

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)

СОЗДАНИЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ СЕТКИ ЦИЛИНДРОПОРШНЕВОЙ ГРУППЫ ДВС

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 и методического обеспечения для создания виртуального двигателя внутреннего сгорания и проектирование на этой основе ДВС мощностью 2 л.с.»
Соглашение № 2/13 от 3 июня 2013 г.

С А М А Р А

2013

УДК 629.1

ББК 30.1

С 585

Авторы: **Анисимов Михаил Юрьевич**

Бирюк Владимир Васильевич

Горшкалёв Алексей Александрович

Каюков Сергей Сергеевич

Угланов Дмитрий Александрович

Редакторская обработка : А.А. Горшкалёв

Компьютерная верстка: А.А. Горшкалёв

Доверстка: А.А. Горшкалёв

Создание конечно-элементной сетки цилиндропоршневой группы ДВС:
[Электронный ресурс]: электрон. учеб. пособие / М. Ю. Анисимов, В. В. Бирюк, А. А. Горшкалёв, С. С. Каюков, Д. А. Угланов; М-во образования и науки РФ, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). - Электрон. текстовые и граф. дан. (1,87 Мбайт). - Самара, 2013. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

В электронном учебном пособии представлены сведения о численных методах, используемых при решении задач с помощью численного моделирования CFD. Описаны возможности, особенности и свойства численного метода решения. Представлена методика создания конечно-элементной сетки цилиндропоршневой группы двигателя внутреннего сгорания для нестационарного расчета, включающая все стадии подготовки модели к расчету в программном комплексе *ANSYS Fluent*.

Электронное учебное пособие предназначено для подготовки бакалавров по направлению 141100.62 «Энергетическое машиностроение», изучающих дисциплину «Теория рабочих процессов ДВС» в 5, 6 семестре, магистров по направлению 160700.68 «Двигатели летательных аппаратов», изучающих дисциплину «Газовая динамика агрегатов и систем ДВС» в семестрах А, В, магистров по направлению 160700.68 «Двигатели летательных аппаратов», изучающих дисциплину «Процессы горения и экология двигателей внутреннего сгорания (ДВС)» в 9 семестре.

Подготовлено на кафедре теплотехники и тепловых двигателей

© Самарский государственный
аэрокосмический университет 2013

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 Краткие сведения о численных методах, используемых в CFD пакетах	5
1.1. Возможности и ограничения численных методов.....	5
1.2. Компоненты численного метода	7
1.3. Свойства численных методов решения	15
1.4. Метод конечных объемов.....	20
2 Методика создания конечно-элементной сетки цилиндропоршневой группы двигателя внутреннего сгорания для нестационарного расчета	33
2.1 Подготовка расчетной модели.....	33
2.2 Создание схемы проекта	34
2.3 Импортирование геометрии.....	35
2.4 Создание конечно - элементной сетки.....	38
2.5 Назначение граничных условий	42
Список использованных источников	45

ВВЕДЕНИЕ

В данном учебном пособии представлены сведения о численных методах, используемых при решении задач с помощью численного моделирования CFD. Описаны возможности, особенности и свойства численного метода решения. Представлена методика создания конечно-элементной сетки цилиндропоршневой группы двигателя внутреннего сгорания для нестационарного расчета, включающая все стадии подготовки модели к расчету в программном комплексе ANSYS Fluent.

Данный информационный ресурс может использоваться студентами и преподавателями для получения навыков работы с движущимися сетками для расчетов процессов в цилиндропоршневой группе ДВС с помощью программы ANSYS Fluent.

1 КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДАХ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В CFD ПАКЕТАХ

Как известно течение жидкостей может быть описано системой частных дифференциальных (или интегрально-дифференциальных) уравнений, которая не может быть решена аналитически, за исключением частных случаев. Ее приближенное решение в цифровой форме, может быть получено *методом дискретизации*, который аппроксимирует дифференциальные уравнения системой алгебраических уравнений, которые тогда могут быть решены с помощью компьютера. Аппроксимации применены к небольшим областям в пространстве и/или времени, таким образом, числовое решение обеспечивает результаты в *дискретных точках* в пространстве и времени. Точность числовых решений зависит от качества используемых методов дискретизации.

1.1. Возможности и ограничения численных методов

При использовании численных методов математической физики всегда необходимо помнить тот факт, что *результаты численных решений всегда приближительны* [1]. Есть несколько причин для расхождений между результатом расчета и экспериментом. Ошибки накапливаются в каждой части процесса, используемого для получения численных результатов:

– дифференциальные уравнения могут содержать ошибки, обусловленные идеализацией реальных физических процессов при построении математической модели;

– алгебраические уравнения содержат ошибки аппроксимации, полученные в процессе дискретизации дифференциальных уравнений;

– в решении алгебраических уравнений используются итерационные методы.

Когда расчетные уравнения имеют точные аналитические решения (например, уравнения Навье-Стокса для несжимаемых Ньютонических жидкостей), результаты расчета могут быть получены с любой желаемой

степенью точности. Однако, для многих физических явлений, таких как турбулентность, горение, многофазные течения, точные уравнения или невозможно сформулировать, или невозможно получить их точное численное решение. Если бы даже численное решение уравнения было точным с вычислительной точки зрения, оно не являлось бы правильным представлением действительности. Чтобы *проверить адекватность* моделей, необходимо привлечение экспериментальных данных [1,8,9].

Ошибки дискретизации могут быть уменьшены при использовании более точной интерполяции, аппроксимации или за счет осреднения параметров течения в пределах меньших областей, но это увеличивает время и затраты на получение решения. Поэтому для применения численных методов в инженерных задачах необходимо найти компромисс.

Компромиссы также необходимы при решении дискретизованных уравнений. Прямое моделирование, с помощью которого можно получить точное решение, на практике используется редко, поскольку оно является слишком дорогостоящим в вычислительном плане. Итерационные методы решения распространены больше, но при их использовании необходимо принимать во внимание ошибки, обусловленные неполной сходимости итерационного процесса.

Визуализация численных решений с использованием векторов, контуров или других видов графики и видео важна для интерпретации результатов. Они являются самым эффективным средством интерпретации огромного количества данных, полученных в результате расчета. Однако, есть опасность, что ошибочное решение может выглядеть правдоподобно, но, возможно, не соответствовать реальным процессам! Пользователи коммерческих программ *CFD* должны быть особенно внимательны, поскольку оптимизм продавцов программ по поводу их возможностей очень велик. Замечательные цветные картинки производят большое впечатление, но совершенно бесполезны, если они количественно не соответствуют эксперименту.

1.2. Компоненты численного метода

Математическая модель

Отправная точка любого численного метода – математическая модель – это множество дифференциальных или интегрально-дифференциальных уравнений в частных производных и граничных условий. Каждый выбирает соответствующую модель для целевого применения (несжимаемый, невязкий, турбулентный; двух - или трехмерный поток и т.д.). Эта модель может включать упрощения точных законов сохранения. Метод решения обычно создается с учетом специфики системы уравнений.

Метод дискретизации

После выбора математической модели нужно выбрать подходящий метод дискретизации, то есть метод аппроксимации дифференциальных уравнений системой алгебраических уравнений для переменных в некотором множестве дискретных местоположений (точек) в пространстве и времени. Есть много методов, из которых наиболее известны: метод конечных разностей (МКР (FD)), метод конечных объемов (МКО (FV)) и метод конечных элементов (МКЭ). Другие методы, такие как спектральные схемы, метод предельного элемента, используются в *CFD* программах, но их использование, как правило, ограничено специальными классами задач.

– Метод конечных разностей, подробно описан в работах [1,2,3,4]. Преимуществом метода является его простота. Метод конечных разностей используется программами *FlowEr*, ЦИАМ, ЦАГИ [7].

– Метод конечных элементов, подробно описан в работах [1,5,9]. Метод конечных элементов используется программами *Flotran*, *Flow Plus*, *Cosmos Flow* [7].

– Метод конечных объемов. Классическое описание этого метода приведено в работе [8]. Этот метод используется программами *CFX*, *Fluent*, *StarCD* [7].

Каждый метод приводит к одному и тому же решению, если используется мелкая сетка. Однако, некоторые методы являются более подходящими для конкретных классов задач чем другие.

Система координат

Как было уже упомянуто выше, уравнения сохранения могут быть написаны в различных формах, в зависимости от системы координат и используемых базисных векторов. Например, можно выбрать СК: декартову, цилиндрическую, сферическую, криволинейную, прямоугольную или непрямоугольную, которая может быть стационарной или перемещающейся. Выбор СК зависит от характера конкретной решаемой задачи. На выбор СК также может влиять метод дискретизации и тип конечно-элементной сетки [1,3,4,8].

Кроме того, нужно выбрать точку отсчета (начало течения), в которой будут определены векторы и тензоры (постоянные или переменные, ковариантные или контравариантные, и т.д.).

Расчетная конечно-элементная сетка

Положения дискретных точек, в которых вычисляются переменные, определяются расчетной конечно-элементной сеткой, которая является по существу дискретным представлением геометрической области течения. Она делит расчетную область на конечное число подобластей (элементы, контрольные объемы и т.д.). Расчетная сетка делится на следующие типы:

- *Структурированная (регулярная) сетка.* Регулярные или структурированные сетки состоят из рядов линий координатной сетки, элементы одного рода не пересекают друг друга и пересекают каждый элемент других родов только однажды. Это позволяет линии данного множества пронумеровать последовательно. Позиция любой сеточной точки (или контрольного объема) в пределах области однозначно определена индексом в два (в двумерном поле) или в три номера (в трехмерном поле), например (i, j, k) . Это самая простая сеточная структура, так как она логически эквивалентна декартовой системе координат. У

каждой точки есть четыре самых близких соседа в двумерном пространстве и шесть в трехмерном; один из индексов каждого соседа точки P (индексы i, j, k) отличается на ± 1 от соответствующего индекса P . Пример структурированной двумерной сетки показан на рисунке 1.1. Это задание соседних связей упрощает программирование и у матрицы системы алгебраических уравнений есть регулярная структура, которая может использоваться в создании метода решения. Недостатком структурированных сеток является то, что они могут быть построены только для геометрически простых областей решения. Другой недостаток заключается в трудности управления распределением сеточных точек: большая концентрация точек в одной области для обеспечения точности результатов расчета создает излишне малый интервал в других частях области решения и обуславливает неоправданные затраты ресурсов. Эта проблема осложняется в трехмерных задачах. Длинные тонкие ячейки также могут также затруднить сходимость решения.

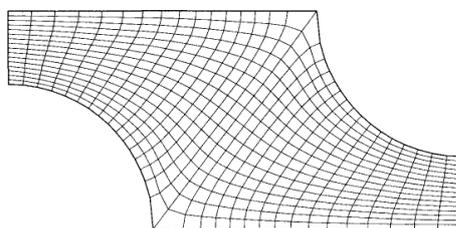


Рисунок 1.1 - Пример двумерной, структурированной, неортогональной сетки, созданной для вычисления потока в сегменте осесимметричного ступенчатого перехода трубы [1]

Все структурированные расчетные конечно-элементные сетки можно разделить на несколько групп (рисунок 1.2) [4]: типы H, C, O и комбинированный.

Их названия получены от форм линий координатной сетки.

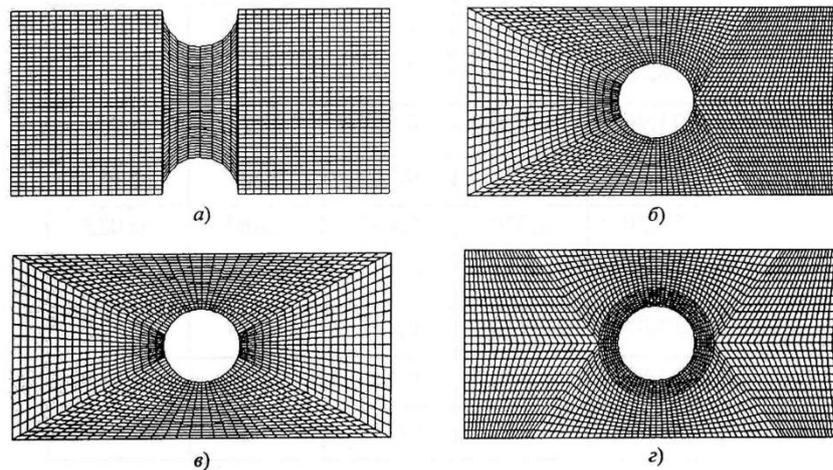


Рисунок 1.2 - Типы расчетных ортогональных сеток [4]:

a – *H* сетка; *б* – *C* сетка; *в* – *O* сетка; *г* – комбинированная сетка

Сетка типа *H* (рисунок 1.2, *a*) строится просто, обычно не требует интерполяции. Ее основной недостаток - скошенность ячеек вблизи круглых кромок и в межлопаточных каналах со значительным поворотом потока, что повышает погрешность аппроксимации.

Сетки типа *C* и *O* (рисунок 1.2, *б*, *в*) лишены этого недостатка, однако они сложнее в построении. Поэтому часто эти сетки используются в комбинации с сетками типа *H* (рисунок 1.2, *г*)

Обойти указанные трудности построения сеток можно с помощью использования неструктурной сетки, основанной на треугольных или полиэдральных элементах. Подобным образом возможно описание расчетной области любой формы. Однако при этом значительно усложняется алгоритм решения, вносится существенная аппроксимационная погрешность и большая схемная диффузия, что заставляет прибегать к существенному сгущению сетки [4,7].

На рисунок 1.3 показано, сетка *O*-типа построенная вокруг цилиндра. У этого типа сетки одно множество координатных линий "бесконечно". Если следовать за координатой вокруг цилиндра, вдоль линии координатной сетки, то она будет непрерывно увеличиваться и необходимо избегать использования искусственного "разрыва", при котором

координата получает нулевое или конечное значение. При разрыве сетка может быть "развернута", но соседние точки, оказавшиеся на границах разрыва, должны рассчитываться как внутренние точки сетки, в отличие от подхода, примененного на границах сетки *H*-типа. Внешняя сетка на рисунке 1.3 имеет также *H*-тип. Сетка из блоков вокруг подводного крыла на рисунке 1.5 имеет *C*-тип. У этого типа сетки точки на концах одной координатной линии совпадают, требуя введения разрыва, подобного использованному в сетках *O*-типа. Этот тип сетки часто используется для тел с крутоизогнутыми профилями.

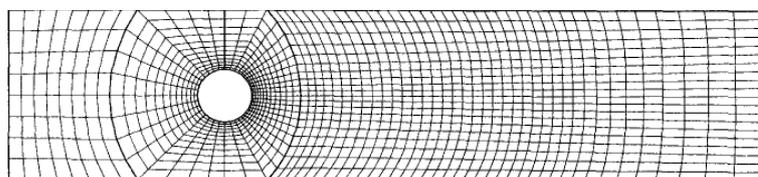


Рисунок 1.3 - Пример двумерной блочной сетки [6]

Независимо от типа ячеек возникает необходимость в блочной структуре сетки. Для сложных расчетов блоки могут размещаться нерегулярно, но внутри блоков желательно иметь структурированную сетку. Различные блоки могут соединяться между собой интегрально (узел в узел) – *блочная сетка с сопрягающимися поверхностями*; или по поверхностям раздела ячеек (рисунок 1.4) – *блочная сетка с несопрягающимися поверхностями*. Однако второй вид сопряжения приводит к снижению точности расчета.

На рисунке 1.3 показана блочная сетка с сопрягающимися поверхностями раздела; она создана для расчета двумерного потока в канале вокруг цилиндра и содержит три блока.

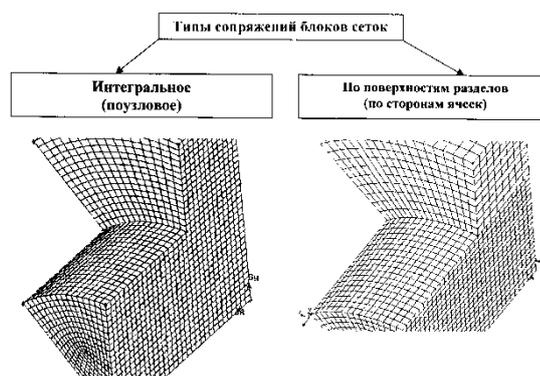


Рисунок 1.4 - Типы сопряжения конечно-элементных расчетных сеток

На рисунке 1.5 показана сетка из блоков с несопрягающимися поверхностями раздела; она использовалась, для расчета течения вокруг затопленного подводного крыла. Она состоит из пяти блоков с сетками с различными размерами конечных элементов. Этот вид сетки более гибкий, чем предыдущие, поскольку он допускает использование более мелких сеток в областях, где она требуется.

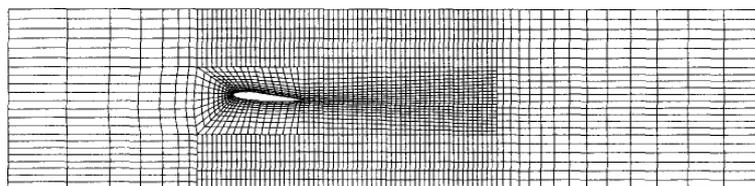


Рисунок 1.5 - Пример двумерной блочной сетки, с несопрягающимися поверхностями раздела [6]

Сетки с накладывающимися блоками иногда называют сетками *химерами* или *составными объектами*. Одна такая сетка показана на рисунке 1.6. В области перекрытия граничные условия для одного блока получены интерполяцией решений другого блока (с которым перекрывается первый). Этот тип сетки используется редко. Их недостаток заключается в том, что трудно обеспечить законы сохранения по границам блоков. Преимущества этого подхода состоят в том, что с комплексными областями дело иметь легче, и он может использоваться с движущимися телами.

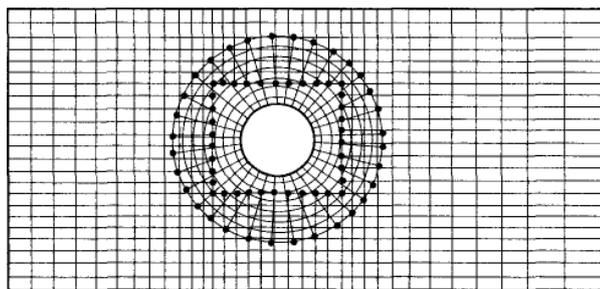


Рисунок 1.6 - Составная двумерная сетка, используемая, чтобы вычислить поток вокруг цилиндра в канале [1]

Неструктурированные сетки являются самым гибким типом сетки для очень сложных конфигураций. Т.е. такой, который может использоваться для расчетной области с произвольной границей. В принципе, такие сетки могут использоваться с любой схемой дискретизации, но лучше всего они подходят к методам конечных объемов и конечных элементов. У элементов или контрольных объемов может быть любая форма, и при этом нет ограничения числа соседних элементов или узлов. На практике чаще всего используются сетки, состоящие из треугольников или четырехугольников в двумерном, и тетраэдров или гексаэдров в трехмерном поле течения. Такие сетки могут быть сгенерированы автоматически существующими алгоритмами. Классификация неструктурированных расчетных сеток приведена на рисунке 1.7.

Особо следует отметить полиэдральные сетки – сетки в виде многогранников. Они стали доступны в *CFD* программах относительно недавно. При равном числе конечных элементов полиэдральная сетка значительно превосходит тетраэдральную по точности расчета. За счет большего числа граней на одну ячейку, полиэдральная сетка гораздо точнее рассчитывает градиенты изменения параметров.

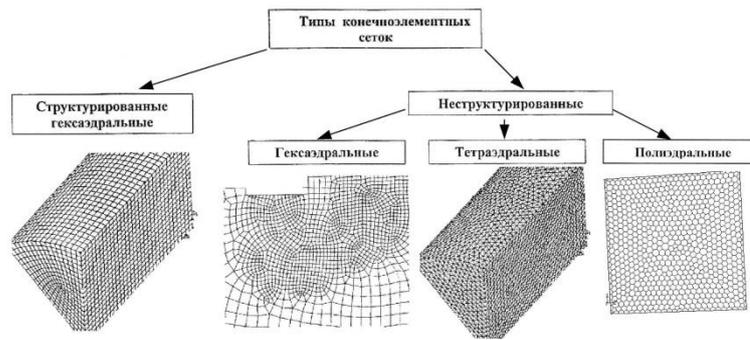


Рисунок 1.7 - Классификация неструктурированных расчетных сеток

При построении расчетных сеток придерживаются двух правил [1,3,7,8].

- в области повышенных градиентов (скорости, давления, температуры) необходимо применять сетку повышенной плотности (густоты);

- грани конечных объемов (элементов) должны быть сориентированы по линиям тока течения рабочего тела.

Для выполнения второго правила предпочтительнее использовать гексаэдральные конечные элементы в трехмерных расчетных моделях и четырехугольные в двумерных.

Конечные аппроксимации

После выбора типа сетки нужно выбрать аппроксимации, которые будут использоваться в процессе дискретизации. В методе конечных разностей должны быть выбраны аппроксимации для производных в сеточных точках. В методе конечных элементов нужно выбрать функции формы (элементы) и весовые функции.

Их выбор влияет на точность аппроксимации. Это также касается трудности разработки метода решения. Более точные аппроксимации включают больше узлов и дают более полные матрицы.

Метод решения

Дискретизация приводит к системе большого количества нелинейных алгебраических уравнений.

Для нестационарных потоков применяются методы, основанные на использовании в задачах с начальными условиями дифференциальных уравнений с шагом по времени. Каждый раз в решении эллиптической задачи должен быть задан шаг по времени.

Задачи в стационарной постановке обычно используют решение с псевдошагом по времени, или эквивалентную итерационную схему. Так как уравнения нелинейны, для их решения используется итерационная схема. Эти методы используют последовательную линеаризацию уравнений, и получающиеся линейные системы почти всегда решаются итерационными методами.

Выбор метода решения зависит от типа сетки и количества узлов, выбранных для аппроксимации производных в каждом алгебраическом уравнении.

Критерии сходимости

Наконец, нужно установить критерии сходимости для итерационного метода. Обычно, есть два уровня итераций: внутренние итерации, в пределах которых решается линейное уравнение, и внешние итерации, когда решение связано с нелинейностью и взаимосвязью уравнений. Очень важно решение, когда необходимо остановить итерационный процесс с точки зрения точности и эффективности.

1.3. Свойства численных методов решения

Надежность

Дискретизация осуществляется тем точнее, чем ближе интервал сетки стремится к нулю. Разность между дискретизованным уравнением и точным решением называют *погрешностью метода*. Она обычно оценивается заменой всех значений дискретной аппроксимации в узлах разложением в ряд Тейлора в каждой отдельной точке. В результате восстанавливается оригинальное дифференциальное уравнение плюс остаточный член, который представляет погрешность метода. Для

обеспечения *надежности* метода, погрешность метода должна стремиться к нулю, когда интервал сетки $\Delta t \rightarrow 0$ и/или $\Delta x_i \rightarrow 0$. Погрешность метода обычно пропорциональна степени интервала сетки Δx_i и/или шага по времени Δt . Если самый важный член пропорционален $(\Delta x)^n$ или $(\Delta t)^n$ метод называется аппроксимацией n -го порядка. Для надежности требуется чтобы $n > 0$. В идеале, все члены должны быть дискретизованы с аппроксимациями одного порядка точности; однако, некоторые члены (например, конвективные члены в потоках с высоким числом Рейнольдса или диффузионные члены в потоках с низким числом Рейнольдса), могут быть доминирующими в данном потоке, и это может потребовать расчета с большей точностью, чем других.

Некоторые методы дискретизации приводят к погрешностям метода, которые являются функциями отношения Δx_i к Δt или наоборот. В таком случае, требование надежности выполняется только при условии когда Δx_i и Δt должны уменьшаться так, чтобы соответствующее отношение стремилось к нулю.

Даже если аппроксимации последовательны, это не обязательно означает, что решение дискретизованной системы уравнений станет точным решением дифференциального уравнения при неограниченном уменьшении размера шага. Для того, чтобы это произошло, метод решения должен быть *устойчивым*.

Устойчивость

Численный метод решения, устойчив, если он не увеличивает (не накапливает) ошибки, которые появляются в процессе решения. Для нестационарных задач (задач с зависимостью от времени) устойчивость гарантирует, что метод дает конечное решение всякий раз, когда решение точного уравнения ограничено по времени. Для итерационных методов устойчивый метод - тот, который не расходится. Устойчивость может быть трудно диагностируемой, особенно когда присутствуют граничные условия и нелинейность. Поэтому проводят исследование устойчивости метода для

линейных задач с постоянными коэффициентами без граничных условий. Опыт показывает, что результаты, полученные таким образом, могут часто применяться к более сложным задачам, но есть и исключения.

Наиболее широко используемый метод в изучении устойчивости численных схем – метод Неймана.

Сходимость

Численный метод обладает сходимостью, если решение дискретизованных уравнений стремится к точному решению дифференциальных уравнений, когда интервал сетки стремится к нулю. Для линейных задач с начальными условиями *простая теорема эквивалентности* (Richtmyer и Morton, 1967) гласит, что "сформулированная должным образом линейная задача с начальными условиями и аппроксимациями конечными разностями, которая удовлетворяет условиям надежности и устойчивости - необходимое и достаточное условие для сходимости". Очевидно, надежная схема бесполезна, если метод решения не сходится.

Для нелинейных задач, которые находятся под влиянием граничных условий, устойчивость и сходимость метода являются трудными для идентификации. Поэтому сходимость обычно проверяется с использованием численных экспериментов, то есть повторением вычислений на последовательно модернизируемых сетках. Если метод устойчив и если все аппроксимации, используемые в процессе дискретизации совместимы, решение сходится к *независящему от сетки решению*. Для достаточно небольших размеров сетки величиной сходимости управляют в соответствии с основным компонентом погрешности метода.

Выполнение законов сохранения

Так как уравнения, которые будут решены, являются законами сохранения, численная схема должна соблюдать эти законы, как на локальном, так и на глобальном уровне. Это означает, что, в стационарной

задаче количество вещества, покидающего замкнутый объем равно количеству вещества, входящему в объем. Если используется жесткая форма уравнений сохранения и метод конечных объемов, это гарантирует выполнение законов сохранения для каждого индивидуального контрольного объема и для расчетной области в целом. Другие методы дискретизации могут быть менее точны в выполнении законов сохранения.

Это важное свойство метода решения, так как оно определяет ошибку решения. Если обеспечены сохранения массы, импульса и энергии, ошибка в расчете может быть только в их ненадлежащем распределении по расчетной области.

Ограничения при расчете

Численные решения должны лежать в пределах надлежащих границ. Физически неотрицательные параметры, такие как плотность, кинетическая энергия турбулентности, должны быть всегда положительными. Другие параметры, такие как концентрация, должны лежать в интервале между 0 % и 100 %. В отсутствие источников некоторые уравнения (например, уравнение теплопроводности для температуры, когда источники теплоты отсутствуют) требуют, чтобы минимальные и максимальные значения переменной находились в диапазоне величин, заданных на границах области. Эти условия должны быть учтены численной аппроксимацией.

Соблюдение этих ограничений трудно гарантировать. Ниже будет показано, что только некоторые схемы первого порядка гарантируют соблюдение этого условия. Схемы более высокого порядка могут приводить к неограниченному изменению результатов решения. Это обычно случается только на слишком крупных сетках. Таким образом, обычно результаты решения, выходящие за пределы указанных ограничений, являются индикатором того, что ошибки решения являются большими, и сетка нуждается в некотором усовершенствовании (по крайней мере, локально).

Адекватность

Модели сложных явлений, описание которых включает турбулентность, горение или течение многофазного рабочего тела должны гарантировать получение физически реалистичных решений. Это не численная проблема *по существу*, но неверные модели могут привести к нефизичным решениям или расходящемуся итерационному процессу.

Точность

Численные методы расчета течений жидкости и теплообмена дают только *приближенные* решения. В дополнение к ошибкам, которые могли быть допущены в ходе разработки алгоритма решения или в ходе постановки граничных условий, результаты численных решений всегда включают три вида систематических ошибок:

– *ошибки моделирования*, которые определены как разность между результатами эксперимента и результатами решения математической модели;

– *ошибки дискретизации*, определенные как разность между точным решением дифференциальных уравнений сохранения и точным решением алгебраической системы уравнений, полученных дискретизацией дифференциальных уравнений.

– *итерационные ошибки*, определенные как разность между итерационным и точным решением системы алгебраических уравнений.

Итерационные ошибки часто называют *ошибками сходимости*. Однако термин *сходимость* используется не только применительно к несовершенству итерационной процедуры, но также определяется сходимостью численных решений в независимости от сетки и связан с ошибкой дискретизации.

Важно знать о существовании этих ошибок, и более того, отличать одну от другой. Различные ошибки могут компенсировать друг друга так, что решение, полученное на крупной сетке, может согласовываться лучше

с экспериментом, чем решение на более мелкой сетке - которое, по определению, должно быть более точным.

Ошибки моделирования зависят от допущений, сделанных при получении физических уравнений для переменных. Их можно считать незначительными при исследовании ламинарных потоков, так как уравнения Навье-Стокса представляют достаточно точную модель потока. Однако, для турбулентных течений, двухфазных потоков, горения и т.д., ошибки моделирования могут быть очень большими. То есть даже точное решение уравнений может быть *качественно* неверно. Ошибки моделирования также возможны из-за упрощения геометрии – области решения, а также из-за упрощения граничных условий и т.д. Эти ошибки не известны сразу; их оценка может быть сделана только в результате сравнения решения, в котором дискретизация и ошибки сходимости незначительны с точными экспериментальными данными или с данными, полученными более точными моделями (например, данными, полученными в результате прямого численного моделирования турбулентности, и т.д.). Это сравнение очень важно для управления процессом сходимости и оценки ошибок дискретизации, для создания моделей физических явлений.

1.4. Метод конечных объемов

При использовании данного метода область решения делится сеткой на конечное число небольших контрольных объемов, которая, в отличие от метода конечных разностей, определяет границы контрольного объема, а не вычислительные узлы.

Метод конечных объемов использует как отправную точку интегральную форму уравнения сохранения:

$$\int_S \rho \phi v \cdot n dS = \int_S \tilde{A} \text{grad} \phi \cdot n dS + \int_{\Omega} q_{\phi} d\Omega \quad (1.1)$$

Классический метод должен определить контрольные объемы сеткой и назначить вычислительный узел в центре контрольного объема. Однако, для структурированных сеток также возможно вначале определить

расположения узлов, а затем создать контрольные объемы вокруг них, так, чтобы грани контрольного объема лежали на середине между узлами (рисунок 1.8). Узлы, на которые наложены граничные условия, показаны как черные круги.

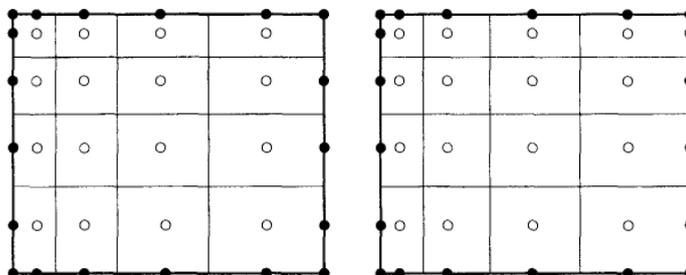


Рисунок 1.8 - Типы сеток МКО: узлы, центрированные в контрольных объемах (слева) и грани контрольного объема центрированные между узлами (справа) [6]

Преимущество первого метода состоит в том, что величина узла представляет среднюю величину по всему объему контрольного объема с более высокой точностью (второго порядка) чем во втором методе, так как узел расположен в средней точке контрольного объема. Преимущество второго метода состоит в том, что аппроксимации производных по граням контрольного объема более точны на середине грани между двумя узлами. На практике чаще используется первый вариант.

Принципы дискретизации одни и те же для всех вариантов. Единственное, что нужно принять во внимание – это отношение между различными местоположениями (точками) в пределах объема интегрирования.

Интегральное уравнение сохранения (1.1) относится к каждому контрольному объему, так же как и к области решения в целом. Если суммировать уравнения для всех контрольных объемов, то получится глобальное уравнение сохранения, так как интегралы по поверхностям и по внутренним граням контрольного объема уравновешиваются. Таким

образом, глобальное сохранение встроено в метод, что обеспечивает ему одно из главных преимуществ.

Чтобы получить алгебраическое уравнение для специфического контрольного объема, поверхностные и объемные интегралы должны быть аппроксимированы, используя формулы квадратов.

Аппроксимация интегралов по поверхностям

На рисунках 1.9 и 1.10 показаны типичные двумерные и трехмерные контрольные объемы в декартовой системе координат. Поверхность контрольного объема состоит из четырех (в двумерной постановке) или шести (в трехмерной) граней плоскостей, обозначенных строчными буквами, соответствующими их направлению (e , w , n , s , t , и b) относительно центрального узла (P). Двухмерный вариант может быть принят как частный случай трехмерного, в котором зависимые переменные независимы от z .

Поток через границу контрольного объема – это сумма интегралов по четырем (в двумерном случае) или шести (в трехмерном) граням контрольного объема:

$$\int_S f dS = \sum_k \int_{S_k} f dS, \quad (1.2)$$

где f компонент конвективного $\rho\phi v \cdot n$ или диффузионного ($\Gamma \text{grad}\phi \cdot n$) вектора потока в направлении, нормальном к грани контрольного объема.

Поскольку скоростное поле и свойства жидкости приняты известными, единственная неизвестная переменная – ϕ . Если поле скоростей не известно – значит это более сложная задача, включающая двойные нелинейные уравнения.

Для поддержания уравнения сохранения важно, чтобы контрольные объемы не накладывались друг на друга; каждая грань контрольного объема является единственной для двух контрольных объемов, которые лежат с обеих сторон.

В дальнейшем, будет рассмотрена только грань 'e' типичная для двумерного контрольного объема показанного на рисунке 1.9.

Аналогичные выражения могут быть получены для всех граней, делая соответствующие подстановки индекса.

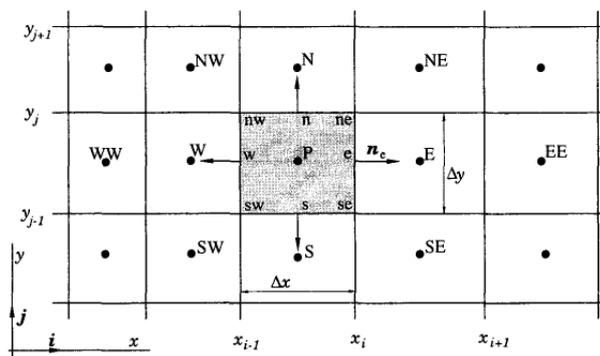


Рисунок 1.9 - Типичный двухмерный контрольный объем в декартовой системе координат [6]

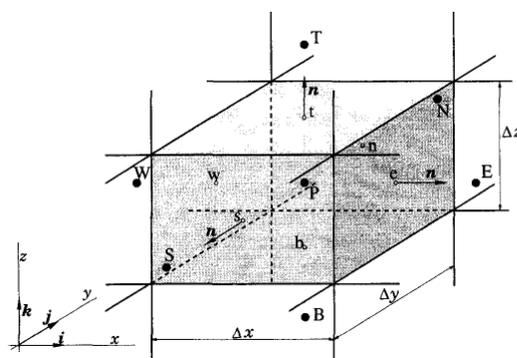


Рисунок 1.10 - Типичный трехмерный контрольный объем в декартовой системе координат [6]

Чтобы точно вычислить интеграл по поверхности в уравнении (1.2), единственное, что нужно знать - это подынтегральное выражение f по всей поверхности S_c , которое не известно. Как только значения в узлах φ (центр контрольного объема) будут вычислены, аппроксимация может быть возможна. Это лучше всего сделать, используя два уровня аппроксимации:

- интеграл аппроксимирован в терминах переменных значений в одном или более местоположениях на грани ячейки;
- номинальные значения ячейки аппроксимированы в терминах узлового (центра контрольного объема) значения.

Самая простая аппроксимация по интегралу - это правило середины: интеграл аппроксимирован как произведение подынтегрального выражения

в центре грани ячейки (который является самостоятельно аппроксимацией к среднему значению по поверхности) и области грани ячейки:

$$F_e = \int_{S_e} f dS = \bar{f}_e S_e \approx f_e S_e. \quad (1.3)$$

Эта аппроксимация интеграла обеспечивает значение f в местоположении 'e' и имеет точность второго порядка.

Так как значение f не доступно в центре грани 'e', оно должно быть получено интерполяцией. Чтобы сохранить точность второго порядка аппроксимации правила середины поверхностного интеграла, значение f_e должно быть вычислено с точностью, по крайней мере, второго порядка.

Другая аппроксимация второго порядка поверхностного интеграла для двухмерного случая – правило трапеций, которая приведена:

$$F_e = \int_{S_e} f dS \approx \frac{S_e}{2} (f_{ne} + f_{se}). \quad (1.4)$$

В этом случае необходимо оценить поток в углах контрольного объема.

Для аппроксимации более высокого порядка поверхностных интегралов поток должен быть оценен в более чем двух точках. Аппроксимация четвертого порядка – правило Симпсона, которое оценивает интеграл по S_e как:

$$F_e = \int_{S_e} f dS \approx \frac{S_e}{6} (f_{ne} + 4f_e + f_{se}). \quad (1.5)$$

Здесь значения f необходимо знать в трех точках: в центре грани 'e' и двух углах 'ne' и 'se'. Чтобы сохранить точность четвертого порядка, эти значения должны быть получены интерполяцией узловых значений, по крайней мере столь же точных как правило Симпсона.

В трехмерном случае, правило середины – самая простая аппроксимация второго порядка. Аппроксимации более высокого порядка, которые требуют подынтегрального выражения в расположениях кроме центра грани ячейки (например, углах и центрах краев) возможны, но они являются более трудными для осуществления.

Если у вариации f , как предполагается, есть некоторая специфическая простая форма (например, интерполяционный многочлен), интегрирование сделать легко. Точность аппроксимации тогда зависит от порядка функций формы.

Аппроксимация интегралов по объему

Некоторые переменные в исходных дифференциальных уравнениях требуют интегрирования по всему контрольному объему. Самая простая аппроксимация второго порядка точности должна заменить интеграл по объему произведением среднего значения подынтегрального выражения и объема контрольного объема и аппроксимировать форму как значение в центре контрольного объема:

$$Q_p = \int_{\Omega} q d\Omega = \bar{q} \Delta\Omega \approx q_p \Delta\Omega, \quad (1.6)$$

где q_p замещает значение q в центре контрольного объема. Это количество легко вычисляется; так как все переменные доступны в узле P , и нет необходимости в интерполяции. Вышеупомянутая аппроксимация становится точной, если q - постоянная или изменяется линейно в пределах контрольного объема; иначе, она содержит ошибку второго порядка.

Аппроксимация высшего порядка требует значений q в большем количестве точек, чем только в центре. Эти значения должны быть получены, интерполируя значения в узлах или, эквивалентно, при использовании функций формы.

В двухмерной постановке объемный интеграл становится интегралом поверхности. Аппроксимация четвертого порядка может быть получена при использовании биквадратной функции формы:

$$q(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4y^2 + a_5xy + a_6x^2y + a_7xy^2 + a_8x^2y^2. \quad (1.7)$$

Эти девять коэффициентов получены путем приспособления функции к значениям q в девяти точках ('nw', 'w', 'sw', 'n', P , V , 'ne', 'e' и 'se',

рисунок 1.9). Интеграл может тогда быть вычислен. В двумерном случае интегрирование дает (для сеток в декартовой системе координат):

$$Q_p = \int_{\Omega} q d\Omega = \bar{q} \Delta\Omega \approx \Delta x \Delta y \times \left[a_0 + \frac{a_3}{12} (\Delta x)^2 + \frac{a_4}{12} (\Delta y)^2 + \frac{a_8}{144} (\Delta x)^2 (\Delta y)^2 \right]. \quad (1.8)$$

В этом случае должны быть определены только четыре коэффициента, но они зависят от значений q во всех девяти упомянутых выше точках. На равномерной сетке в декартовой системе координат мы получаем:

$$Q_p = \frac{\Delta x \Delta y}{36} \left[16q_p + 4q_s + 4q_n + 4q_w + 4q_e + 4q_{se} + 4q_{sw} + 4q_{ne} + 4q_{nw} \right]. \quad (1.9)$$

Так как имеется значение только в узле P , интерполяция должна использоваться так, чтобы получить q в других точках. Это должен быть, по крайней мере, четвертый порядок точности, удерживающий точность интегральной аппроксимации.

Вышеупомянутая аппроксимация четвертого порядка интеграла по объему в двумерном случае может использоваться для того, чтобы аппроксимировать поверхностные интегралы в трехмерной постановке. Аппроксимации более высокого порядка объемных интегралов в трехмерном случае являются более сложными, но могут быть найдены, используя те же самые методы.

1.4.4 Интерполяция и методы дифференцирования

Аппроксимации к интегралам требуют значений переменных в точках кроме вычислительных узлов (центрах контрольного объема). Подынтегральное выражение, обозначенное в предыдущих разделах как f , включает произведение нескольких переменных и/или переменных градиентов в следующих точках: $\Delta f = \rho \varphi v \cdot n$ для конвективного потока и $\Delta f = \Gamma \text{grad} \varphi \cdot n$ для диффузионного потока. Если предположить, что скоростное поле и свойства жидкости ρ и Γ известны во всех точках, то, чтобы вычислить конвективные и диффузионные потоки, необходимо знать значение φ и его градиента, нормального к грани ячейки в одной или

более точках на поверхности контрольного объема. Интегралы по объему источниковых членов могут также потребовать этих значений. Они должны быть выражены интерполяцией как члены значений в узлах.

Противоточная интерполяция (UD)

Аппроксимация ϕ_β его значением в узле, расположенном выше по потоку чем 'e', эквивалентна использованию обратной или прямой разностной аппроксимации для первой производной (в зависимости от направления потока), следовательно для этой аппроксимации будет название – *схема вычисления разностей против потока (UD)*. В *UD* ϕ_β аппроксимирован как:

$$\phi_e = \begin{cases} \phi_P \text{ if } (v \cdot n)_e > 0 \\ \phi_E \text{ if } (v \cdot n)_e < 0 \end{cases}.$$

Это единственная аппроксимация, которая безоговорочно удовлетворяет критерию ограничений, то есть использование этой интерполяции никогда не будет приводить к колебательным решениям. Однако, это достигается, за счет *численной диффузии*.

Разложение в ряд Тейлора по P дает (для сетки в декартовой системе координат $(v \cdot n)_e > 0$):

$$\phi_e = \phi_P + (x_e - x_P) \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_P + \frac{(x_e - x_P)^2}{2} \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \right)_P + H,$$

где H – переменные более высокого порядка. Аппроксимация *UD* сохраняет только первую переменную на правой стороне, таким образом – это схема первого уровня. Основная погрешность метода – диффузионность, то есть это напоминает диффузионный поток:

$$f_e^d = \tilde{A}_e \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_e$$

Коэффициент числовой, искусственной, или ложной диффузии $\Gamma_e^{num} = (p\mu)_e \Delta x / 2$. Эта числовая диффузия увеличивается в трехмерных задачах, если поток является наклоненным к сетке. Погрешность метода тогда создает диффузию в направлении, нормальном к потоку, такую же,

как в и направлении по течению потока, что приводит к особенно серьезной ошибке. Пики или быстрые вариации в переменных будут убраны и, так как разряд понижения ошибки – первого порядка.

Линейная интерполяция (CD)

Другая прямая аппроксимация для значения в центре грани контрольного объема – линейная интерполяция между двумя самыми близкими узлами. В месте 'e' сетки в декартовой СК имеем (рисунок 1.9 и 1.10):

$$\phi_{\bar{a}} = \phi_E \lambda_e + \phi_P (1 - \lambda_e), \quad (1.13)$$

где линейный коэффициент интерполяции λ_e определен как:

$$\lambda_e = \frac{x_e - x_P}{x_E - x_P}. \quad (1.14)$$

Уравнение (1.13) является уравнением второго порядка точности, что может быть показано при использовании разложения в ряд Тейлора ϕ в точке x_P , чтобы устранить первую производную в уравнении (1.11). Результат:

$$\phi_{\bar{a}} = \phi_E \lambda_e + \phi_P (1 - \lambda_e) - \frac{(x_e - x_P)(x_e - x_P)}{2} \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \right)_P + H.$$

Основная погрешность метода пропорциональна квадрату сеточного интервала на равномерных или неравномерных сетках.

Как со всеми аппроксимациями порядка выше первого порядка, эта схема может приводить к колебательным решениям. Это самая простая схема второго порядка. Она является наиболее широко используемой и соответствует аппроксимации центральной разности первой производной в методах МКР и получила название *CD*.

Предположение о линейной связи между узлами P и E также предлагает самую простую аппроксимацию градиента, который необходим для оценки диффузионных потоков:

$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_e \approx \frac{\phi_E - \phi_P}{x_E - x_P}.$$

При использовании разложения в ряд Тейлора вокруг ϕ_e можно показать, что погрешность метода вышеупомянутой аппроксимации:

$$e_\tau = \frac{(x_e - x_P)^2 - (x_E - x_e)^2}{2(x_E - x_P)} \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \right)_e - \frac{(x_e - x_P)^3 + (x_E - x_e)^3}{6(x_E - x_P)} \left(\frac{\partial^3 \phi}{\partial x^3} \right)_e + H.$$

Когда точка 'e' находится на середине между узлами E (например, при регулярной сетке) и аппроксимация имеет точность второго порядка, так как первый член на правой стороне обращается в нуль, и ведущий остаточный член тогда пропорционален $(\Delta x)^2$. Когда сетка неравномерна, ведущий остаточный член пропорционален произведению Δx и сеточного коэффициента расширения. Несмотря на формальную точность первого уровня, снижение ошибки на усовершенствованной сетке, подобно аппроксимации второго порядка даже на неравномерных сетках.

Квадратичная противоточная интерполяция (QUICK)

Следующее логическое уточнение должно аппроксимировать параболой переменный профиль между узлами P и E, а не прямой. Чтобы создать параболу, мы должны использовать данные в еще одной точке; в соответствии с природой конвекции, третья точка взята в расположенном выше по потоку месте, то есть W, если поток от P до E (то есть $u_x > 0$) или EE, если $u_x < 0$, рисунок 1.10. Таким образом, получаем:

$$\phi_e = \phi_u + g_1(\phi_D - \phi_U) + g_2(\phi_U - \phi_{UU}), \quad (1.15)$$

где D, U, и UU обозначают основное направление, первый расположенный выше по потоку узел, и второй расположенный выше по потоку узел, соответственно (E, P, и W или P, E, и EE, в зависимости от направления потока). Коэффициенты g_2 и g_1 могут быть выражены в терминах узловых координат:

$$g_1 = \frac{(x_e - x_U)}{(x_D - x_U)} \frac{(x_e - x_{UU})}{(x_D - x_{UU})};$$

$$g_2 = \frac{(x_e - x_U)}{(x_U - x_{UU})} \frac{(x_D - x_e)}{(x_D - x_{UU})}.$$

Для регулярных сеток берутся коэффициенты трех узловых значений, включенных в интерполяцию: $3/8$ для точки основного направления, $6/8$ для первого расположенного выше по потоку узла, $1/8$ для второго расположенного выше по потоку узла. Эта схема является несколько более сложной, чем схема *CD*: это расширяет вычислительную область на еще один узел в каждом направлении (в двумерном случае, включены узлы *EE*, *WW*, *NN* и *SS*), а на неортогональных и/или неравномерных сетках, выражения для коэффициентов g_i не просты. Леонард (1979) сделал эту схему популярной и дал ей название *QUICK* (Квадратичная противоточная интерполяция для конвективной кинематики).

У этой квадратичной схемы интерполяции есть погрешность метода третьего порядка и на равномерных и на неравномерных сетках. Это можно показать, устраняя вторую производную от уравнения (1.15) использование ϕ_w , который, на равномерной сетке в декартовой СК с $u_x > 0$, приводит:

$$\phi_a = \frac{6}{8}\phi_D + \frac{3}{8}\phi_A - \frac{1}{8}\phi_W - \frac{3(\Delta x)^2}{48} \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^3} \right)_P + H.$$

Первые три члена на правой стороне представляют аппроксимацию *QUICK*, в то время как последний член – основную погрешность метода. Когда используется эта схема интерполяции вместе с аппроксимацией правила середины поверхностного интеграла, полная аппроксимация второго порядка точности (точность аппроксимации квадратуры). Аппроксимация *QUICK* немного более точна, чем *CD*.

Другие схемы

Можно аппроксимировать ϕ_β линейной экстраполяцией от двух расположенных выше по потоку узлов, приводя к так называемой *линейной противоточной схеме (LUD)*. Эта схема имеет точность второго порядка, но она является более сложной, чем *CD*.

Также существуют различные сложные схемы, включающие в себя две или более схем интерполяции.

Реализация граничных условий

Каждый контрольный объем обеспечивает одно алгебраическое уравнение. Интегралы по объему вычислены таким же образом как для каждого контрольного объема, но потоки через грани контрольного объема, совпадающие с границей области, требуют специального обращения. Эти потоки должны быть известны, или выражены как комбинация внутренних значений и граничных условий. Так как, они не дают дополнительных уравнений, они не должны давать дополнительных неизвестных. Так как там нет узлов вне границы, эти аппроксимации должны быть основаны на односторонних разностях или экстраполяциях.

Обычно, конвективные потоки предписаны в границе притока. Конвективные потоки равны нулю в непроницаемых стенках и плоскостях симметрии, и обычно используются независимыми от координатной нормали к границе оттока; в этом случае, могут использоваться аппроксимации против потока. Диффузионные потоки иногда определяются в стенке, например, определенный поток теплоты (включая частный случай адиабатической поверхности с нулевым потоком теплоты) или предписаны граничные значения переменных. В таком случае диффузионные потоки оценены, используя односторонние аппроксимации для нормальных градиентов. Если сам градиент определен, он используется, чтобы вычислить поток, и аппроксимация для потока может использоваться в терминах узловых значений, чтобы вычислить граничное значение переменной.

Алгебраическая система уравнения

Суммируя все аппроксимации потока и источник переменных, мы создаем алгебраическое уравнение, которое связывает переменное значение в центре контрольного объема со значениями точек в нескольких соседних контрольных объемах. Номера уравнений и неизвестных равны номеру контрольных объемов, таким образом система хорошо изложена. У алгебраического уравнения для специфического контрольного объема есть

форма [6], и система уравнений для целой области решения дало матричную форму уравнение [6].

2 МЕТОДИКА СОЗДАНИЯ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ СЕТКИ ЦИЛИНДРОПОРШНЕВОЙ ГРУППЫ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ ДЛЯ НЕСТАЦИОНАРНОГО РАСЧЕТА

2.1 Подготовка расчетной модели

Построение трехмерной модели малоразмерного двигателя внутреннего сгорания осуществляется в любом САД редакторе, например *SolidWorks*, *NX UniGraphics*, *КОМПАС* (рисунок 2.1.)

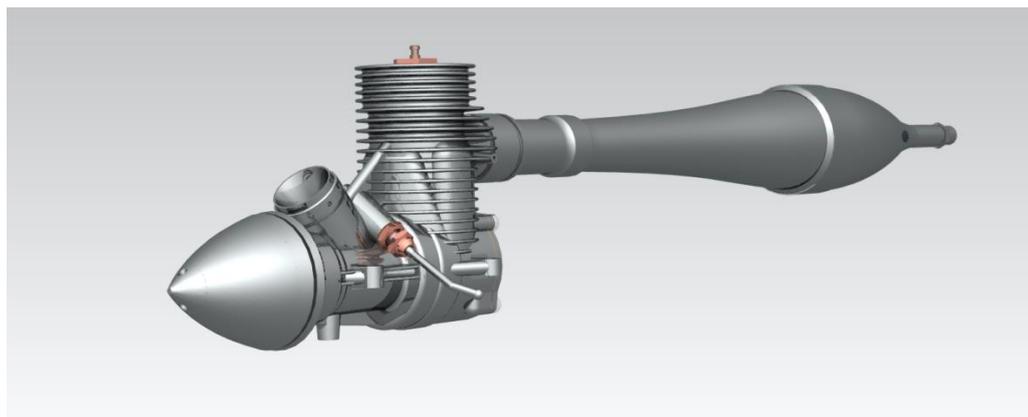


Рисунок 2.1 – Трехмерная модель малоразмерного двигателя внутреннего сгорания

Затем с помощью операций вычитания объемов выполняется построение внутреннего объема проточной части двигателя. В результате получается трехмерная модель (рисунок 2.2) готовая к созданию сеточной модели.

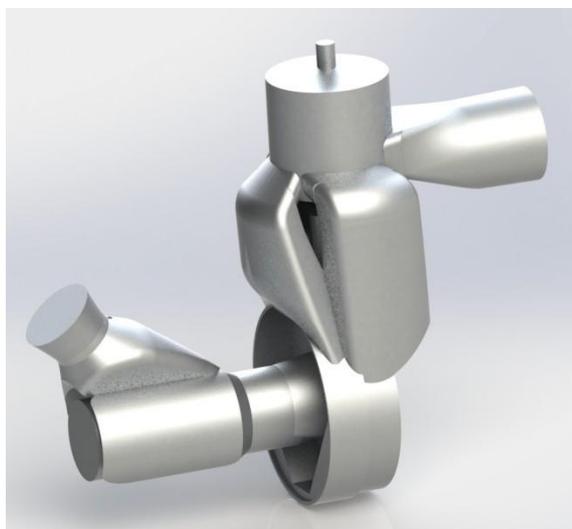


Рисунок 2.2 – Результат построения проточной части

Проточная часть двигателя должна быть рассечена на несколько объемов, согласно схеме на рисунке 2.3.

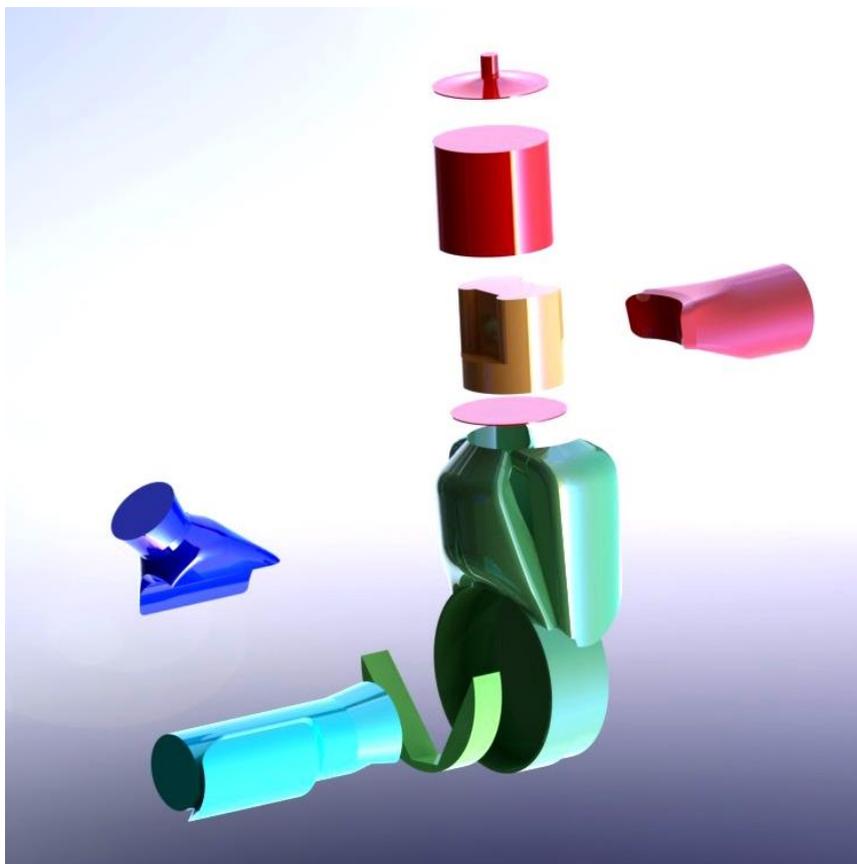


Рисунок 2.3 – Схема рассечения модели

2.2 Создание схемы проекта

Построение сетки проводится в сеткогенераторе *Meshing* на базе платформы *Workbench*. Запуск программы осуществляется нажатием на соответствующий ярлык на рабочем столе или из меню «Пуск» ОС «Windows». В результате откроется рабочее окно проекта. Далее необходимо переместить желаемый тип анализа (в данном случае *Mesh*) из панели инструментов *Toolbox Component Systems* в схему проекта *Project Schematic*. После выполнения этой операции в окне *Project Schematic* появится проект *Mesh*, как показано на рисунке 2.4.

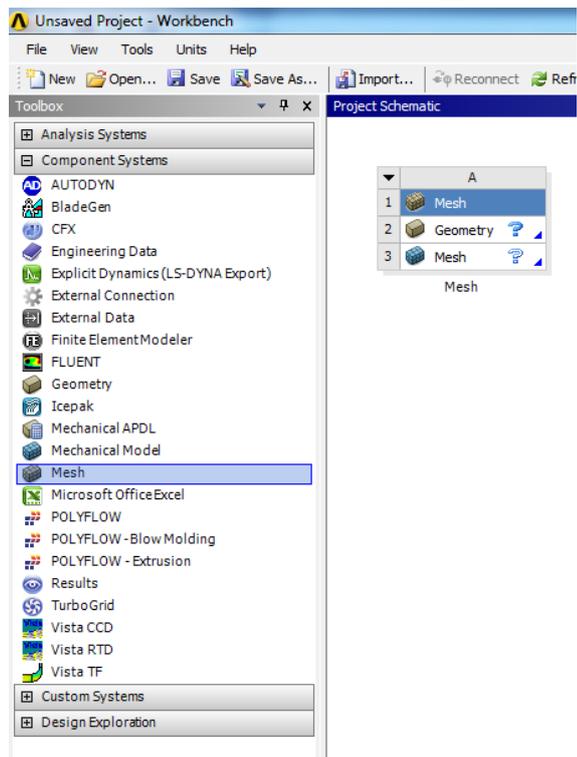


Рисунок 2.4 - Рабочее окно Workbench

2.3 Импортирование геометрии

Любое инженерное моделирование начинается с геометрии. На данный момент *ANSYS* в своем составе имеет интегрированный *CAD* редактор - *ANSYS Design Modeler*. *Design Modeler* - универсальный *CAD*-редактор с широким набором инструментов для создания новой геометрии, а также для разбиения и упрощения импортированной геометрии. Данный модуль в своей основе имеет ядро *Parasolid®*, обладает надежным, отказоустойчивым генератором геометрии и соответствует производственным стандартам. *ANSYS Design Modeler* позволяет создавать и параметризовать геометрию на основе двумерных эскизов или встроенных примитивов, а также выполнять последующие операции редактирования. Весь ход моделирования отображается в древовидной истории проекта, что позволяет изменять первоначальные параметры в любой момент создания геометрии.

Запуск программы *Design Modeler* осуществляется командой в схеме проекта: *Geometry*→*New Geometry*..

Для импортирования выполняется команда:

File→*Import External Geometry File*

Меню импортирования приведено на рисунке 2.5.

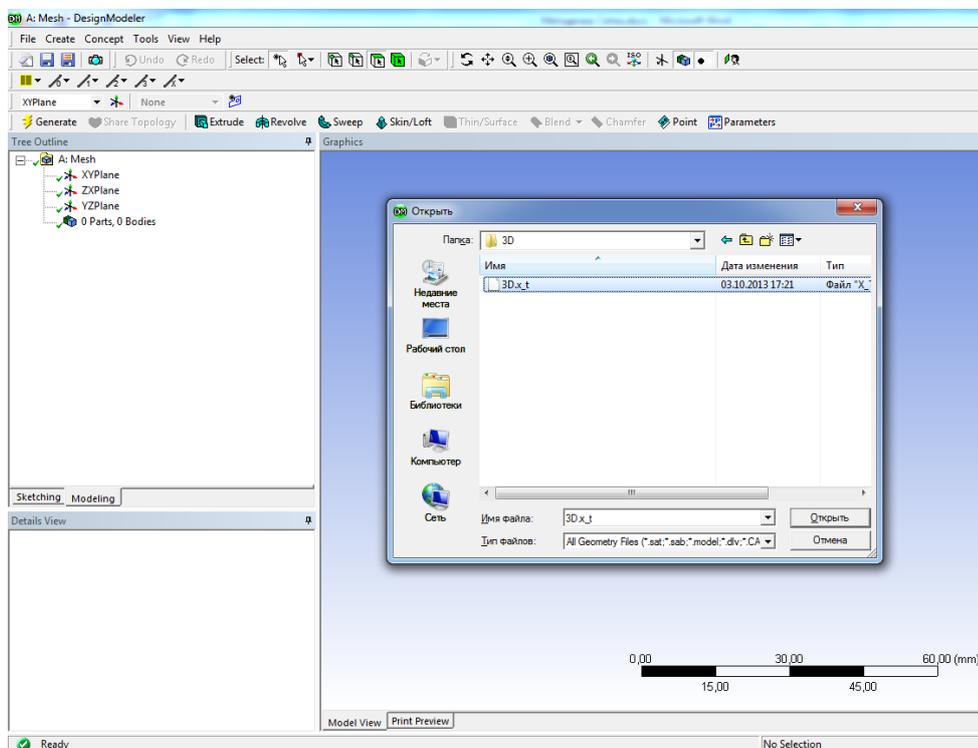


Рисунок 2.5-Меню импортирования

Весь процесс построения или изменения геометрии отображается в дереве модели. Чтобы изменения вступили в силу, была выполнена команда *Generate*, изображенная на рисунке 2.6.

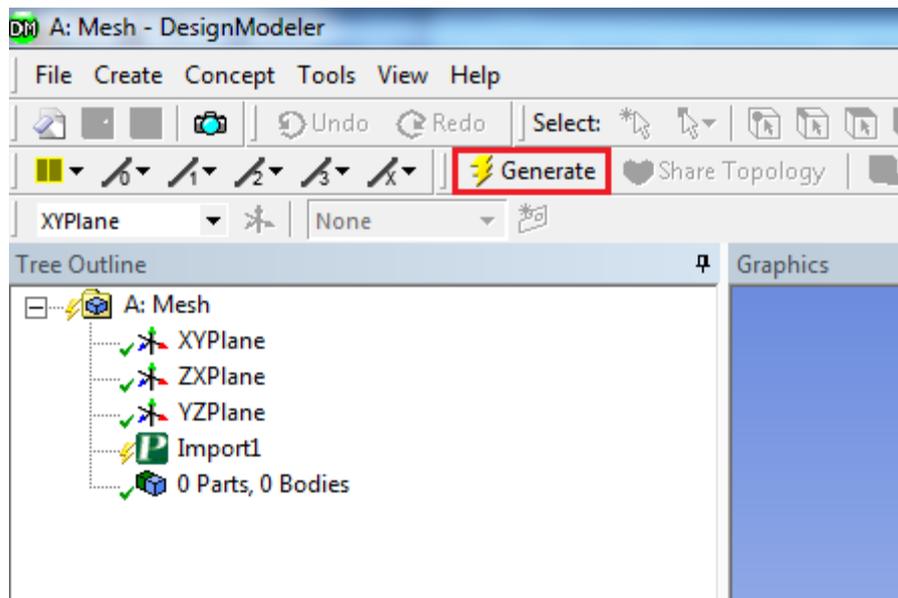


Рисунок 2.6- Дерево построения поделки

Из рисунка 2.7 видно, что модель состоит из 9 элементов. Для удобства восприятия при дальнейшей настройке расчета элементы геометрии необходимо переименовать.

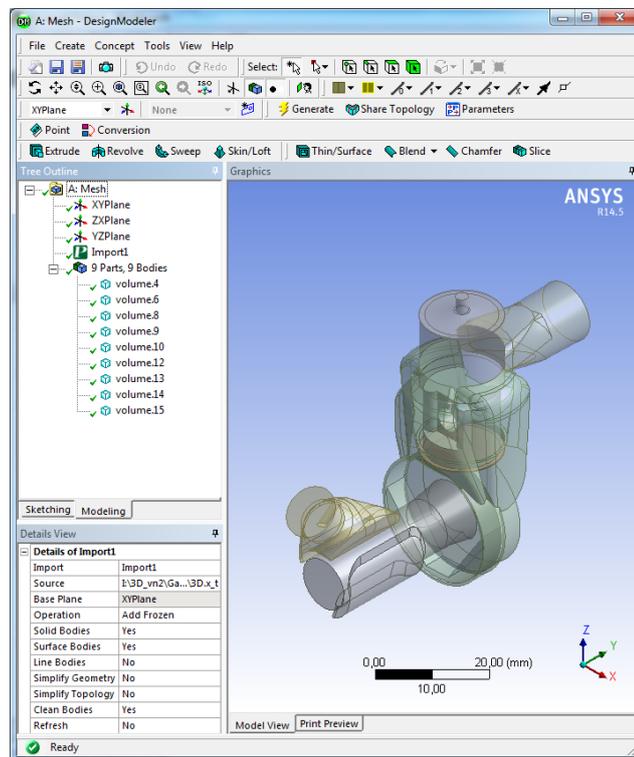


Рисунок 2.7 - Проточная часть двигателя

На этом подготовка модели завершена и окно *Design Modeler* может быть закрыто.

2.4 Создание конечно - элементной сетки

Создание сеточной модели является неотъемлемой частью процесса компьютерного инженерного моделирования (CAE). Качество сетки влияет на точность, сходимости и скорость получения решения. Кроме того, время, необходимое для создания сетки, часто занимает значительную часть в общем времени выполнения компьютерного инженерного расчета. Поэтому качественные и более автоматизированные инструменты построения сетки дают лучший результат.

Запуск программы *Meshing* осуществляется командой в схеме проекта: *Mesh* → *Edit...*

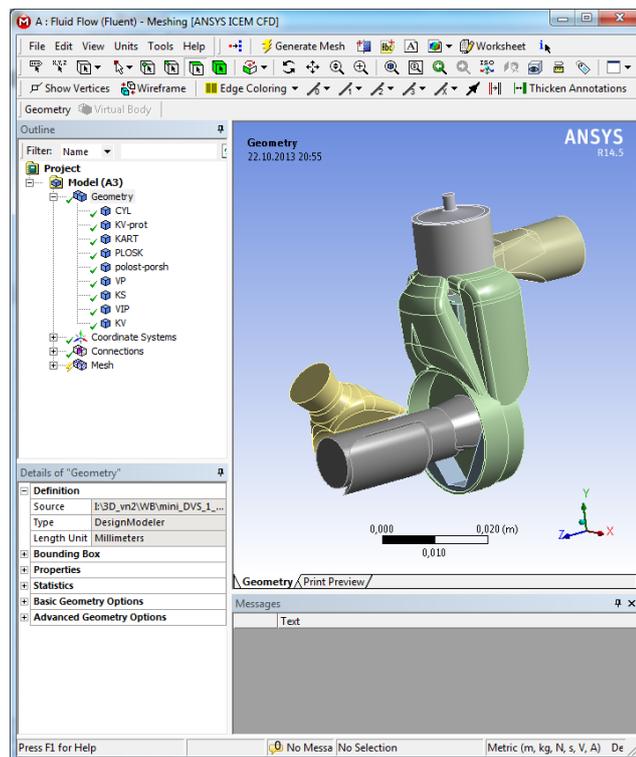


Рисунок 2.8 - Окно программы *Meshing*

Для задания параметров сетки в дереве проекта необходимо выбрать вкладку *Mesh*. Далее в окне *Details of "Mesh"* во вкладке *Sizing* необходимо выбрать алгоритм умельчения сетки (*Use Advanced Size Function*) *On: Curvature*, ввести значения максимального размера элемента *Max Face Size*

и *Max Size* 1мм и 1,5мм соответственно и градиент роста элементов сетки равный 1,05, как показано на рисунке 2.9.

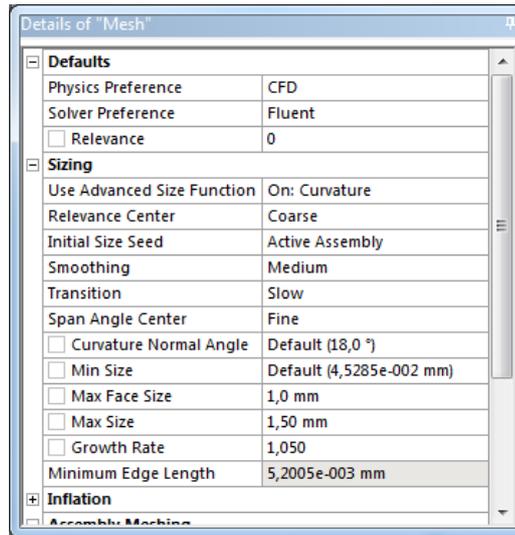


Рисунок 2.9 – Меню задания параметров сетки *Details of "Mesh"*

Для корректной работы опции послойного перестроения сетки во время расчета необходимо задать определенный размер и метод разбиения сетки в объеме цилиндра и подпоршневой области.

Для упрощения выбора нужных объемов необходимо в дереве проекта во вкладке *Geometry* выбрать все объемы кроме цилиндра и подпоршневой области и с помощью правой кнопки выбрать опцию *Hide Body*, как показано на рисунке 2.10.

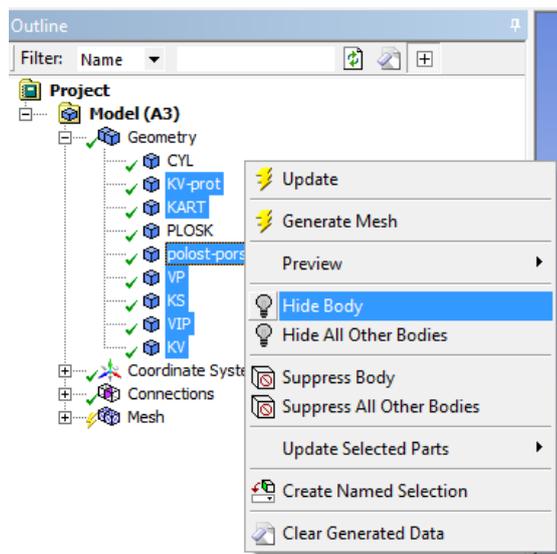


Рисунок 2.10 – Выбор опции скрытия объемов

Для задания метода разбиения сетки в дереве проекта во вкладке *Mesh* необходимо выбрать *Insert*→*Method*, как показано на рисунке 2.11.

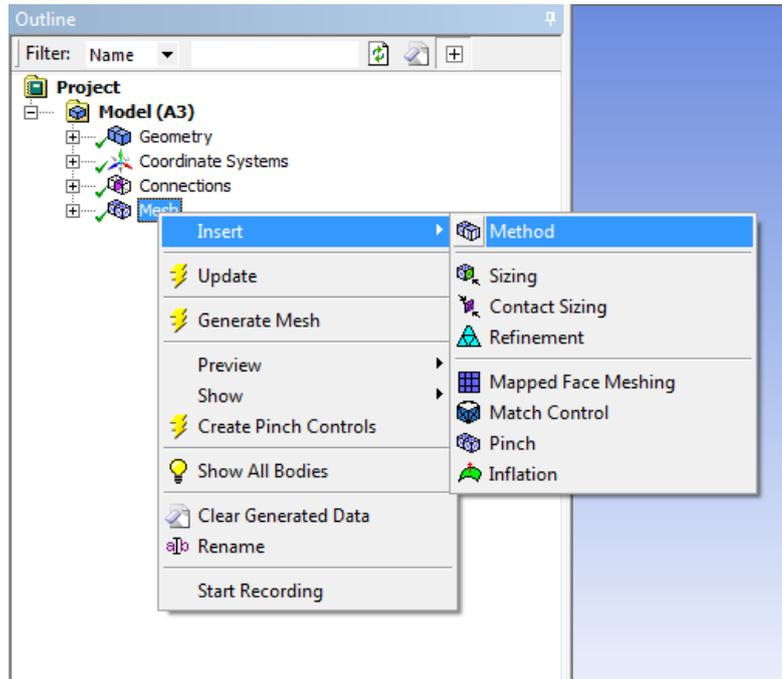


Рисунок 2.11 – Выбор опции метода разбиения сетки

Далее необходимо выбрать два оставшихся видимыми объема и нажать клавишу *Apply*, во вкладке *Method* выбрать *Hex Dominant*, как показано на рисунке 2.12.

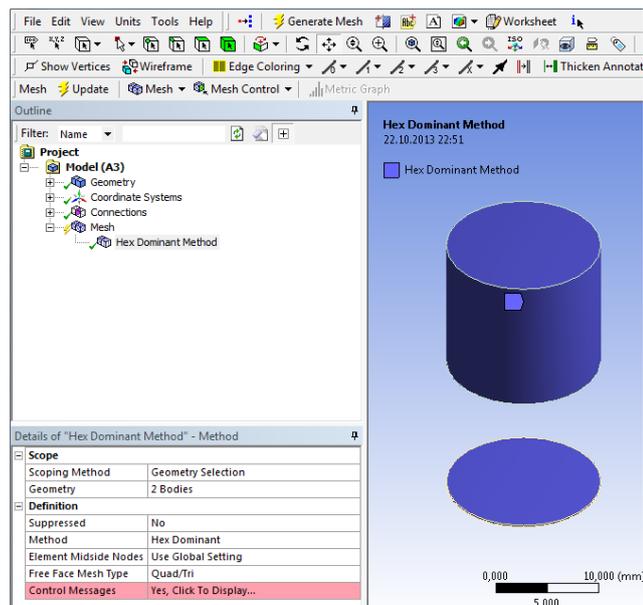


Рисунок 2.12 – Меню задания метода разбиения сетки

Для задания размера элементов сетки в дереве проекта во вкладке *Mesh* необходимо выбрать *Insert*→*Sizing*, как показано на рисунке 2.13.

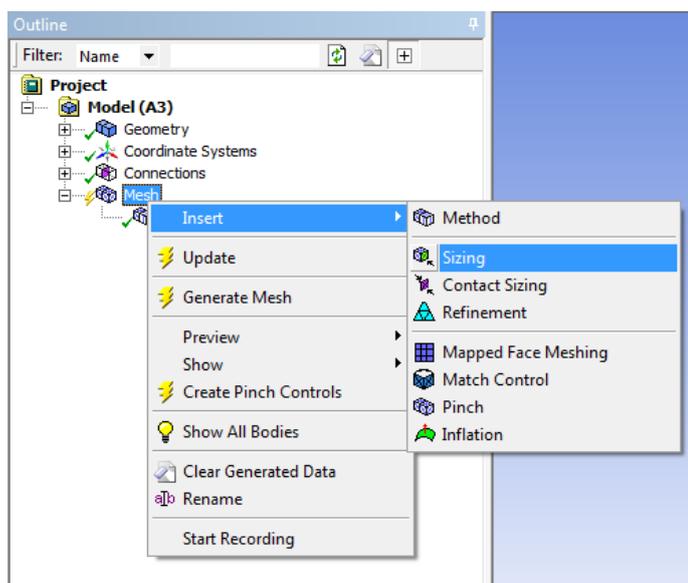


Рисунок 2.13 – Выбор опции задания размера элементов сетки

Далее необходимо выбрать два оставшихся видимых объема и нажать клавишу *Apply*, во вкладке *Element Size* ввести 0,5 мм, как показано на рисунке 2.14.

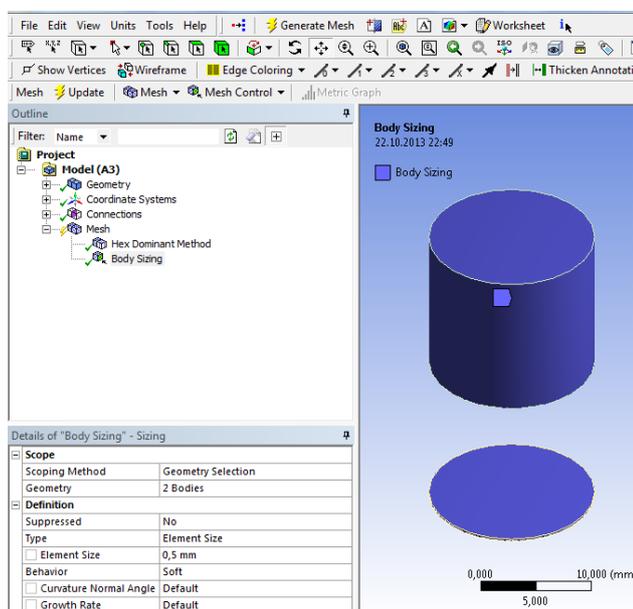


Рисунок 2.14 – Меню задания размера элементов сетки

Для построения сетки необходимо нажать клавишу *Generate Mash*, в результате будет получена сеточная модель, представленная на рисунке 2.15.

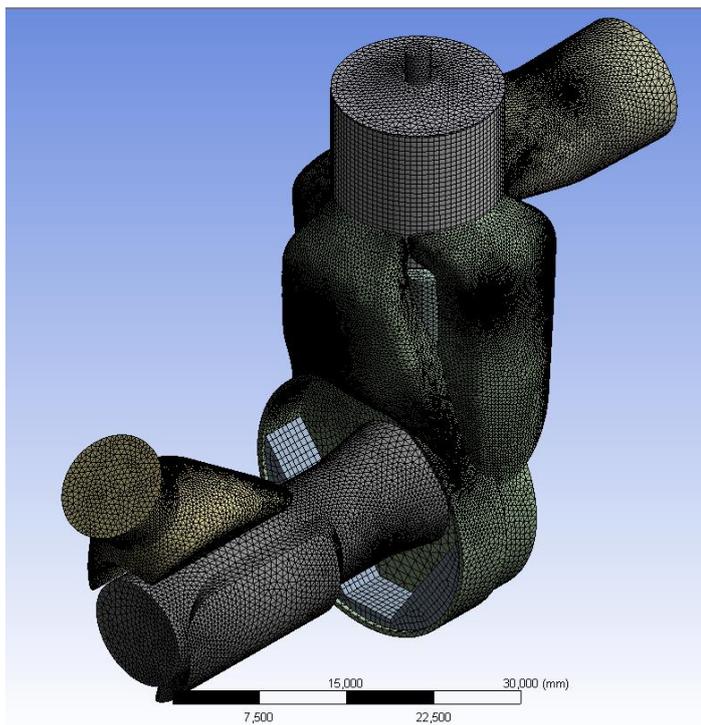


Рисунок 2.15 – Сеточная модель проточной части двигателя

2.5 Назначение граничных условий

Для назначения граничной поверхности входа необходимо выбрать соответствующую поверхность и выбрать во всплывающем меню *Create Named Selection*, как показано на рисунке 2.16.

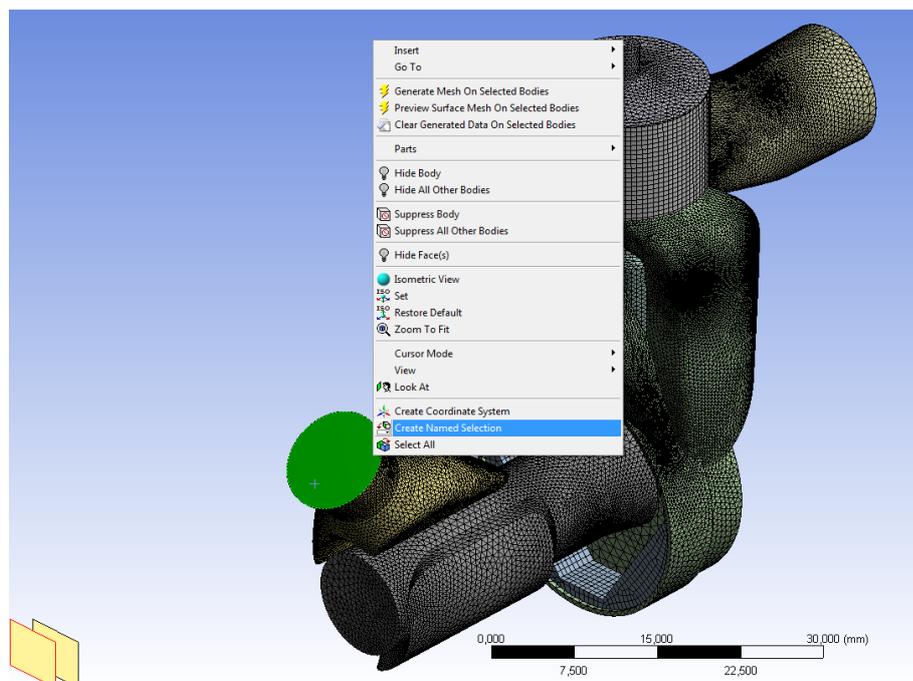


Рисунок 2.16 – Выбор входной поверхности

Затем в окне *Selection Name* необходимо ввести название, в данном случае *Inlet*, как показано на рисунке 2.17.

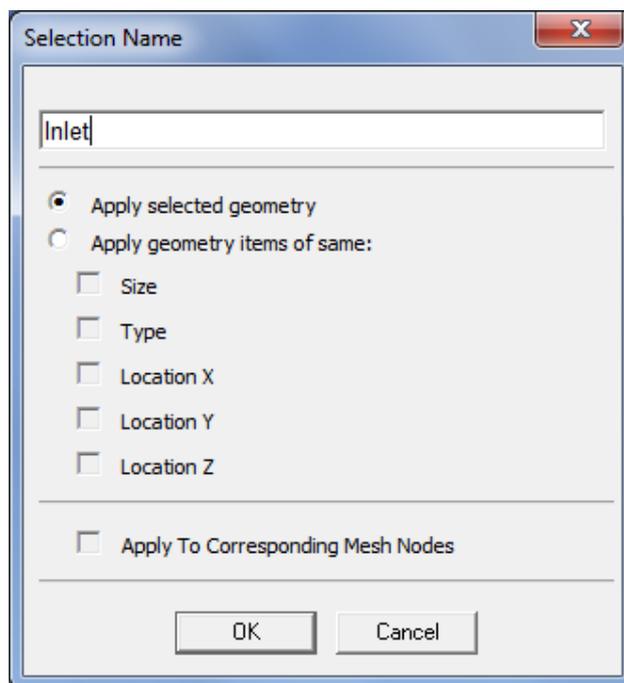


Рисунок 2.17 – Присвоение имени поверхности

Аналогичным образом выбирается выходная граница, которой присваивается имя *Outlet*.

Совпадающим поверхностям различных объемов автоматически будут присвоены названия и граничные условия проницаемости (*Interface*).

После выполнения всех выше перечисленных пунктов модель считается подготовленной к передаче для расчета в программный комплекс Ansys Fluent.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Батурин О. В. Введение в программный комплекс газодинамических расчетов Fluent (часть 1): Учебное пособие/ О. В. Батурин, И. И. Морозов, В. Н. Матвеев, И. В. Рабкесов – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007, 92с.: с ил.
2. Бирюк В. В. Расчет тепловых процессов в камере сгорания ДВС с помощью программы "FLUENT" [Электронный ресурс] : электрон. учеб. пособие / В. В. Бирюк, А. А. Горшкалев, М. Ю. Орлов, Д. А. Угланов; М-во образования и науки РФ, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т) (СГАУ). - Электрон. текстовые дан. - Самара : [б. и.], 2011. - 1 эл. опт. диск (CD-ROM).
3. Бирюк В. В. Моделирование газодинамических течений в камере сгорания ДВС с помощью программы "Fluent" [Электронный ресурс] : электрон. учеб. пособие / В. В. Бирюк, А. А. Горшкалев, М. Ю. Орлов, Д. А. Угланов; М-во образования и науки РФ, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т) (СГАУ). - Электрон. текстовые дан. - Самара : [б. и.], 2011. - 1 эл. опт. диск (CD-ROM).
4. Бирюк В. В. Моделирование тепловых процессов в камере сгорания поршневого двигателя с непосредственным впрыском [Электронный ресурс] : электрон. учеб. пособие / В. В. Бирюк, А. А. Горшкалев, С. С. Каюков, Д. А. Угланов; Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). - Электрон. текстовые и граф. дан. (11,55 Мбайт). - Самара : [б. и.], 2012. - 1 эл. опт. диск (CD-ROM).