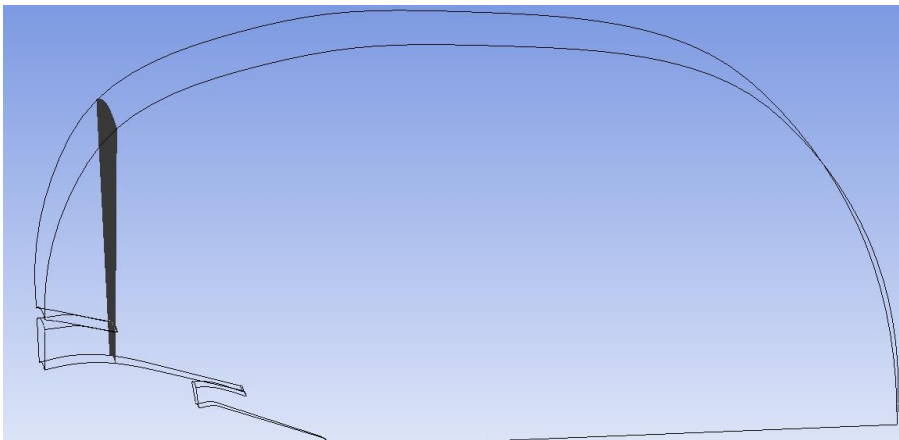


Рис. 80. Плоскость измерения на выходе из сопла наружного контура

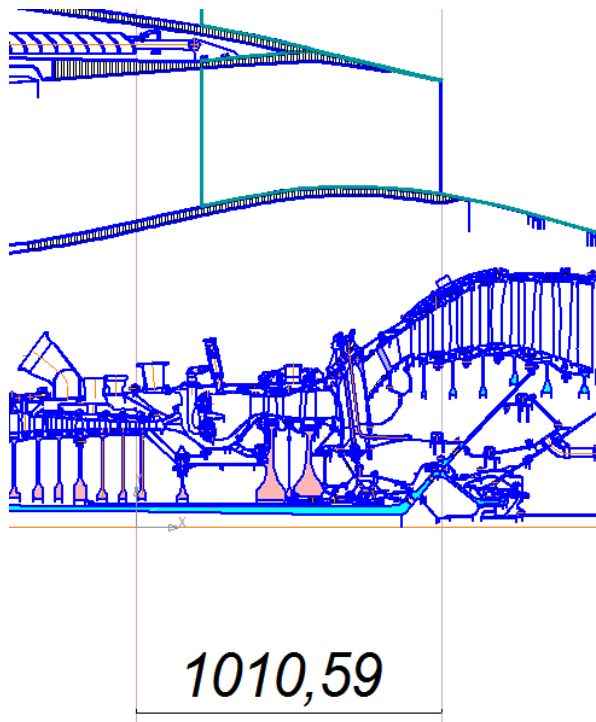


Рис. 81. Расстояние до среза сопла

- 2 На вкладке *Expressions* создать новое выражение, описывающее радиус в системе координат YZ, нажав ПКМ на свободном поле и выбрав пункт *New* (рис. 82). Имя вводимого выражения - *Radius*, вид - $(Y^2+Z^2)^{1/2}$. Ввод подтверждается нажатием кнопки *Apply*. Введенное выражение появится в списке (рис. 83).
- 3 Затем на вкладке *Variables* создается новая переменная, также как и новое выражение. Параметры новой переменной приведены на рис. 84. *Radius* используется в качестве выражения. Ввод подтверждается нажатием кнопки *Apply*.

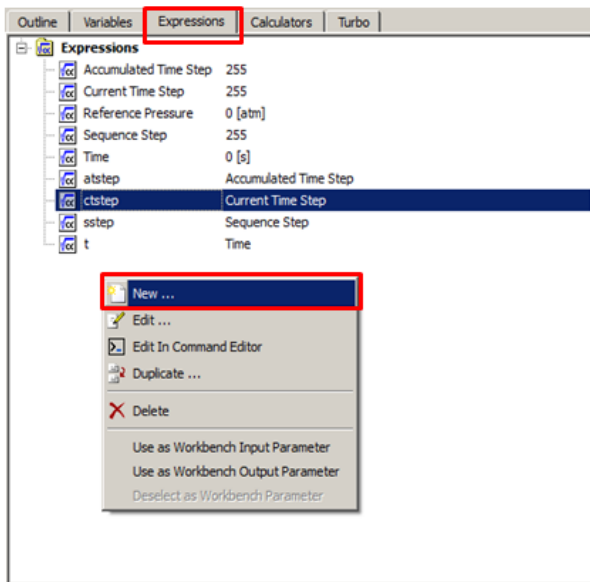


Рис. 82. Ввод нового выражения

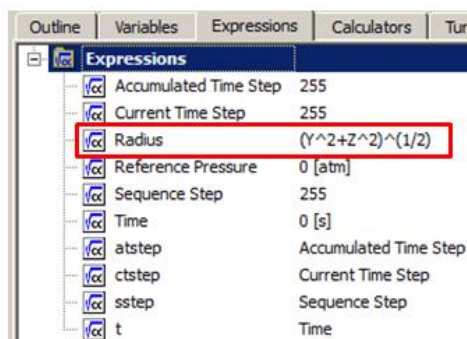


Рис. 83. Список выражений

4. Создается новая изоповерхность (*Iso Clip*) с использованием команды *Insert* → *Location* → *Iso Clip*. В качестве местоположения (*Location*) выбирается поверхность, созданная в пункте 1 (рис. 85). Далее с помощью кнопки *New* добавляется новый параметр отображения (рис. 86). В качестве переменной выбирается переменная из пункта 3. Диапазон изменения переменной должен быть чуть

больше советующего размера на чертеже (рис. 87). Ввод подтверждается нажатием кнопки *Apply*. Внешний вид созданной изоповерхности представлен на рис. 88.

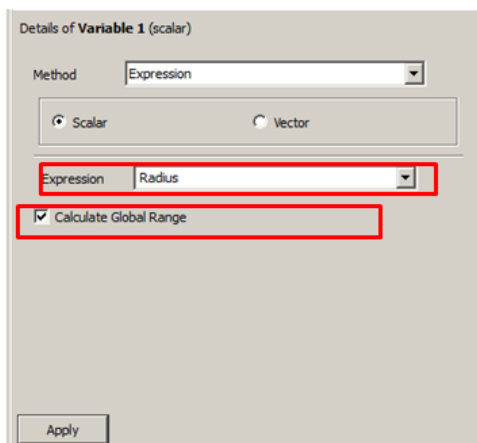


Рис. 84. Задание новой переменной

Внимание!!!! При создании изоповерхности необходимо отключить отображение всех остальных поверхностей и контуров в дереве проекта.

5. Далее на вкладке *Calculator* с использованием *Function Calculator* (рис. 89) можно произвести замер требуемых параметров. Для того чтобы перейти к нему необходимо либо перейти во вкладку *Calculators* под главным меню и выбрать *Function Calculator*, либо выполнить команду главного меню:

ГМ → *Tools* → *Function Calculator*.

Настройки, которые следует сделать в этом меню, которое появится, приведены на рис. 90 и в табл. 6.

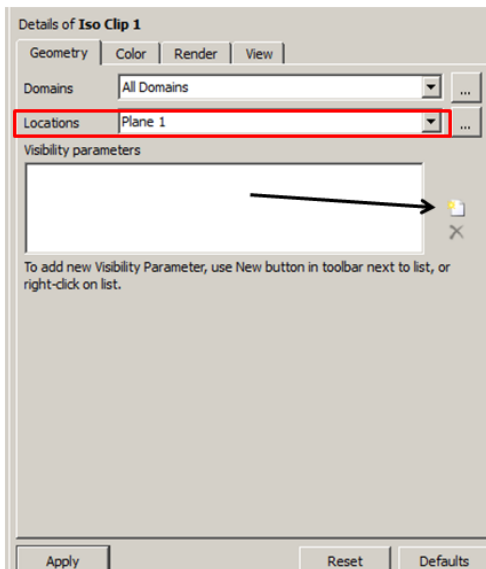


Рис. 85. Создание новой изоповерхности

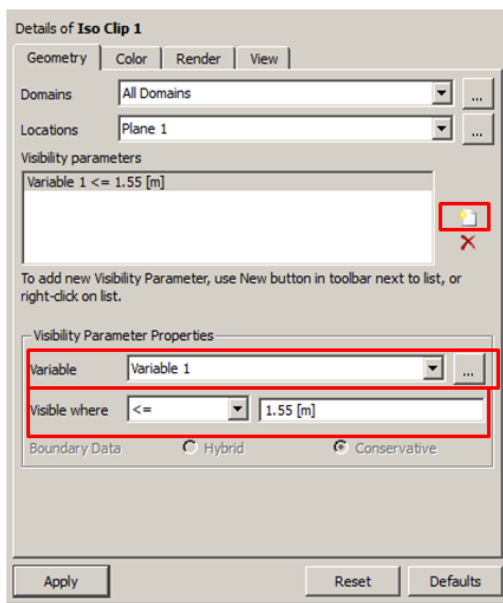


Рис. 86. Параметры изоповерхности

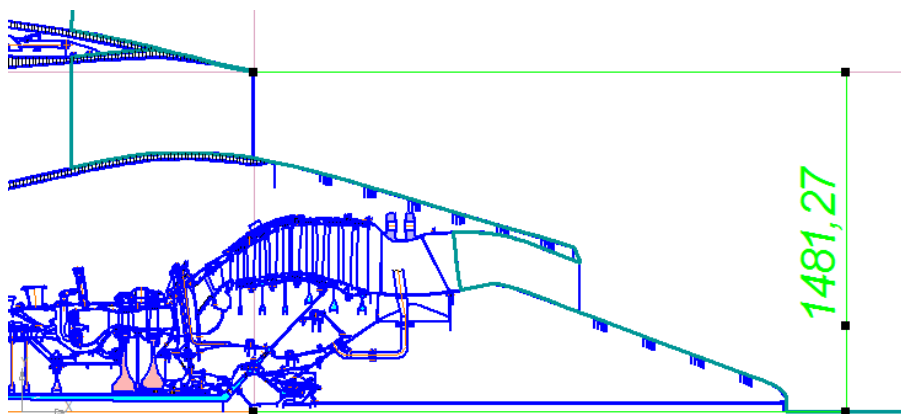


Рис. 87. Размер на чертеже для задания изоповерхности

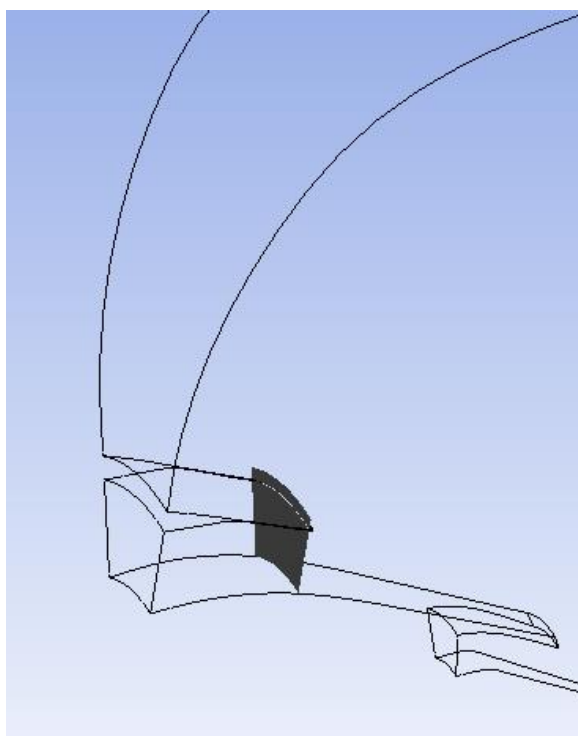


Рис. 88. Созданная изоповерхность

Настройки в меню Function Calculator

НАСТРОЙКИ В МЕНЮ	
<i>Пункт меню</i>	<i>Пояснение</i>
<i>Function</i>	Указывается способ осреднения параметра потока, а также выбираются глобальные переменные, такие как расход, крутящий момент, сила
<i>Location</i>	Из списка выбирается граница или поверхность распределение параметров, на которой желает знать пользователь.
<i>Variable</i>	Выбирается параметр потока, значение которого на выбранной границе желает знать пользователь. Обозначение наиболее употребимых параметров потока в данном списке приведено в таблице 5

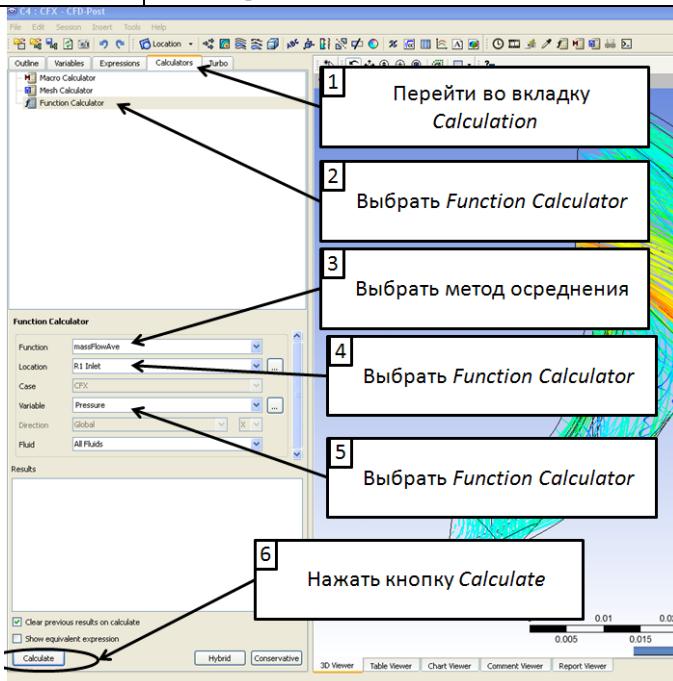


Рис. 90. Определение интегральных значений параметров потока на границах расчетной области

После выполнения указанных настроек следует нажать кнопку *Calculate* и в поле *Results* будет показана рассчитанная величина.

В табл. 7 для примера приведены типовые настройки для вычисления наиболее востребованных параметров течения.

Таблица 7

К определению наиболее важных параметров потока

Переменная	<i>Function</i>	<i>Variable</i>
Расход рабочего тела	<i>MassFlow</i>	-
Крутящий момент	<i>Torque</i>	в поле <i>Axis</i> указать ось вращения (в примере Z)
Плотность	<i>massFlowAve</i>	<i>Density</i>
Число Маха в текущей СК	<i>massFlowAve</i>	<i>Mach Number</i>
Число Маха в стационарной СК	<i>massFlowAve</i>	<i>Mach Number in Stn Frame</i>
Статическое давление	<i>massFlowAve</i>	<i>Pressure</i>
Давление торможения в текущей СК	<i>massFlowAve</i>	<i>Total Pressure</i>
Давление торможения в стационарной СК	<i>massFlowAve</i>	<i>Total Pressure in Stn Frame</i>
Статическая температура	<i>massFlowAve</i>	<i>Temperature</i>
Температура торможения в текущей СК	<i>massFlowAve</i>	<i>Total Temperature</i>
Температура торможения в стационарной СК	<i>massFlowAve</i>	<i>Total Temperature in Stn Frame</i>
Скорость в текущей СК	<i>massFlowAve</i>	<i>Velocity</i>
Скорость потока в неподвижной СК	<i>massFlowAve</i>	<i>Velocity in Stn Frame</i>

Измеренные параметры для каждого сечения тестового сопла приведены в табл. 8.

Таблица 8

Рассчитанные параметры потока в тестовом сопле с помощью ПК *Ansys*

Параметра	Первый контур	Второй контур
Полное давление на входе в сопло (Па)	$p_m^* = 180071$	$p_{mII}^* = 149827$
Полная температура на входе в сопло (К)	$T_m^* = 900$	$T_{mII}^* = 450$
Полное давление на срезе сопла (Па)	$p_{cI}^* = 179289$	$p_{cII}^* = 148544$
Статическое давление на срезе сопла (Па)	$p_{cI} = 120769$	$p_{cII} = 103242$
Абсолютная скорость истечения потока (м/с)	$C_{cI} = 440,449$	$C_{cII} = 261,817$

Расчета коэффициента скорости сопла первого контура ведется с помощью следующей формулы:

$$\varphi_{cI} = \frac{C_{cI}}{C_{cS}}$$

где $C_{cS} = \sqrt{2 \cdot C_{pg} \cdot T_T^* \cdot \left(1 - \frac{1}{\pi_c \frac{k_T-1}{k_T}}\right)}$ - изоэнтропическая скорость потока;

$\pi_{cI} = \frac{p_T^*}{p_{cI}}$ - степень понижения давления газа в канале сопла;

C_{cI} - измеренная осредненная скорость на срезе сопла.

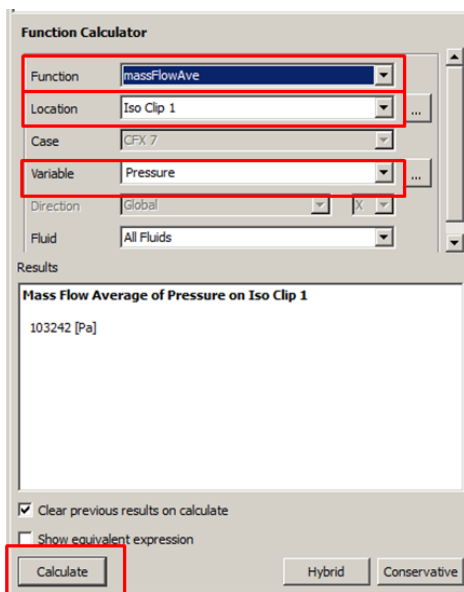


Рис. 90. Расчет параметров на срезе сопла

Значение коэффициент скорости для сопла первого контура находится в рекомендуемых пределах для современных ТРДД $\varphi_c = 0,97 \dots 0,995$.

Формула для расчета коэффициента восстановления полного давления в сопле первого контура:

$$\sigma_I = \frac{p_{cl}^*}{p_T^*}$$

Рекомендуемые пределы изменения указанного параметра $\sigma = 0,98 \dots 0,99$. Рассчитанная величина находится в указанном диапазоне.

Те же параметры необходимо рассчитать и для сопла второго контура:

$$\varphi_{cII} = \frac{c_{cII}}{c_{cS}}$$

где $c_{cS} = \sqrt{2 \cdot C_{p\Gamma} \cdot T_{в II}^* \cdot \left(1 - \frac{1}{\pi_c \frac{k_{\Gamma}-1}{k_{\Gamma}}}\right)}$ - изоэнтропическая скорость потока;

$\pi_{c II} = \frac{p_{в II}^*}{p_{c II}}$ - степень понижения давления газа в канале сопла;

$c_{c II}$ - измеренная осредненная скорость на срезе сопла.

Формула для расчета коэффициента восстановления полного давления в сопле первого контура:

$$\sigma_{II} = \frac{P_{c II}^*}{P_{в II}^*}$$

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Кулагин, В.В. Теория расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок: Учебник. Основы теории ГТД. Рабочий процесс и термогазодинамический анализ. Кн.1. Совместная работа узлов выполненного двигателя и его характеристики. Кн.2. [Текст]/ В.В. Кулагин. – М.: Машиностроение, 2002. – 616 с.; ил.
- 2 Иноземцев, А.А. Основы проектирования авиационных двигателей и энергетических установок [Текст]: учебник для студентов специальности «Авиационные двигатели и энергетические установки». Серия: «Газотурбинные двигатели». Том 2. Компрессоры. Камеры сгорания. Форсажные камеры. Турбины. Выходные устройства/А.А. Иноземцев, М.А. Нихамкин, В.Л. Сандрацкий. - М.: «Машиностроение», 2007.- 396 с.
- 3 *Патанкар, С.* Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости [Текст]/ *С. Патанкар.* – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 150с.
- 4 *Рейнольдс А. Дж.* Турбулентные течения в инженерных приложениях: Пер. с англ. – М.: Энергия, 1979. – 408 с.
- 5 Турбулентность. Принципы и применение. Под ред. *У. Фроста и Т. Моудлена.* – М.: Мир, 1980. – 220с.
- 6 *Флетчер, К.* Вычислительные методы в динамике жидкостей [Текст]. В 2-х томах/*К. Флетчер.* – М.: Мир, 1991. – 1056 с.
- 7 *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1974. - 711с.
- 8 *www.ansyssolutions.ru* [электронный ресурс].
- 9 *Ansys CFX Users Manual* [электронный ресурс].