

Министерство образования и науки Российской Федерации
Национальный исследовательский
Томский государственный университет
Физико-технический факультет

Л.Л. Миньков, К.М. Моисеева

**ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ
ЗАДАЧ ГИДРОДИНАМИКИ С ПОМОЩЬЮ
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ПАКЕТА ANSYS FLUENT**

Учебное пособие

Scientific & Technical Translations



ИЗДАТЕЛЬСТВО

Томск – 2017

ББК 22.193+22.253
УДК 532.5:519.63
М57

М57 Миньков Л.Л., Моисеева К.М. **Численное решение задач гидродинамики с помощью вычислительного пакета Ansys Fluent** : учеб. пособие. – Томск : СТУ, 2017. – 122 с.

ISBN 978-5-93629-594-2

В учебном пособии представлены приемы решения задач гидродинамики с помощью вычислительного пакета Ansys Fluent. Рассмотрено решение трех задач: ламинарное течение вязкой несжимаемой жидкости в трубе постоянного сечения, турбулентное течение вязкой несжимаемой жидкости в трубе постоянного сечения и образование косоугольного скачка уплотнения при обтекании клина сжимаемым газом. Учебное пособие составлено для магистрантов, изучающих курс «Вычислительная гидродинамика» по программе подготовки магистров по направлениям 16.04.01 – Техническая физика, 24.04.03 – Баллистика и гидроаэродинамика на физико-техническом факультете ТГУ.

Пособие будет полезно для аспирантов, преподавателей и слушателей ФПК.

ББК 22.193+22.253
УДК 532.5:519.63

Рецензенты:

- Биматов В.И. – докт. физ.-мат. наук, заведующий кафедрой динамики полета Томского государственного университета;
Борисов Б.В. – докт. физ.-мат. наук, профессор кафедры теоретической и промышленной теплотехники Томского политехнического университета.

ISBN 978-5-93629-594-2

© Л.Л. Миньков, К.М. Моисеева, 2017
© Томский государственный университет, 2017

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. ЛАМИНАРНОЕ ТЕЧЕНИЕ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ В КРУГЛОЙ ТРУБЕ	6
1.1. Описание задачи	6
1.2. Предварительные замечания.....	6
1.3. Создание проекта в ANSYS Workbench.....	7
1.4. Создание эскиза в Design Modeler	11
1.4.1. Создание поверхности	16
1.4.2. Построение сетки	17
1.4.3. Задание узлов сетки на границе области	21
1.4.4. Присвоение имен границам области	24
1.4.5. Сохранение, выход, обновление	24
1.5. Запуск ANSYS FLUENT.....	25
1.5.1. Проверка и изображение разностной сетки	27
1.5.2. Внесение данных в решатель	30
1.5.3. Задание свойств жидкости	32
1.5.4. Задание граничных условий.....	33
1.5.5. Выбор разностной схемы	36
1.5.6. Задание начальных условий	37
1.5.7. Настройка критерия сходимости	38
1.5.8. Расчет коэффициента трения	40
1.5.9. Выполнение расчетов	45
1.6. Обработка результатов расчета с помощью средств FLUENTA	47
1.6.1. Построение поля векторов скоростей	47
1.6.2. Построение изолиний модуля скорости.....	50
1.6.3. Построение профиля скорости на выходе из канала	54
1.6.4. Построение изменения давления вдоль оси канала	56
1.6.5. Контроль и проверка решения	58
1.7. Измельчение сетки.....	66
1.8. Просмотр результатов	67
1.9. Задание для самостоятельной работы	67

2. ТУРБУЛЕНТНОЕ ТЕЧЕНИЕ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ В КРУГЛОЙ ТРУБЕ	70
2.1. Описание задачи	70
2.2. Предварительные замечания.....	70
2.3. Создание проекта в ANSYS Workbench.....	71
2.4. Построение сетки.....	75
2.4.1. Задание узлов сетки на границе области	76
2.4.2. Присвоение имен границам области	77
2.4.3. Сохранение, выход, обновление	78
2.5. Запуск ANSYS FLUENT.....	79
2.5.1. Внесение данных в решатель	79
2.5.2. Задание свойств жидкости	80
2.5.3. Задание граничных условий.....	81
2.5.4. Выбор разностной схемы	82
2.5.5. Настройка критерия сходимости	83
2.5.6. Задание начальных условий	83
2.5.7. Сохранение проекта	84
2.5.8. Выполнение расчетов	84
2.6. Обработка результатов расчета	85
2.6.1. Расчет местного коэффициента трения.....	85
2.6.2. Контроль и проверка решения	88
2.7. Задание для самостоятельной работы	90
3. ЗАДАЧА О КОСОМ СКАЧКЕ УПЛОТНЕНИЯ	93
3.1. Описание задачи	93
3.2. Создание проекта в ANSYS Workbench.....	94
3.2.1. Создание эскиза.....	97
3.2.2. Создание поверхности	101
3.2.3. Построение сетки	102
3.2.4. Задание узлов сетки на границах	105
3.2.5. Присвоение имен границам области	108
3.2.6. Сохранение, выход, обновление	109
3.3. Запуск ANSYS FLUENT.....	109
3.3.1. Установки Problem Setup.....	110
3.3.2. Установки Solution.....	112
3.4. Результаты расчета	114
3.5. Задание для самостоятельной работы	119
ЛИТЕРАТУРА	120

ВВЕДЕНИЕ

Современный инженер, занимающийся гидродинамикой, обязан обладать навыками работы с современными программными комплексами, позволяющими выполнять численное моделирование сложных гидродинамических процессов. К настоящему времени разработано большое количество таких CFD комплексов, как STAR-CD, FlowVision, N3S, CFX, Fluent, FemLab, FEATFLOW и др. В последнее время широкое распространение получили программные комплексы от компании Ansys, успешно продвигающейся на рынке специализированных программных продуктов.

Целью данного учебного пособия является описание приемов работы с основными элементами программного комплекса ANSYS, такими как ANSYS Workbench, DesignModeler, Meshing и Fluent, на примере решения трех задач гидрогазодинамики: задачи о ламинарном течении вязкой несжимаемой жидкости в трубе постоянного сечения, задачи о турбулентном течении вязкой несжимаемой жидкости в трубе постоянного сечения и задачи о косо́й ударной волне, образующейся при натекании на клин идеального сжимаемого газа. Следует отметить, что данное пособие не претендует на полноту описания всех возможных приемов и средств, заложенных в пакет Ansys, для решения задач гидродинамики. В пособии приводится описание работы в Ansys версии 14.0, хотя к моменту написания пособия уже имеется версия 18, отличающаяся интерфейсом от рассматриваемой. Тем не менее, навыки работы с интерфейсом ANSYS версии 14.0 позволяют без особого труда работать с более поздними версиями ANSYS.

Пособие направлено на формирование общепрофессиональных и профессиональных компетенций в области численного моделирования гидродинамических процессов у магистрантов, обучающихся по направлениям 16.04.01 – Техническая физика и 24.04.03 – Баллистика и гидроаэродинамика.

Пособие будет также полезно аспирантам и слушателям курсов повышения квалификации, изучающих вычислительную гидродинамику.

1. ЛАМИНАРНОЕ ТЕЧЕНИЕ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ В КРУГЛОЙ ТРУБЕ

1.1. Описание задачи

Рассмотрим задачу о ламинарном течении жидкости в круглой трубе постоянного сечения, рис.1.1. Диаметр трубы $D = 0.2$ м, длина трубы $L = 8$ м. Скорость жидкости на входе в трубу $U_z = 1$ м/сек является постоянной по всему входному сечению. Жидкость вытекает в окружающую среду, давление которой равно 1 атм. Примем плотность среды $\rho = 1$ кг/м³, а коэффициент вязкости $\mu = 2 \times 10^{-3}$ Па·с. Число Рейнольдса, построенное на основе диаметра трубы, равно

$$\text{Re} = \frac{\rho U_z D}{\mu} = 100$$

Решим эту задачу, используя FLUENT с помощью ANSYS Workbench. Построим поля скорости и давления внутри трубы, и проверим полученные результаты.

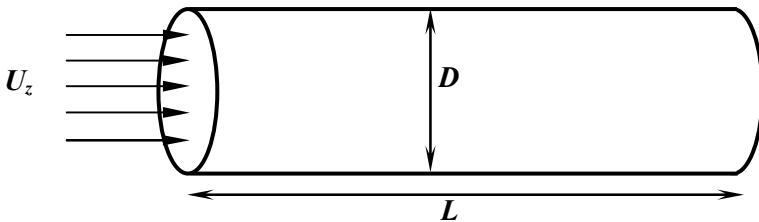


Рис. 1.1

1.2. Предварительные замечания

Мы предполагаем, что вязкий пограничный слой нарастает вдоль трубы от входного участка. В конечном итоге, он вырастает настолько, что полностью заполняет трубу (при условии, что труба достаточно длинная). Когда это происходит, поток становится полностью развитым, и профиль скорости в осевом направлении, x не изменяется (см. рис. 1.2). Из курса гидромеханики известно, что в полностью развитой области течения существует аналитическое решение основных уравнений гидромеханики.

Мы будем сравнивать численные результаты в полностью развитой области течения с соответствующими аналитическими решениями.

Какое решение ожидается для осевой скорости и коэффициента трения в полностью развитой области течения на основе аналитического решения? Какое получается численное решение для профиля скорости?

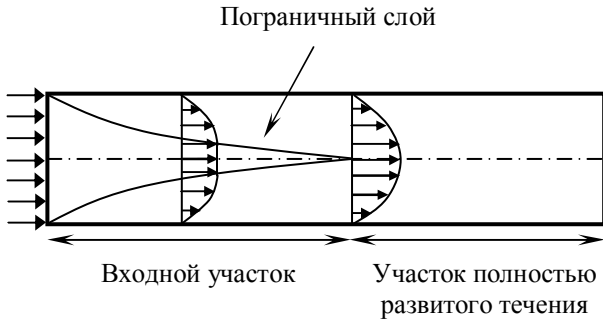


Рис. 1.2

Мы создадим геометрию и сетку в ANSYS 14.0, которая является препроцессором для FLUENT, а затем считаем сетку во FLUENT и проведем решение задачи.

1.3. Создание проекта в ANSYS Workbench

- 1) Создаем папку *pipe*, в которой будут храниться все файлы, создаваемые во время работы.
- 2) Запускаем ANSYS Workbench:

Start> All Programs> ANSYS 14.0> Workbench 14.0

На рис. 1.3 показано окно Workbench. В левой стороне окна Workbench будет находиться панель инструментов, заполненная системами для решения различных физических задач. Посередине будет находиться пустое рабочее место, где можно будет организовать свой проект. В нижней правой части окна можно увидеть сообщения от ANSYS.

- 3) Для создания проекта щелкните левой кнопкой мыши на Fluid Flow (FLUENT) в окне Analysis Systems и, удерживая ее, перетаси-

те значок в пустое пространство окна Project Schematic. После этого окно Workbench должно выглядеть так, как показано на рис. 1.4.

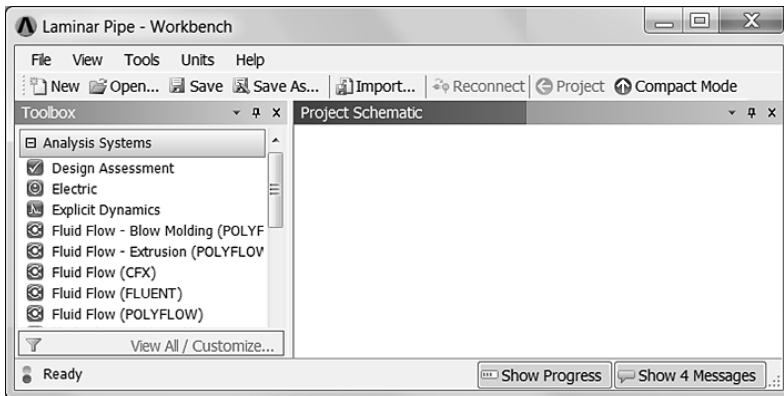


Рис. 1.3

- 4) Сохраните проект под именем **Laminar Pipe**.
- 5) В окне Project Schematic (окна Workbench) кликните правой кнопкой мышки на Geometry и выберите Properties, как показано на рис. 1.5. В правой части окна Workbench появится окно Property of Schematic.
- 6) В окне Property of Schematic, рис. 1.6, в разделе Advance Geometry Options измените значение Analysis Type на 2D. Это означает, что далее будет выполняться построение двумерной области.
- 7) В окне Project Schematic дважды кликните на Geometry чтобы начать подготовку построения геометрической области. При этом произойдет запуск программы ANSYS Design Modeler. Вам будет предложено выбрать желаемую единицу измерения длины, рис. 1.7. Выберите метры и нажмите ОК.

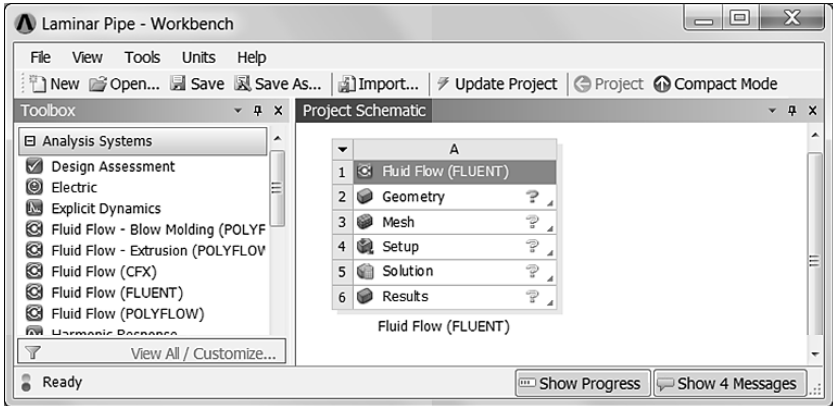


Рис. 1.4

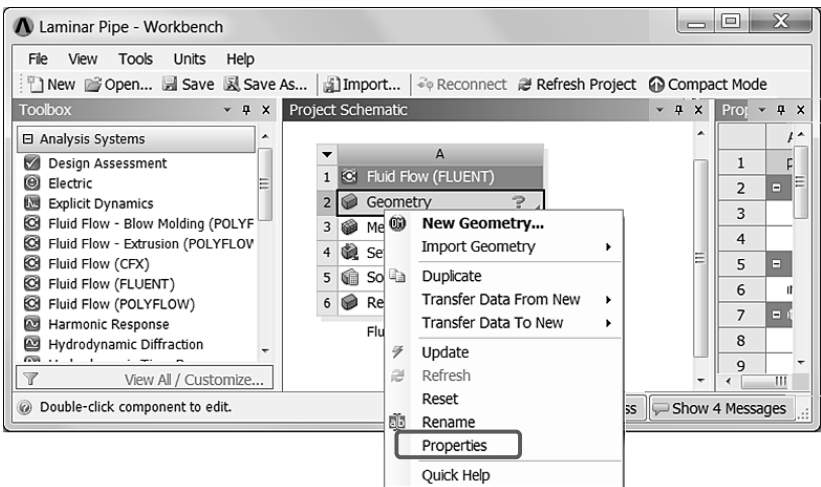


Рис. 1.5

Properties of Schematic A2: Geometry		
	A	B
1	Property	Value
2	[-] General	
3	Component ID	Geometry
4	Directory Name	FFF
5	[-] Geometry Source	
6	Geometry File Name	
7	[-] Basic Geometry Options	
8	Solid Bodies	<input checked="" type="checkbox"/>
9	Surface Bodies	<input checked="" type="checkbox"/>
10	Line Bodies	<input type="checkbox"/>
11	Parameters	<input checked="" type="checkbox"/>
12	Parameter Key	DS
13	Attributes	<input type="checkbox"/>
14	Named Selections	<input type="checkbox"/>
15	Material Properties	<input type="checkbox"/>
16	[-] Advanced Geometry Options	
17	Analysis Type	2D <input type="button" value="v"/>
18	Use Associativity	<input checked="" type="checkbox"/>
19	Import Coordinate Systems	<input type="checkbox"/>
20	Import Work Points	<input type="checkbox"/>
21	Reader Mode Saves Updated File	<input type="checkbox"/>
22	Import Using Instances	<input checked="" type="checkbox"/>
23	Smart CAD Update	<input type="checkbox"/>
24	Enclosure and Symmetry Processing	<input checked="" type="checkbox"/>
25	Decompose Disjoint Faces	<input checked="" type="checkbox"/>
26	Mixed Import Resolution	None <input type="button" value="v"/>

Рис. 1.6

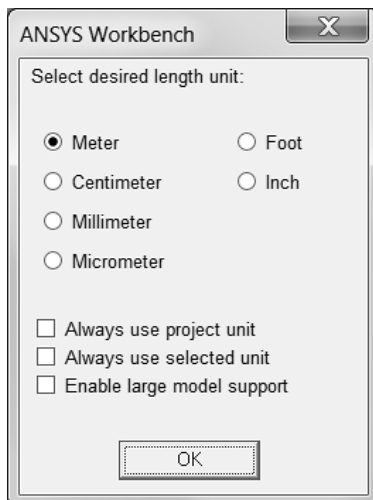



Рис. 1.7

1.4. Создание эскиза в Design Modeler

- 1) Открывшееся окно программы Design Modeler имеет вид, рис. 1.8.
- 2) В панели Graphics в нижнем правом углу кликните левой кнопкой мыши по оси +Z. После этого плоскость XY совпадет с плоскостью экрана. (Ось +Z будет смотреть на вас), рис. 1.9.
- 3) Чтобы приблизить или отдалить изображение на панели Graphics, следует кликнуть левой кнопкой мыши по панели и, вращая колесико мышки, можно добиться желаемого результата. Если возникает необходимость переместить изображение влево, вправо, вверх, вниз, то следует кликнуть правой кнопкой мыши и в контекстном меню выполнить следующую последовательность дей-

ствий: Cursor Mode→Pan. После этого курсор примет форму . Кликнув по панели Graphics левой кнопкой мыши и удерживая ее, можно перемещать изображение в любом направлении.

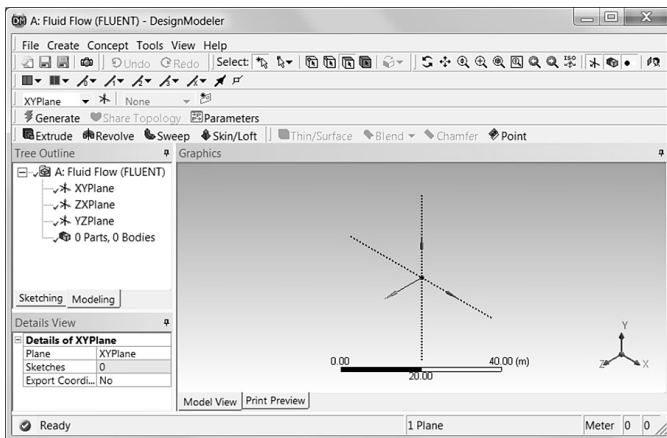


Рис. 1.8

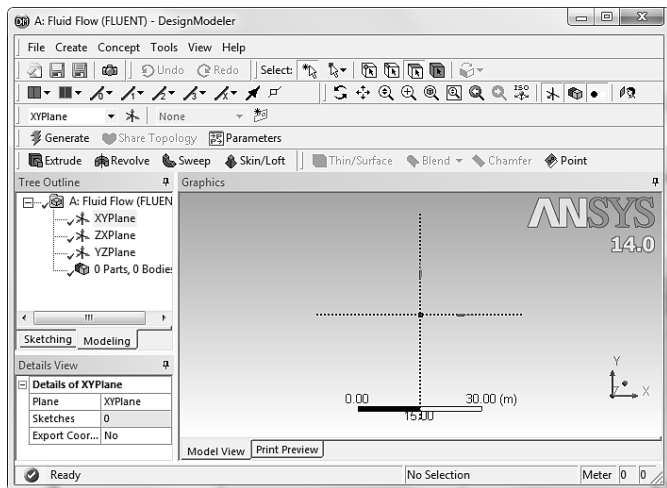


Рис. 1.9

- 4) Эскиз будем создавать в плоскости XY. Для этого на панели Tree Outline кликните по XYPlane (рис. 1.9). В левом нижнем углу панели Tree Outline выберите закладку Sketching. Вместо панели Tree Outline появится панель Sketching Toolboxes – панель инструментальных средств для построения эскиза, рис. 1.10. По умолчанию открывается набор инструментов Draw.

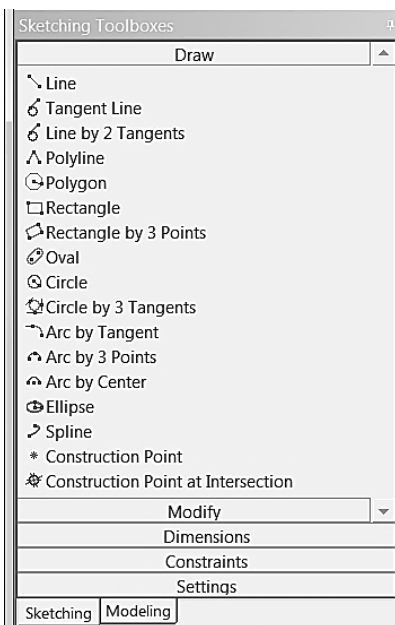


Рис. 1.10

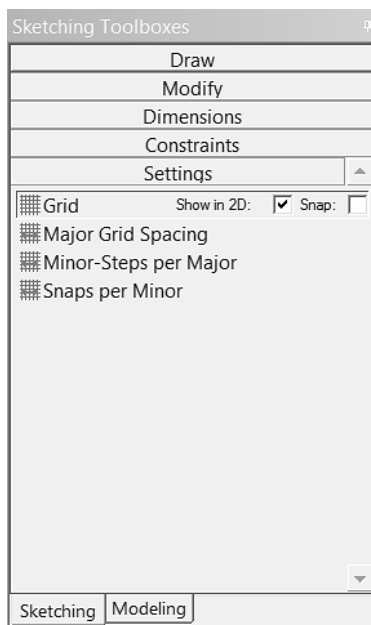


Рис. 1.11

- 5) Перед построением области покажем координатную сетку. Для этого на панели Sketching Toolboxes кликните по табулятору Settings, находящемуся внизу панели, затем – по инструменту Grid и напротив Show in 2D установите галочку, рис. 1.11. После этого на панели Graphics будет показана координатная сетка, расстояние между координатными линиями по умолчанию равно 5 м.

- 6) На панели Sketching Toolboxes выберите Rectangle. На панели Graphics создайте прямоугольник, кликая левой кнопкой мыши в начале координат и, затем, где-нибудь в первом квадранте плоскости XY. Если курсор вести вдоль одной из осей, то рядом с курсором появляется буква С, если курсор поместить в начало координат, то рядом с ним появляется буква Р. Приблизьте рисунок, вращая колесико мышки, и сдвиньте его влево, рис. 1.12.

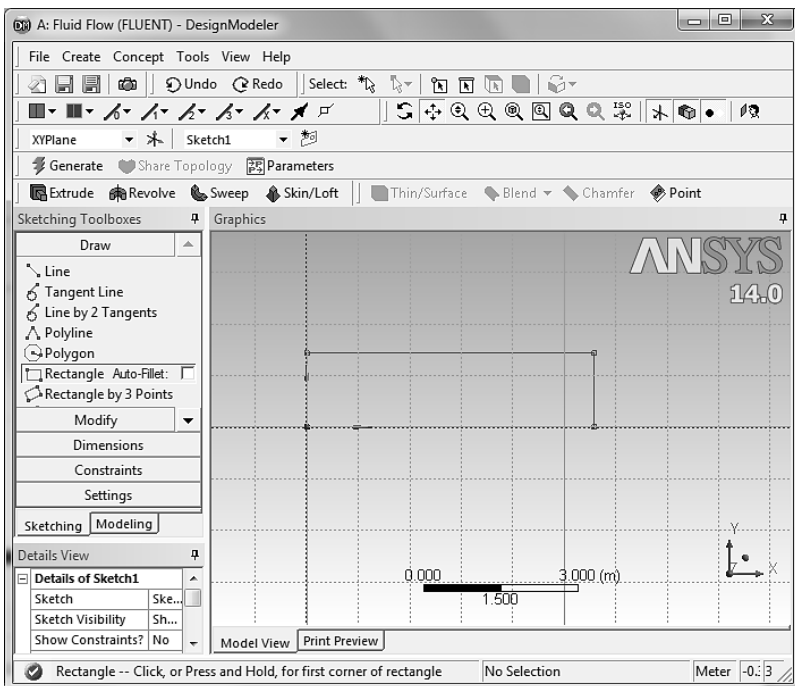


Рис. 1.12

- 7) Нанесем размеры на прямоугольник. На панели Sketching Toolboxes выбираем табулятор Dimensions. На панели Graphics подводя курсор к верхней стороне прямоугольника, нажимая и удерживая левую кнопку мыши отводим курсор вверх. При этом появятся линии разметки. Такие же действия проделываем с левой стороной прямоугольника, только курсор отводим влево, рис. 1.13.
- 8) На панели Details View, которая находится под панелью Sketching Toolboxes, в группе Dimensions:2 устанавливаем $H1=8$, а $V2=0.1$, рис. 1.14.

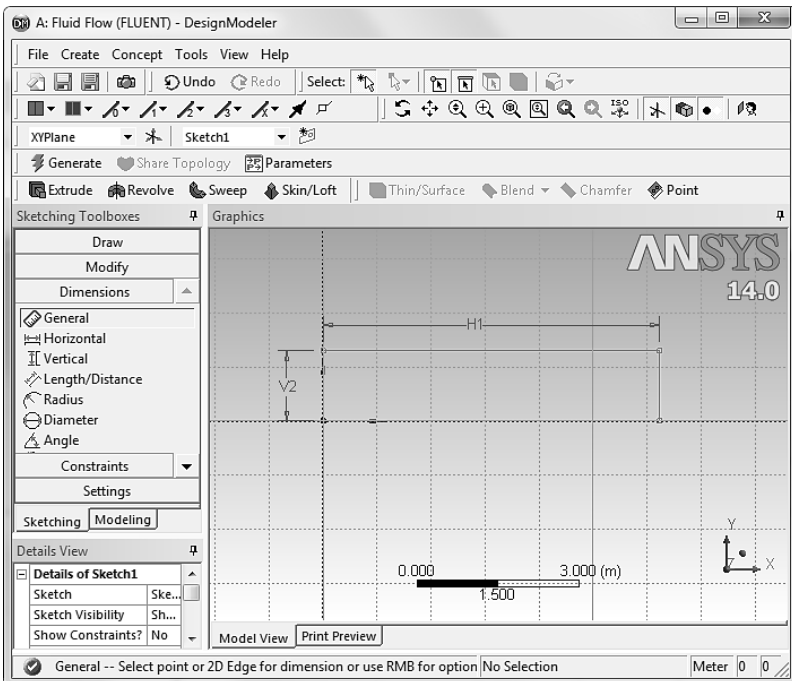


Рис. 1.13

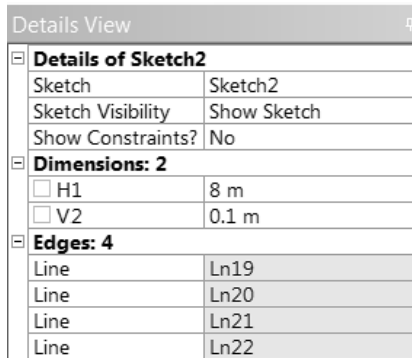


Рис. 1.14

1.4.1. Создание поверхности

- 1) Для создания поверхности выбираем в меню Concept, а затем Surface From Sketches, как показано на рис. 1.15.
- 2)

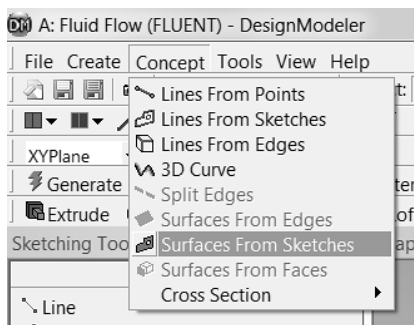


Рис. 1.15

- 3) На панели Tree Outline (закладка Modeling) кликните по Sketch1.
- 4) На панели Details View, выберите Sketch1 как Base Objects и затем напротив Thickness (≥ 0) выберите толщину 0.1m и кликните Ar-

ply. Окончательно кликните Generate, чтобы сгенерировать поверхность, рис. 1.16.

- 5) На этом можно закрыть Design Modeler и вернуться в Workbench Project Schematic для построения разностной сетки.

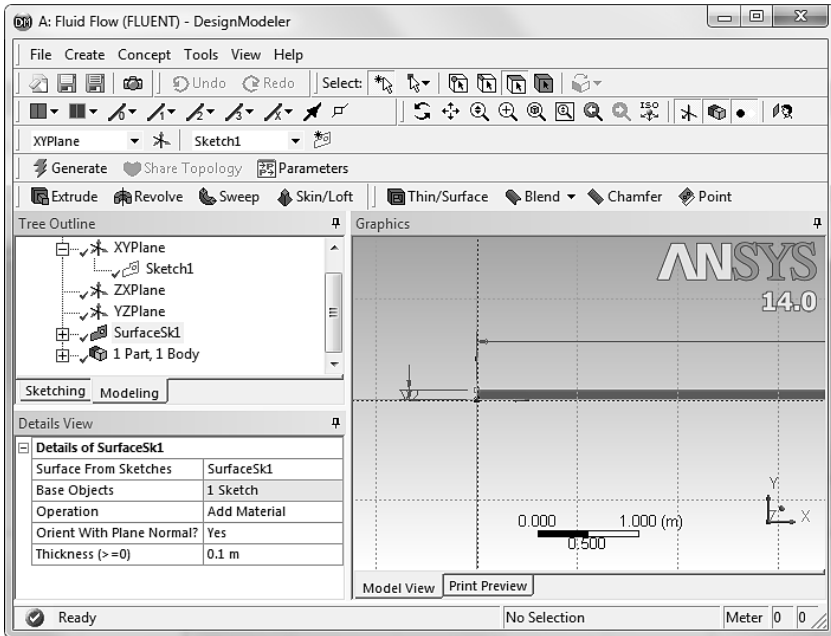


Рис. 1.16

1.4.2. Построение сетки

Сетка будет состоять из 500 элементов, в продольном направлении выбираем 100 элементов, а в поперечном 5 элементов.

- 1) В Workbench дважды кликаем по Mesh. При этом запускается программа Meshing, рис. 1.17.
- 2) Сетку можно создать двумя способами: а) первый – кликнуть правой кнопкой мыши по Mesh в панели Outline и в контекстном

меню выбрать Generate Mesh, рис. 1.18; б) второй – кликнуть в строке инструментов, находящейся под главным меню на Mesh, а затем на Generate Mesh, рис. 1.19.

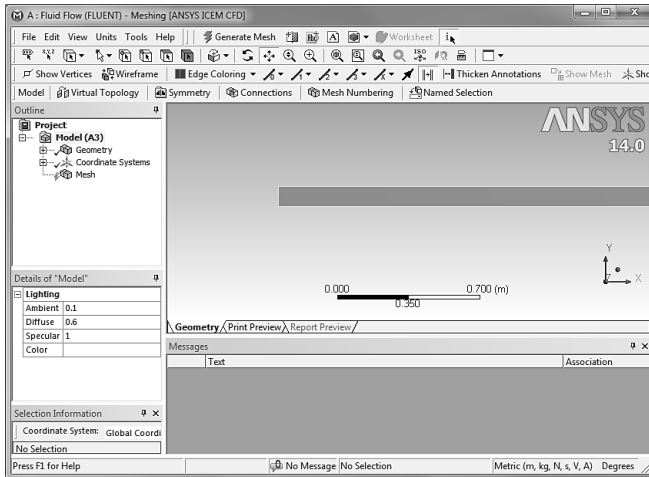


Рис. 1.17

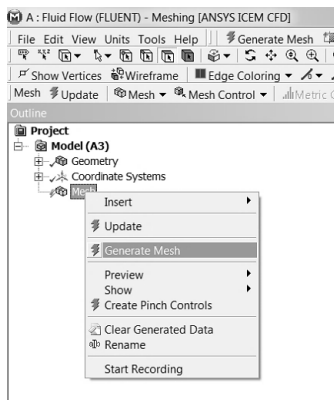


Рис. 1.18

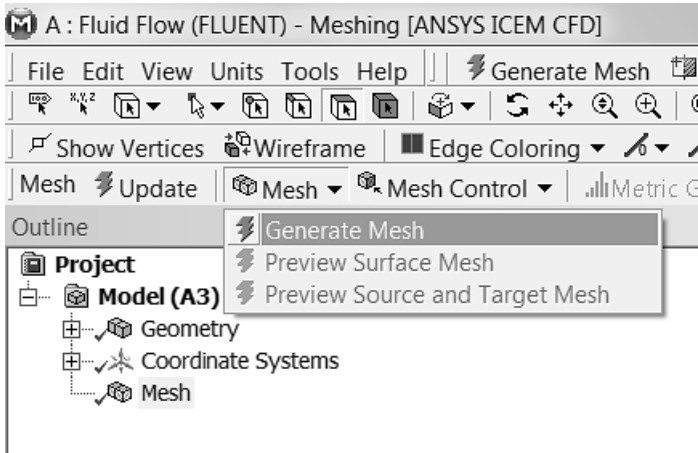



Рис. 1.19

- 3) Результат будет выглядеть следующим:



- 4) Далее применяют стиль Mapped Face Meshing. Чтобы включить этот стиль выполняют последовательность Mesh Control → Mapped Face Meshing, рис. 1.20.
- 5) Затем кликают по геометрической области, после чего она окрашивается в зеленый цвет: Если этого не происходит, то следует кликнуть по фильтру Face , находящейся на панели инструментов. После этого кликают Apply на панели Details of “Mapped Face Meshing”, рис. 1.21, после чего панель принимает вид, рис. 1.22, а геометрическая область окрашивается в фиолетовый цвет и принимает вид, рис. 1.23.

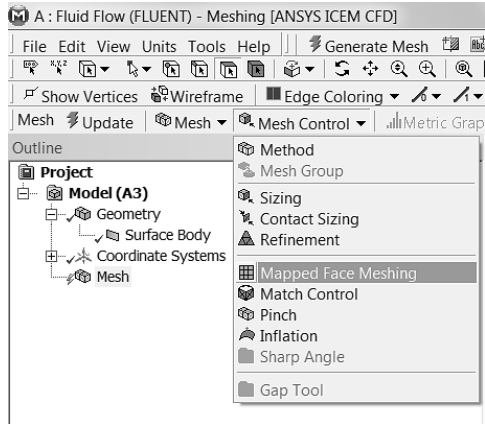


Рис. 1.20

Details of "Mapped Face Meshing" - Mapped Face Meshing

Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	Apply Cancel
Definition	
Suppressed	No
Method	Quadrilaterals
<input type="checkbox"/> Radial Number of Divisions	Default
Constrain Boundary	No

Рис. 1.21

Details of "Mapped Face Meshing" - Mapped Face Meshing

Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
Definition	
Suppressed	No
Method	Quadrilaterals
Constrain Boundary	No
Advanced	
Specified Sides	No Selection
Specified Corners	No Selection
Specified Ends	No Selection

Рис. 1.22

Рис. 1.23.

1.4.3. Задание узлов сетки на границе области

- 1) Желаемая сетка имеет заданное число разбиений вдоль радиального и осевого направлений. Для задания определенного числа разбиений следует использовать Edge Sizing. Сначала зададим число разбиений вдоль осевого направления. Для этого кликаем Mesh Control > Sizing как показано ниже, рис. 1.24. Панель Details of “Sizing” принимает вид, рис. 1. 25.

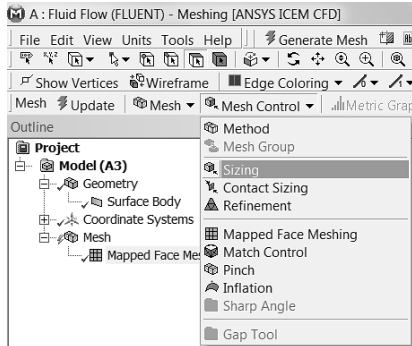


Рис. 1.24

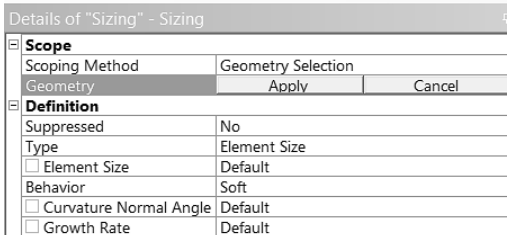



Рис. 1.25

- 2) Сначала кликаем по фильтру Edge , который находится в панели инструментов под строкой меню, (доступ к этому фильтру можно получить и через контекстное меню в строке Cursor Mode). Затем подвдвим курсор к нижней границе прямоугольника, (она при этом окрасится в зелены йцвет), нажимаем левую кнопку мыши, и не опуская ее переводим курсор к верхней границе прямоугольника. После этой процедуры обе границы должны быть окрашены в зеленый цвет. После этого кликаем Apply на панели Details of “Sizing”, рис. 1.25.
- 3) На панели Details of “Sizing” в строке Type выбираем Number of Divisions, рис. 1.26 и устанавливаем значение 100, рис. 1.27.

Details of "Edge Sizing" - Sizing	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	2 Edges
Definition	
Suppressed	No
Type	Element Size
<input type="checkbox"/> Element Size	Element Size
Behavior	Number of Divisions
<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	Sphere of Influence
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default
Bias Type	No Bias

Рис. 1.26

Details of "Edge Sizing" - Sizing	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	2 Edges
Definition	
Suppressed	No
Type	Number of Divisions
<input checked="" type="checkbox"/> Number of Divisions	100
Behavior	Soft
<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	Default
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default
Bias Type	No Bias

Рис. 1.27

- 4) Прodelываем аналогичную процедуру с п.1 по п.3 для левой и правой границы, с той лишь разницей, что в разделе Number of Divisions устанавливаем значение 5.
- 5) После этого в строке меню кликаем Generate Mesh. После всех выполненных операций окно программы Meshing будет выглядеть следующим образом:

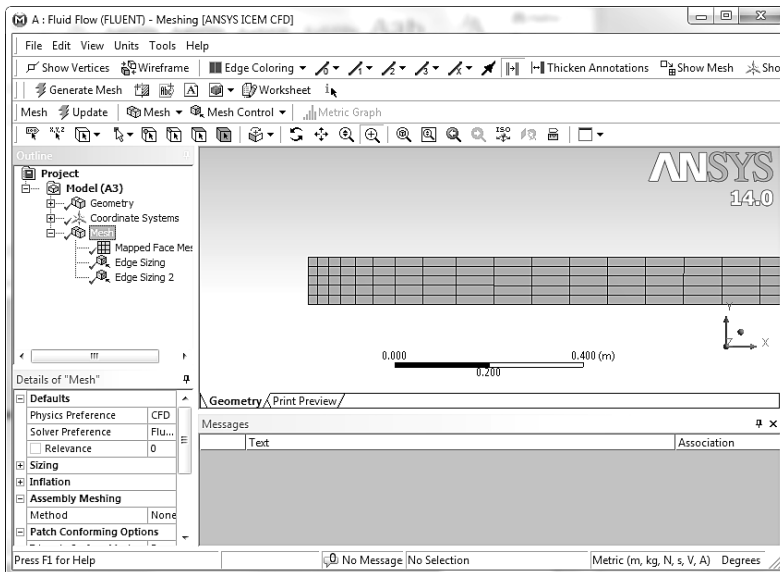



Рис. 1.28

- 6) В разделе статистика панели Details of “Mesh” (предварительно кликнув на Mesh панели Outline) можно видеть, что число элементов получилось не равно 500. Программа автоматически построила сетку, опираясь на минимальный размер шага вдоль радиального направления. Чтобы получить ровно 500 элементов следует в разделе Behavior панелей Details of “Edge Sizing” и Details of “Edge Sizing 2” сменить значение Soft на значение Hard. После чего выполнить Generate Mesh.

1.4.4. Присвоение имен границам области

Левую границу области назовем Inlet, правую – Outlet, нижнюю – Axis, верхнюю Wall. Эти имена пригодятся на последующих шагах при построении модели с помощью программы Fluent.

- 1) Выполнить клик правой кнопкой мыши по свободному полю, где нарисована область с построенной сеткой. Из строки Cursor Mode выбрать фильтр Edge . Подвести курсор к левой границе, когда она окрасится в зеленый цвет, выполнить левый клик мышкой, после этого выполнить правый клик мышкой. В появившемся контекстном меню выбрать Create Named Selection, рис. 1.29.
- 2) Появится окно Selection Name, рис. 1.30, в которое следует ввести Inlet. Нажать ОК. Подобную операцию проделать со всеми границами, вводя соответствующие имена.

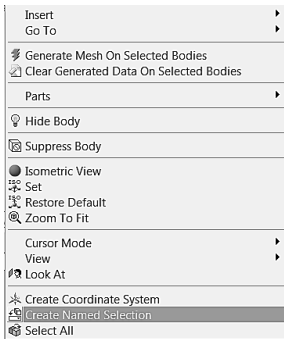


Рис. 1.29

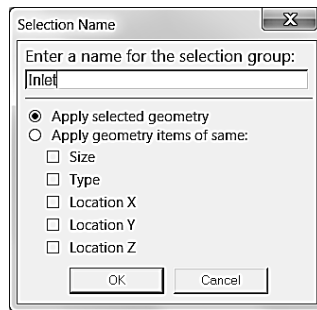



Рис. 1.30

1.4.5. Сохранение, выход, обновление

- 1) Сохраните проект. File→Save project
- 2) Закройте окно Meshing. File→ Close Meshing.

- 3) Перейдите в окно Workbench и обновите проект, нажав на кнопку Update Project,  Update Project, которая находится под строкой меню.

1.5. Запуск ANSYS FLUENT

Схема вашего проекта (Project Schematic) в Workbench должна иметь вид примерно такой же, как показано на рис. 1.31. При этом напротив Geometry и Mesh должны стоять галочки.

- 1) Чтобы считать геометрию и сетку во FLUENT кликните правой кнопкой мыши по Setup и в контекстном меню выберите Refresh, рис. 1.32.
- 2) После чего, вы кликаете на Update. В правой части ячейки Setup должен появиться знак вопроса, который означает, что процесс еще не завершен.
- 3) Дважды кликните на Setup. Загрузится FLUENT Launcher.
- 4) В разделе Options поставьте галочку рядом Double Precision, рис. 1.33.
- 5) Нажмите на ОК. FLUENT будет запущен.

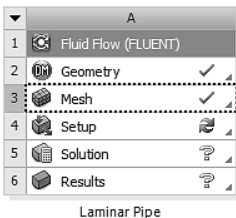


Рис. 1.31

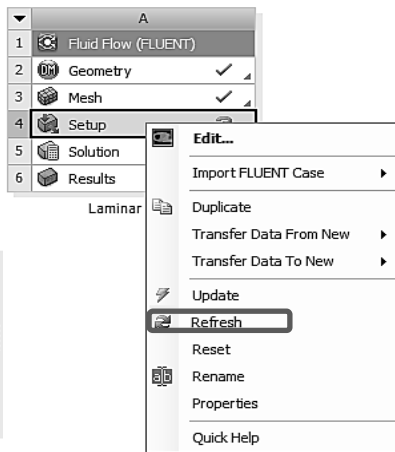


Рис. 1.32

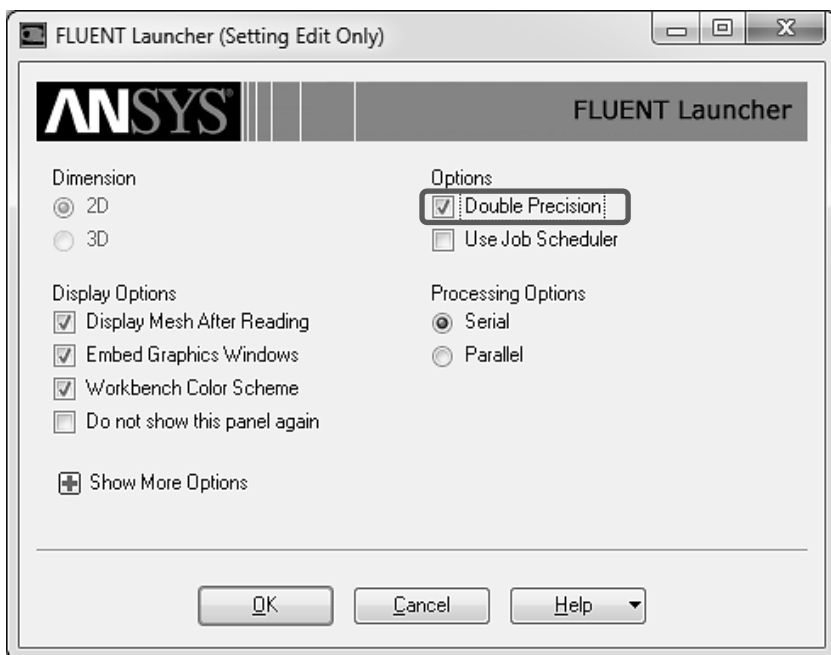


Рис. 1.33

Во FLUENTе можно будет выбрать уравнения и установить краевые условия, соответствующие рассматриваемой краевой задаче.

Рабочее окно FLUENTа имеет вид, показанный на рис. 1.34.

В левой части рабочего окна FLUENT находятся три основных элемента: Problem Setup, Solution и Results. С помощью этих элементов настраивают физическую модель, выбирают метод решения, обрабатывают результаты решения задачи. В правой части окна расположены панель графики и панель команд. В верхней части находится строка меню, через которую осуществляется доступ ко всем элементам пакета FLUENT.

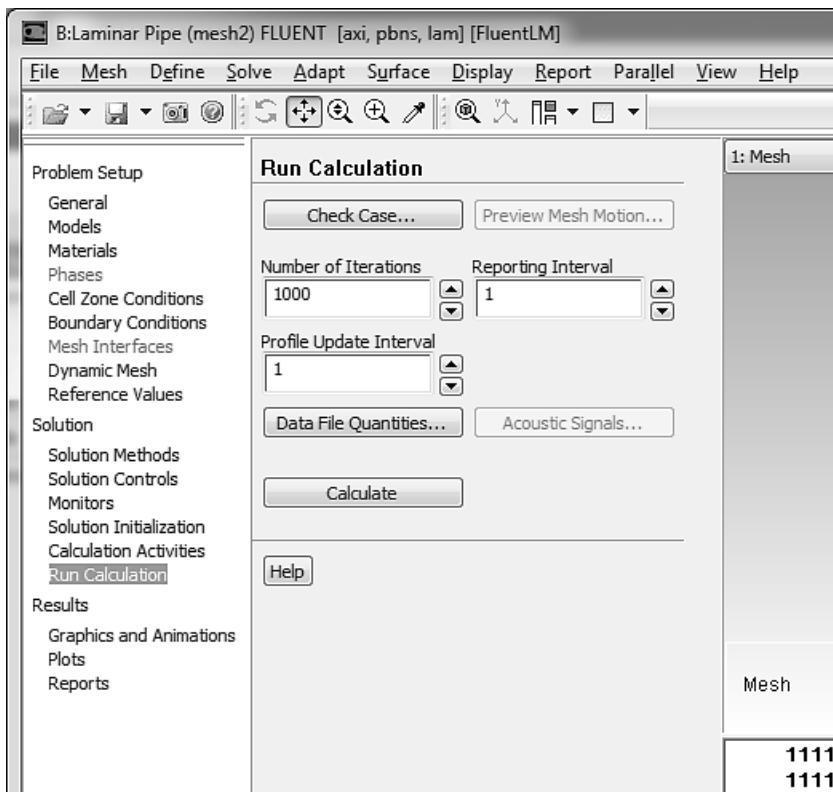


Рис. 1.34

1.5.1. Проверка и изображение разностной сетки

Сначала необходимо проверить разностную сетку, чтобы убедиться, что она была правильно импортирована из Workbench.

- 1) Для получения статистики о сетке через строку меню выполните следующие действия Mesh→Info→Size.
- 2) На панели команд появится информация о сетке, рис. 1.35.

Mesh Size

Level	Cells	Faces	Nodes	Partitions
0	500	1105	606	1

1 cell zone, 5 face zones.

Рис. 1.35.

Сетка содержит 500 элементов, которые во FLUENTE называются ячейками (cells).

- 3) Далее необходимо проверить сетку на наличие ошибок, для чего через меню следует выполнить команду Mesh→Check. На панели команд появится информация, рис. 1.36.

Mesh Check

Domain Extents:

x-coordinate: min (m) = 0.000000e+00, max (m) = 8.000000e+00

y-coordinate: min (m) = 0.000000e+00, max (m) = 1.000000e-01

Volume statistics:

minimum volume (m3): 1.005309e-04

maximum volume (m3): 9.047834e-04

total volume (m3): 2.513274e-01

minimum 2d volume (m3): 1.599998e-03

maximum 2d volume (m3): 1.600008e-03

Face area statistics:

minimum face area (m2): 2.000000e-02

maximum face area (m2): 8.000040e-02

Checking mesh.....

Done.

Рис. 1.36

Отсутствие сообщения об ошибке будет говорить о том, что разностная сетка была импортирована правильно.

- 4) Для изображения сетки в графическом окне следует в разделе Problem Setup, который находится в левой части рабочего окна, выбрать General, затем кликнуть по кнопке Display. Появится окно Mesh Display, рис. 1.37.

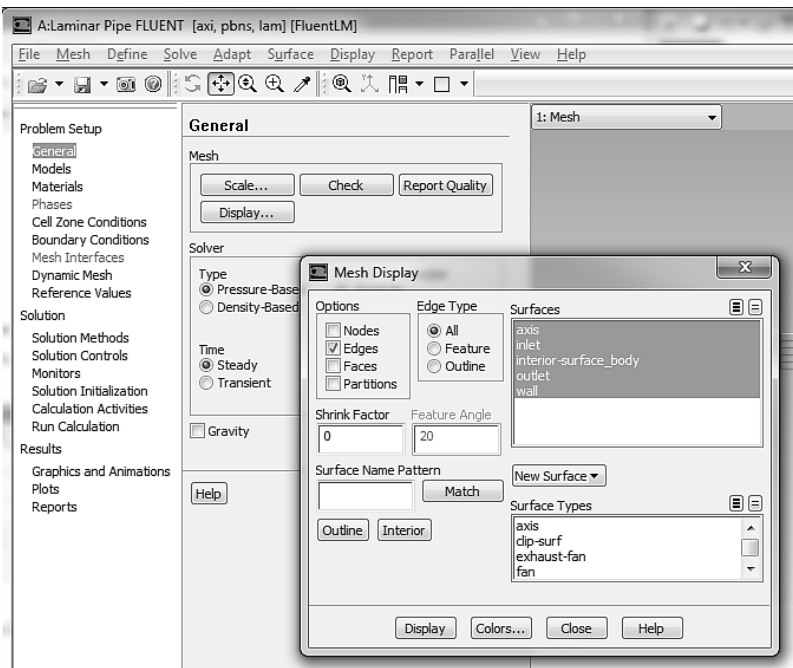


Рис. 1.37

- 5) В разделе Surfaces окна Mesh Display выбрать все имеющиеся элементы (имена поверхностей) и нажать кнопку Display. В графическом окне будет показана разностная сетка.
- 6) Для перемещения изображения расчетной области и разностной сетки следует кликнуть по изображению с левой кнопки мыши и, удерживая ее, переместить курсор в требуемое место.
- 7) Для увеличения изображения следует кликнуть средней кнопкой мыши в верхний левый угол участка изображения и, удерживая ее провести курсор в нижний правый угол изображения. Кнопку отпустить.

- 8) Для уменьшения изображения надо выполнить действия подобные п.7, только следует проводить курсором из нижнего правого угла изображения в верхний левый угол.

1.5.2. *Внесение данных в решатель*

- 1) Задаем осесимметричную геометрию области. В разделе General→Solver→2D Space.
- 2) Выбираем Axisymmetric, рис. 1.38.

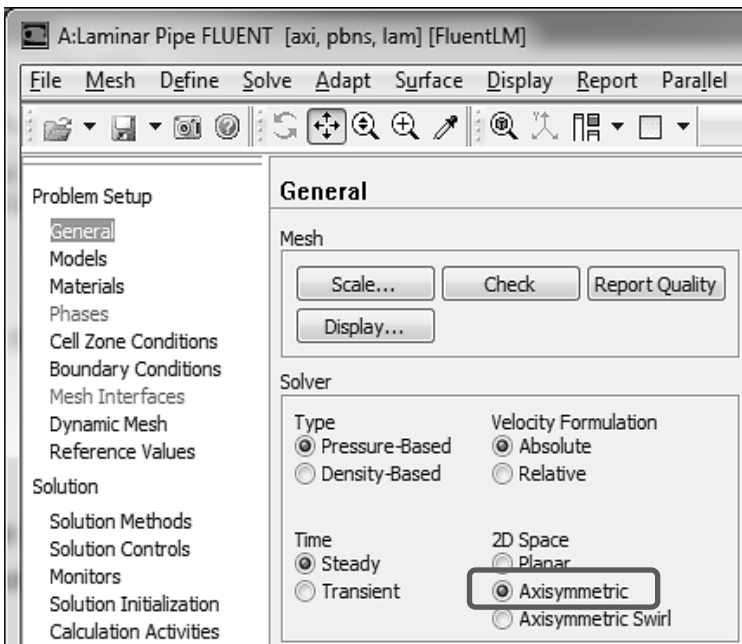


Рис. 1.38

- 3) Устанавливаем модель вязкого ламинарного течения: Models→Viscous-Laminar→Edit. Откроется окно Viscous Model, в ко-

тором выбираем значение Laminar, рис. 1.39. Кликаем ОК. (По умолчанию, во FLUENTе выбрана опция Laminar).

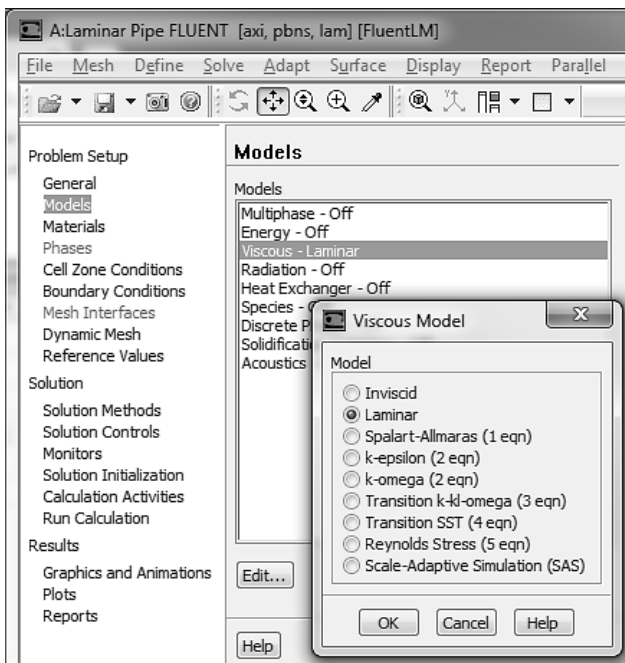


Рис. 1.39

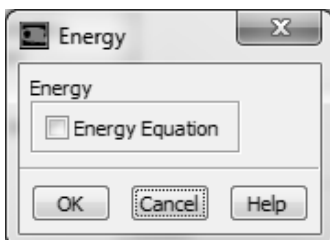


Рис. 1.40

- 4) Отключаем уравнение энергии: Models→Energy→Edit, рис. 1.40. В нашем случае уравнение энергии решать не требуется. Поэтому нажимаем на Cancel.

1.5.3. Задание свойств жидкости

Свойства жидкости были указаны при постановке задачи.

- 1) Для создания жидкости с такими свойствами выполняем следующие действия: Materials→Fluid→Create/Edit, рис. 1.41.

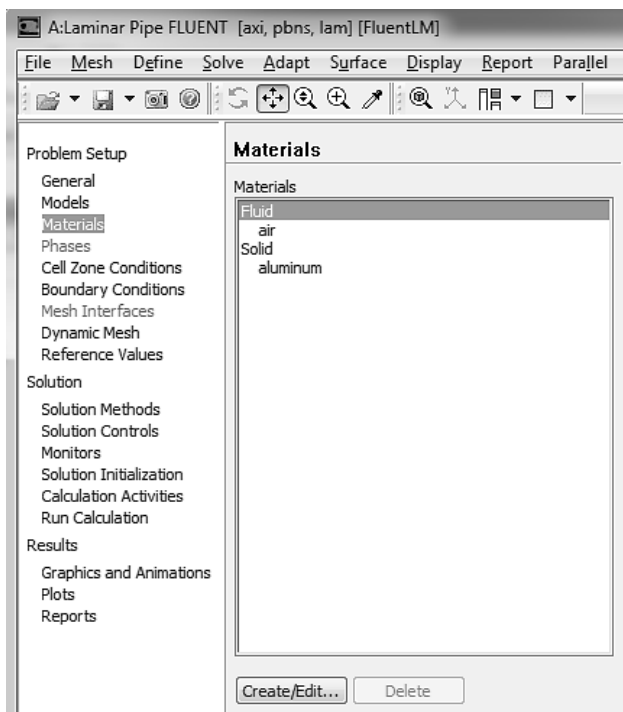


Рис. 1.41

- 2) В появившемся окне устанавливаем плотность 1 кг/м^3 и вязкость 0.002 кг/(м·сек) , рис. 1.42.

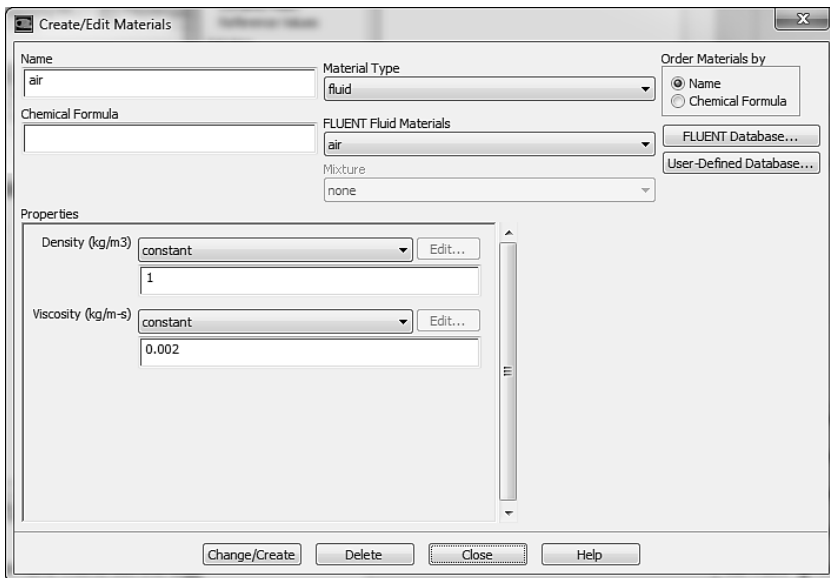


Рис. 1.42.

- 3) Кликаем кнопку Change/Create, затем Close.

1.5.4. Задание граничных условий

По условию задачи необходимо задать условия на четырех границах:

- 1) Задаем условия на входной границе: Boundary Conditions→Zone (Inlet)→Edit, рис. 1.43. Автоматически произойдет выбор значения velocity-inlet в разделе Type.

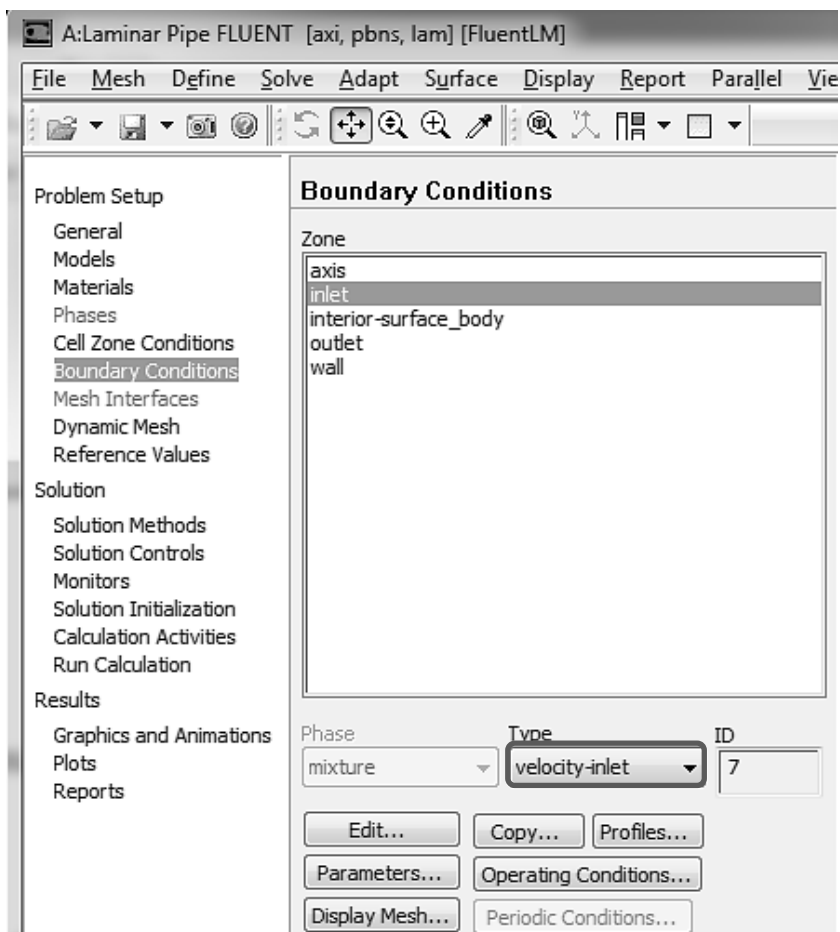


Рис. 1.43.

- 2) В появившемся окне Velocity Inlet, рис. 1.44 выбираем значение Velocity Specification Method равным Components и устанавливаем значение Axial-Velocity(m/s) равным 1.

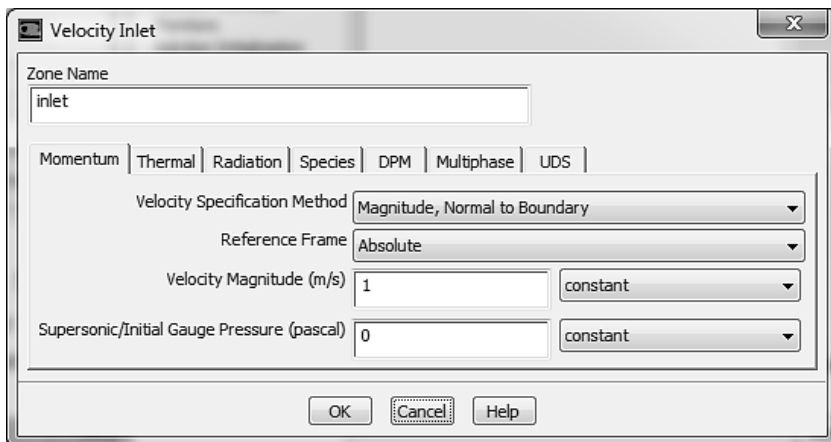


Рис. 1.44

- 3) Кликаем ОК и закрываем окно.
- 4) Задаем условия на выходной границе: Boundary Conditions→Outlet→Edit.
- 5) Значение Gauge Pressure (pascal) устанавливаем равное 0. Кликаем ОК.
- 6) Задаем условия на оси симметрии: Boundary Conditions→Zone (axis). Меняем значение Type на axis, рис. 1.45. В появившемся окне Question кликаем Yes, а в окне Axis – на ОК.
- 7) Как можно видеть зона wall имеет значение Type равное wall. Если это не так, то необходимо под Type выбрать значение равное wall.
- 9) После задания настроек, сохраните проект через строку меню File→Save Project.

1.5.5. Выбор разностной схемы

Для решения поставленной задачи мы будем использовать алгоритм SIMPLE метода Патанкара, с привлечением схемы второго порядка точности для конвективных членов в уравнении сохранения импульса.

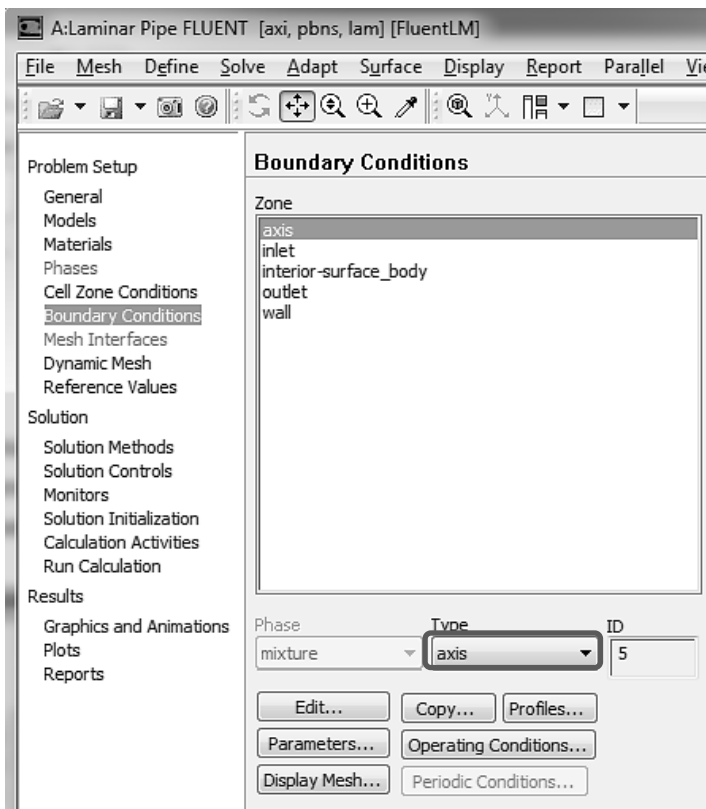


Рис. 1.45

Для выбора разностных схем используется раздел Solution. Убедитесь, что в подразделе Solution Methods установлены значения, показанные на рис. 1.46.

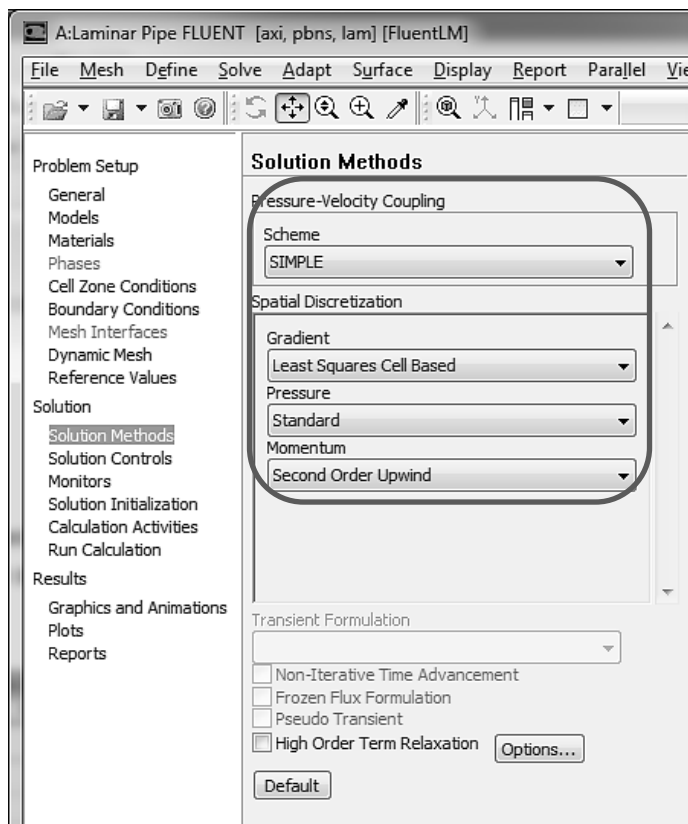


Рис. 1.46

1.5.6. Задание начальных условий

- 1) В разделе Solution выбираем Solution Initialization.
- 2) Меняем метод инициализации на Standard Initialization.

- 3) Кликаем на Compute from и выбираем inlet.
- 4) Кликаем Initialize, рис. 1.47.

1.5.7. Настройка критерия сходимости

FLUENT выдает информацию о невязке для каждого решаемого уравнения. Невязка является мерой того, насколько хорошо текущее решение удовлетворяет дискретной форме основного уравнения. Мы будем итерировать каждое уравнение до тех пор, пока невязка не упадет ниже 10^{-6} . Для задания критерия невязки выполняем следующие действия.

- 1) В разделе Solution выбираем Monitors.
- 2) В разделе Monitors выбираем Residuals, и далее ждем кнопку Edit, рис. 1.48.
- 3) В появившемся окне Residual Monitors изменяем значения Absolute Criteria, расположенные напротив строк Residual для continuity, x-velocity, y-velocity, на 10^{-6} рис. 1.49.

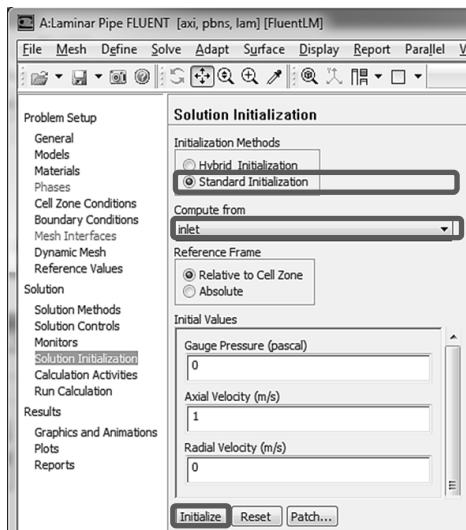


Рис. 1.47

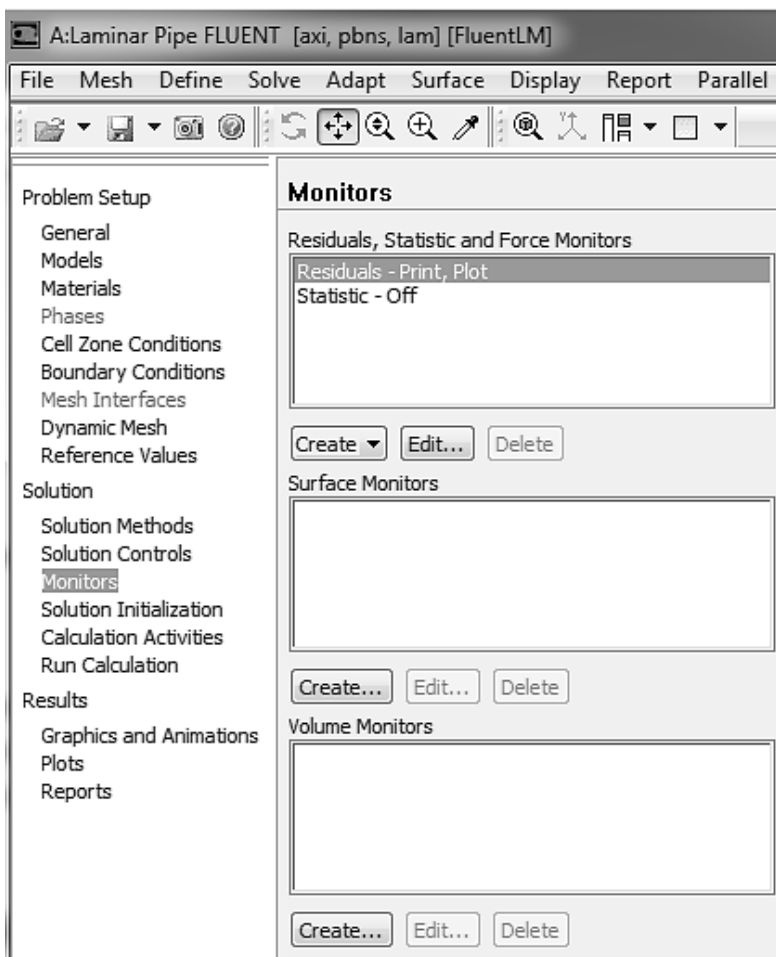


Рис. 1.48

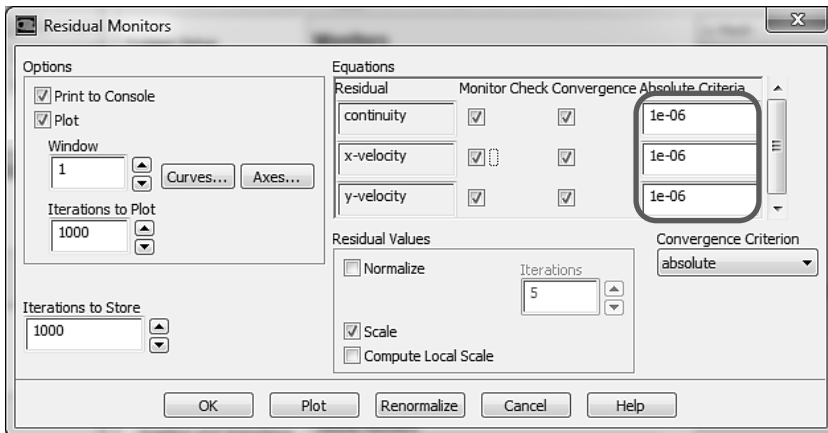


Рис. 1.49

1.5.8. Расчет коэффициента трения

Коэффициент трения жидкости на поверхности определяется по формуле: $C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho_{ref} V_{ref}^2 A_{ref}}$. Здесь A_{ref} – площадь цилиндрической

поверхности канала, V_{ref} – скорость потока на входе в канал, ρ_{ref} – плотность жидкости, F_D – сила трения на цилиндрической поверхности

канала, $\int \mu \frac{\partial u}{\partial n} d\sigma$. Для нахождения коэффициента трения необ-

ходимо выполнить следующие действия:

- 1) В разделе Solution выбираем Monitors.
- 2) Под окном Residuals, Statistic and Force Monitors жмем кнопку Create и в выпадающем окне выбираем Drag, рис. 1.50.

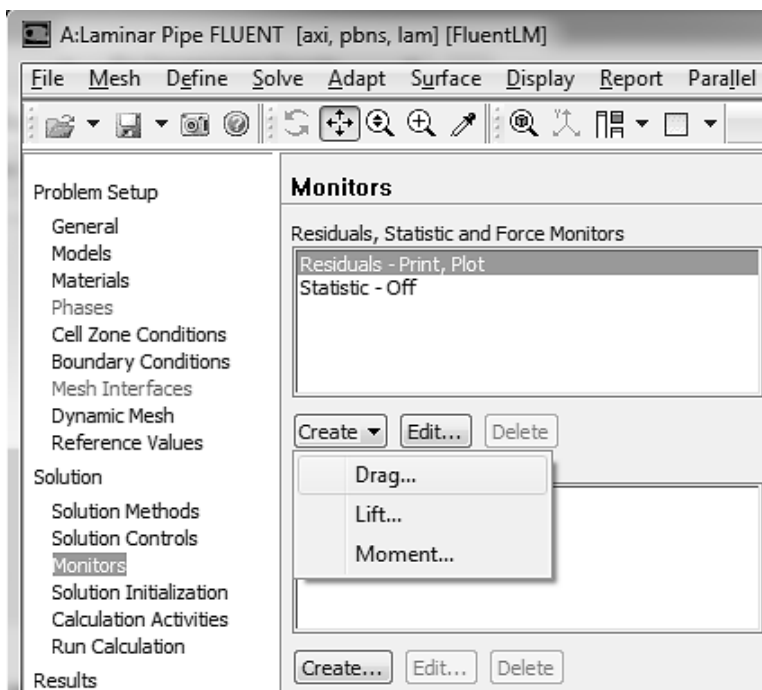


Рис. 1.50

- 3) В появившемся окне Drag Monitor в разделе Options устанавливаем галочку напротив Print to Console. Это означает, что значение коэффициента трения будет выводиться в окно консоли.
- 4) Устанавливаем галочку напротив Plot. При этом окно Window будет активировано и значение в окне будет изменено на 2, что означает, что будет создано 2-е графическое окно, в которое будет осуществляться вывод коэффициента трения.
- 5) В окне Wall Zone выбираем wall, рис. 1.51.
- 6) Закрываем окно Drag Monitor, нажав ОК.

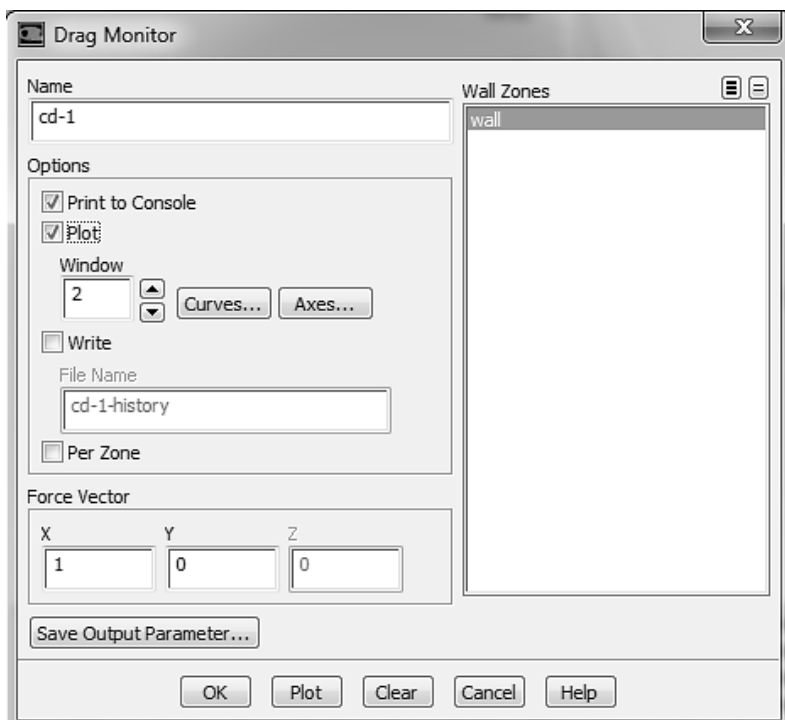


Рис. 1.51

Чтобы коэффициент трения правильно рассчитывался необходимо найти площадь цилиндрической поверхности канала A_{ref} , задать V_{ref} и ρ_{ref} .

- 1) . Для этого выбираем раздел Reports, далее – Surface Integrals, нажимаем кнопку Set Up, рис. 1.52.
- 2) В появившемся окне Surface Integrals, в разделе Report Type выбираем Area, а в разделе Surfaces выбираем wall. Жмем кнопку Compute.
- 3) В окне Area (m2) появится значение площади цилиндрической поверхности, которая имеет имя wall, рис. 1.53. Это же значение будет напечатано в командном окне FLUETa, рис. 1.54.

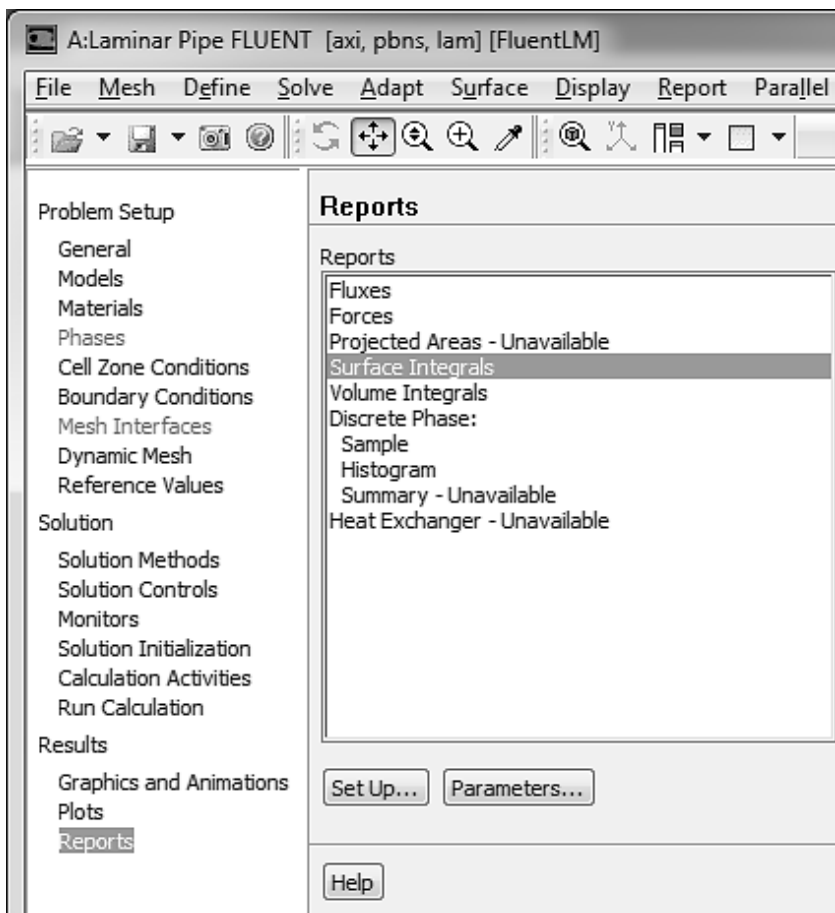


Рис. 1.52

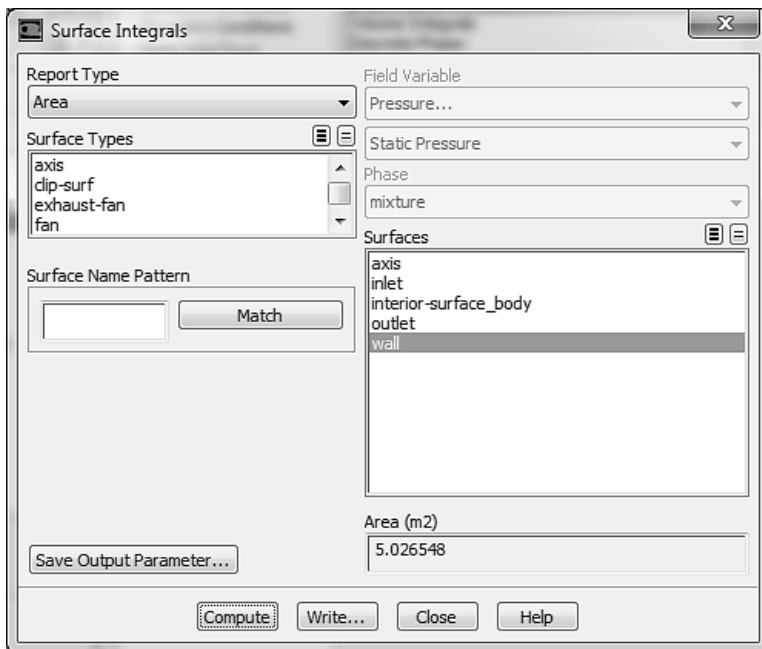


Рис. 1.53

Area	(m2)
wall	5.0265484

Рис. 1.54

- 4) Копируем значение площади поверхности. Закрываем окно Surface Integrals, нажав на кнопку Close.
- 5) Переходим в раздел Problem Setup. Выбираем подраздел Reference Values, рис. 1.55.
- 6) Вставляем скопированное значение площади в строку Area (m2).
- 7) В строках Density (kg/m^3), Velocity (m/s) задаем значения 1.

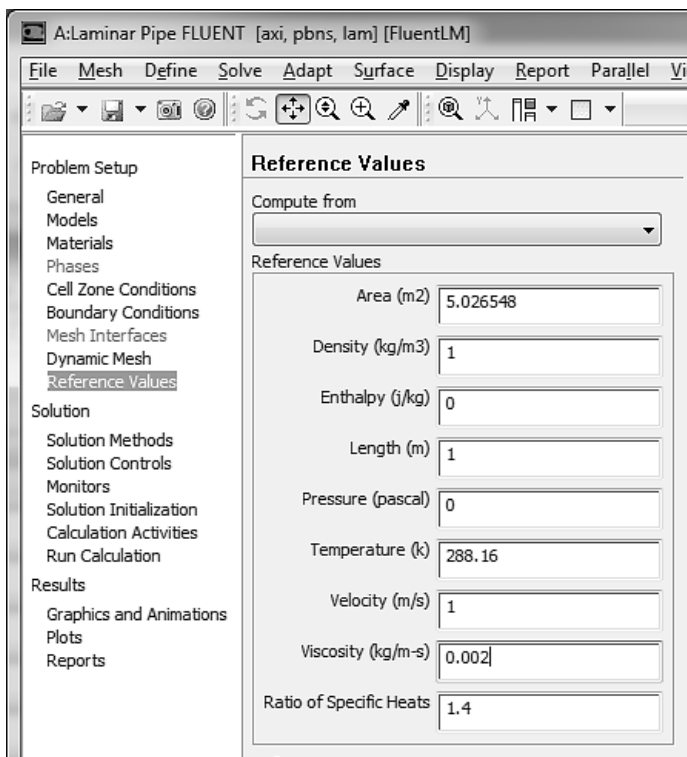


Рис. 1.55

1.5.9. Выполнение расчетов

Перед выполнением расчетов необходимо задать число итераций.

Для этого

- 1) В разделе Solution выберите Run Calculation.
- 2) В строке Number Iterations задайте число итераций 100.
- 3) Сохраните проект, File → Save Project.
- 4) Нажмите кнопку Calculate, рис. 1.56.

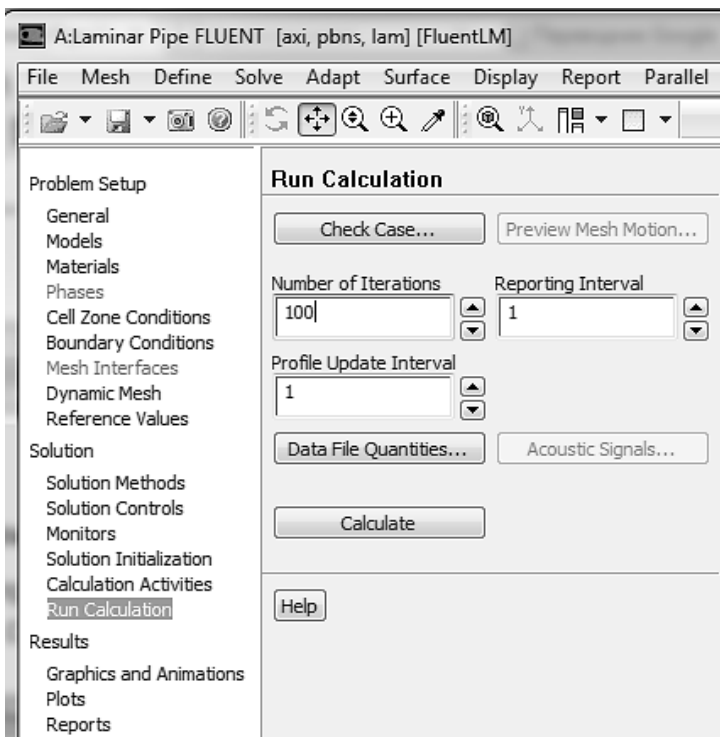


Рис. 1.56

- 5) Невязки на каждой итерации будут выводиться в окно консоли и строиться в виде зависимостей от номера итерации в графическом окне.
- 6) Значение коэффициента трения $Cd=1$ будет выведено в окно консоли и построено во втором графическом окне, рис. 1.57.
- 7) Сохраните проект, File → Save Project.

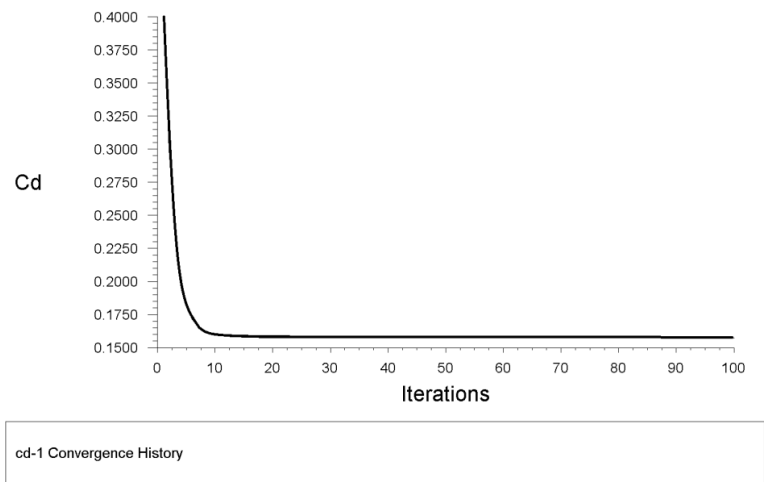


Рис. 1.57

1.6. Обработка результатов расчета с помощью средств FLUENTA

Результаты расчетов можно обработать либо с помощью средств встроенных FLUENT, либо с помощью ANSYS постпроцессора CFD-Post.

1.6.1. Построение поля векторов скоростей

- 1) В разделе Results выбираем подраздел Graphics and Animations.
- 2) В окне Graphics выбираем Vectors и ждем кнопку Set Up, рис. 1.58.
- 3) В появившемся окне Vectors, рис. 1.59. ждем кнопку Display. В графическом окне будет показано поле векторов скоростей.
- 4) Приблизить или увеличить изображение можно путем выделения прямоугольной области, зажав среднюю кнопку мыши, и проводя курсором из левого верхнего угла в нижний правый угол, рис. 1.60. Обратная операция позволяет отдалить или уменьшить изображение.
- 5) Длина векторов регулируется коэффициентом, стоящим в поле

Scale окна Vectors. После изменения значения коэффициента следует нажать кнопку Display.

- 6) Закройте окно Vectors, нажав на кнопку Close.

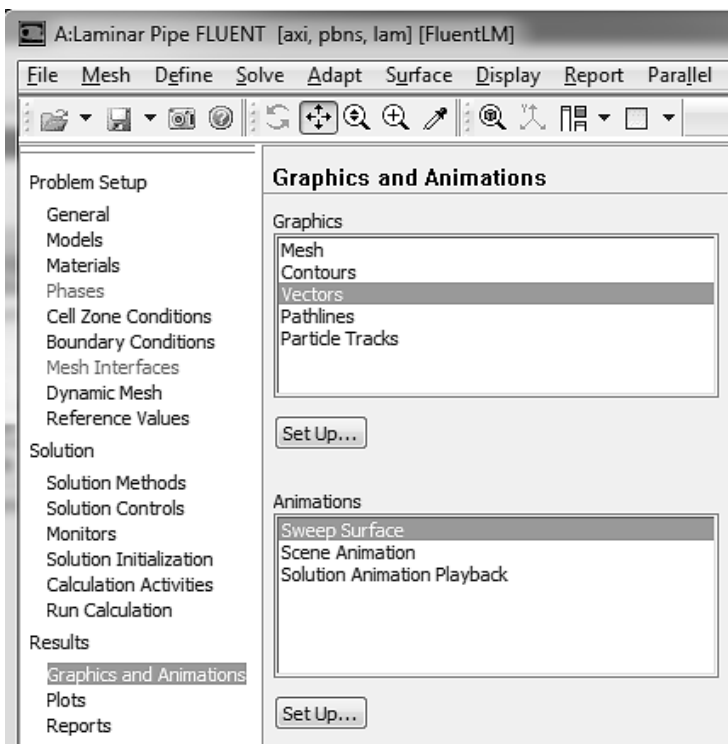


Рис. 1.58

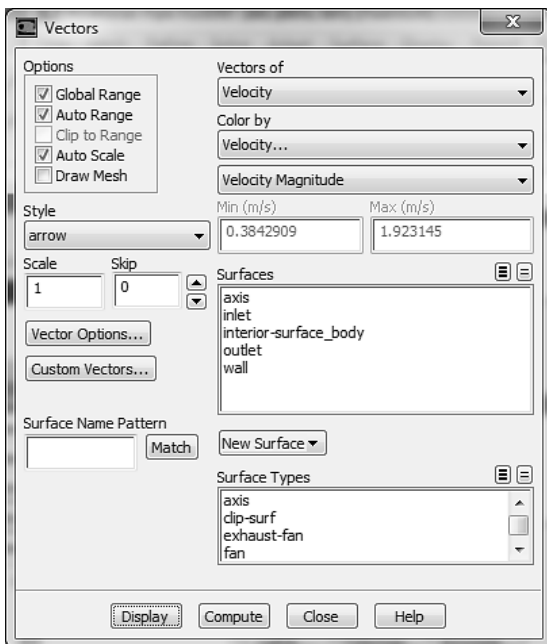


Рис. 1.59

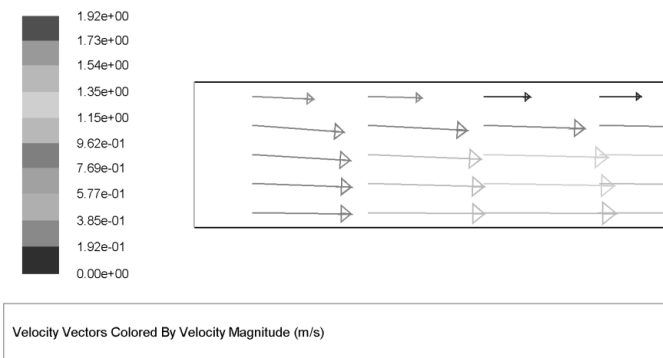


Рис. 1.60

1.6.2. Построение изолиний модуля скорости

Для построения изолиний модуля скорости следует выполнить такие действия:

- 1) В разделе Results выбираем подраздел Graphics and Animations.
- 2) В окне Graphics выбираем Contours и жмем кнопку Set Up, рис. 1.61.
- 3) В появившемся окне Contours в разделе Contours of выбираем Velocity и Velocity Magnitude. Жмем кнопку Display, рис. 1.62.
- 4) В графическом окне будут изображены изолинии модуля скорости, рис. 1.63.

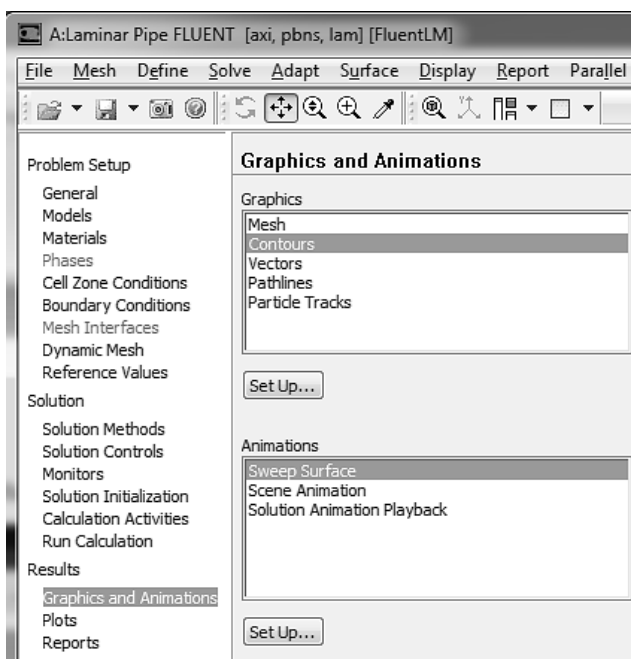


Рис. 1.61

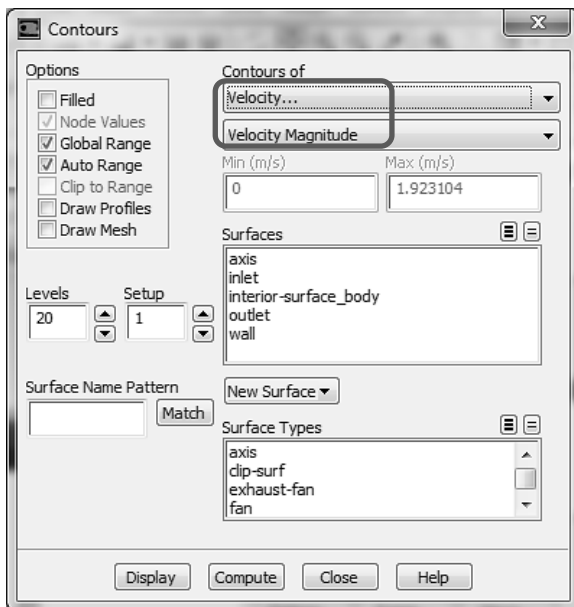


Рис. 1.62

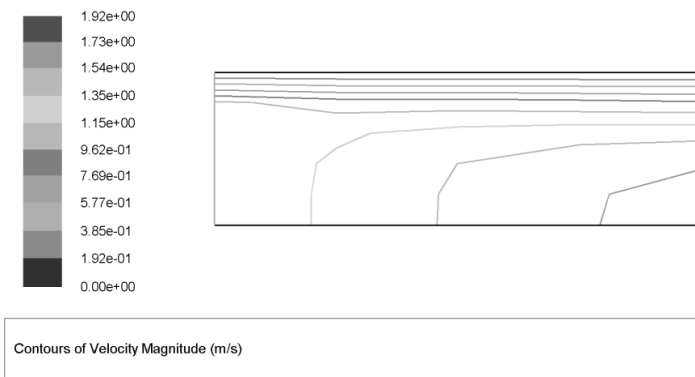


Рис. 1.63

- 5) Количество построенных изолиний можно изменить, указав требуемое число (не более 100) в поле Levels, после чего нажать кнопку Display.
- 6) Поле модуля скорости можно представить в виде зон, в которых пространство между изолиниями окрашено в определенный цвет, соответствующий значению модулю скорости, указанному на шкале, расположенной в левой части графического окна. Для этого в окне Contours в разделе Options следует установить галочку рядом с Filled и нажать на кнопку Display, рис. 1.64. В графическом окне появится окрашенное поле контуров модуля скорости, рис. 1.65.

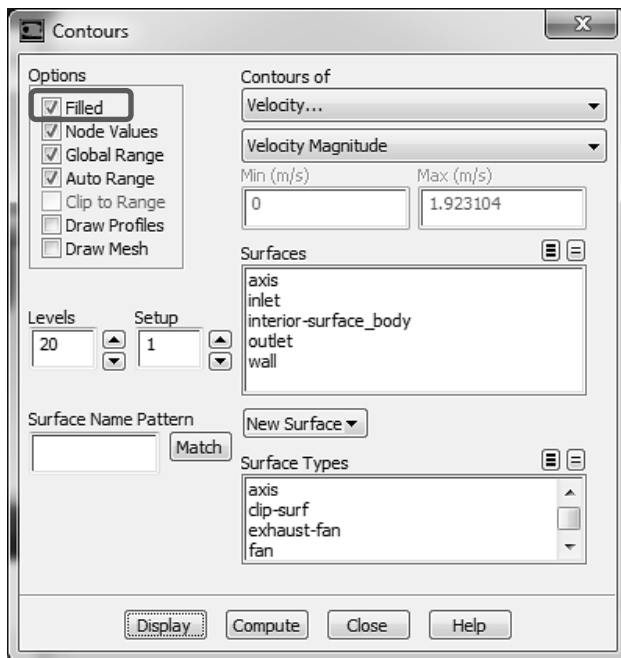


Рис. 1.64



Contours of Velocity Magnitude (m/s)

Рис. 1.65

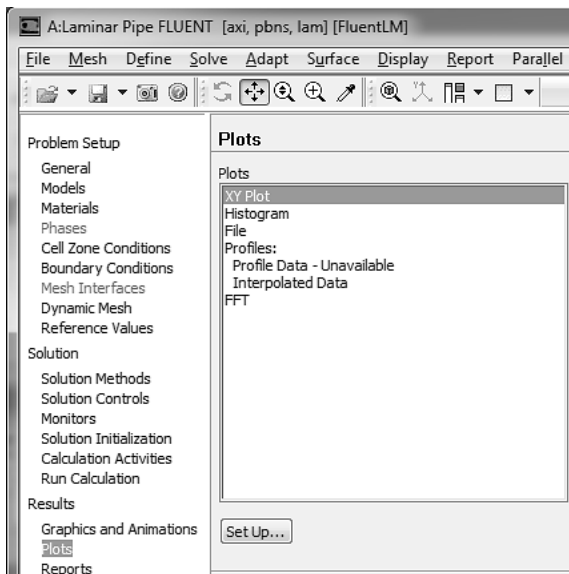


Рис. 1.66

1.6.3. Построение профиля скорости на выходе из канала

- 1) В разделе Results выбираем Plots. В поле Plots выбираем XY Plot, рис. 1.66.
- 2) Жмем кнопку Set Up Появиться окно Solution XY Plot.
- 3) В окне Solution XY Plot настраиваем опции, как показано на рис. 1.67.

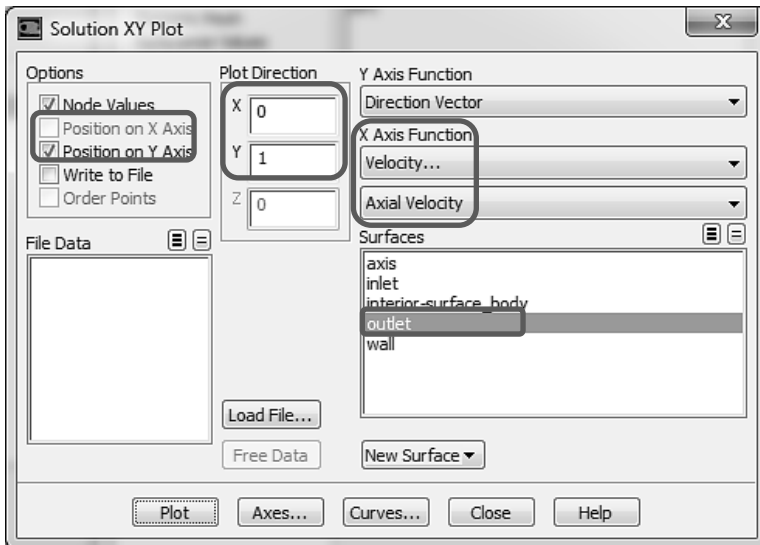


Рис. 1.67

- 4) Нажимаем кнопку Plot, в графическом окне будет изображен профиль осевой скорости. По оси абсцисс будет отложена продольная скорость, а по оси ординат – радиальная координата, рис. 1.68.
- 5) Для более наглядного представления полученного профиля скорости можно соединить точки линиями. Для этого в окне Solution XY Plot, рис. 1.67, следует нажать кнопку Curves .
- 6) В появившемся окне Curves - Solution XY Plot выбрать значение Pattern раздела Line Style, как показано на рис. 1.69.

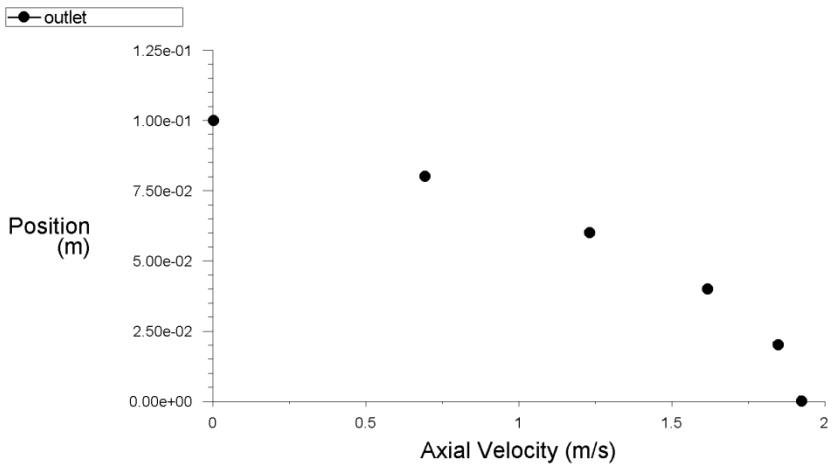


Рис. 1.68

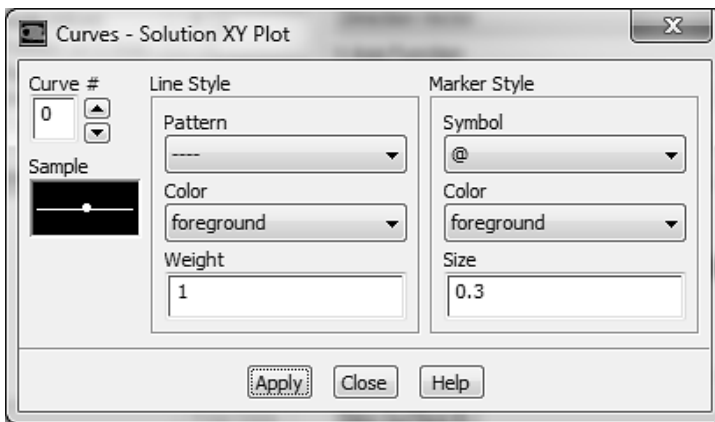


Рис. 1.69

- 7) Нажать кнопку Apply. После чего нажать кнопку Plot в окне Solution XY Plot. В графическом окне будет изображен профиль продольной скорости на выходе из канала, рис. 1.70.

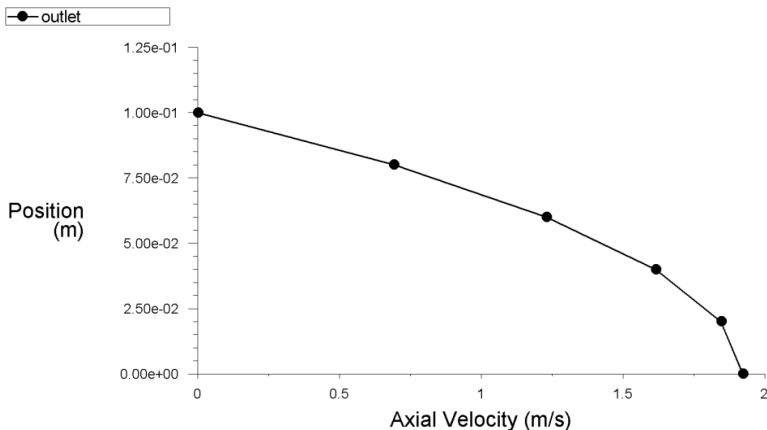


Рис. 1.70

1.6.4. Построение изменения давления вдоль оси канала

Для построения графика изменения давления вдоль оси канала поступаем аналогично предыдущему пункту.

- 1) Results→Plots→XY Plots→Set Up
- 2) Настраиваем опции окна Solution XY Plot так, как показано на рис. 1.71.
- 3) Жмем кнопку Plot. В графическом окне будет показан требуемый график, рис. 1.72.

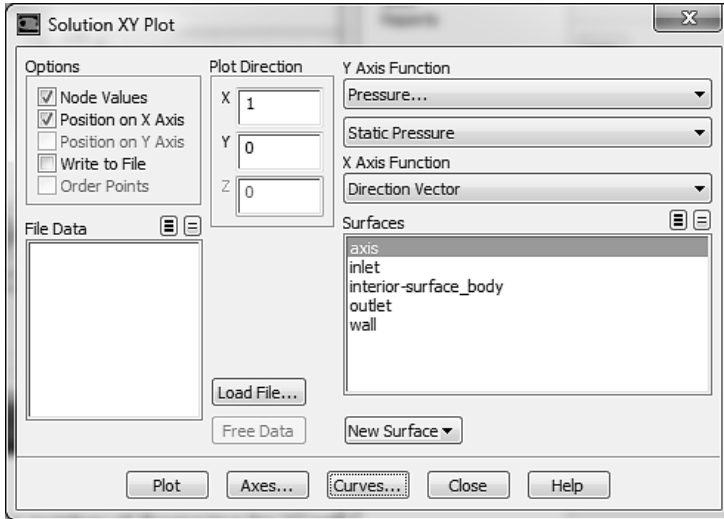


Рис. 1.71

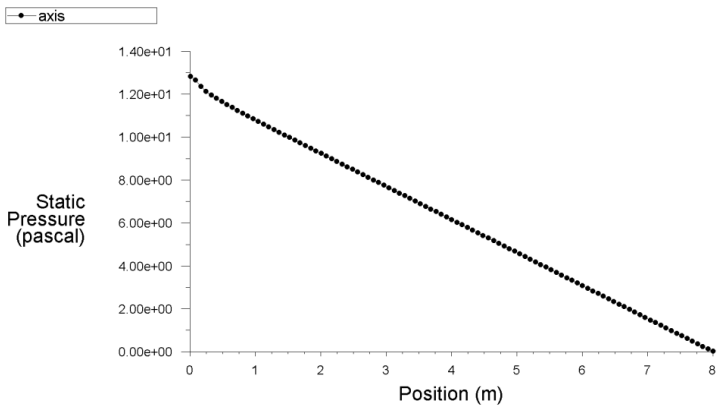


Рис. 1.72

1.6.5. Контроль и проверка решения

При проведении расчета мы контролировали значение невязок для каждого из уравнений. По достижении всех невязок значения меньшего, чем 10^{-6} , мы полагаем, что итерационный процесс сошелся, и мы получили численное решение. Невязка, в данном случае, является косвенной характеристикой. Мы можем убедиться в правильности решения исходной системы уравнений Навье Стокса, если проверим интегральное выполнение законов сохранения массы и импульса.

Уравнение неразрывности, которое отражает закон сохранения массы, имеет вид:

$$\frac{\partial r\rho U}{\partial x} + \frac{\partial r\rho V}{\partial r} = 0.$$

Умножим уравнение на 2π , проинтегрируем его по r от 0 до R и по x от 0 до L . Применим формулу Грина:

$$\int_0^L \int_0^R 2\pi \left(\frac{\partial r\rho U}{\partial x} + \frac{\partial r\rho V}{\partial r} \right) dx dr = \oint 2\pi (-r\rho V dx + r\rho U dr) = 0.$$

Расписывая контурный интеграл по границе области, получим

$$-\int_0^L 2\pi r\rho V \Big|_{r=0} dx - \int_L^0 2\pi r\rho V \Big|_{r=R} dx + \int_0^R 2\pi r\rho U \Big|_{x=L} dr + \int_R^0 2\pi r\rho U \Big|_{x=0} dr = 0.$$

Первые два слагаемых обращаются в 0, т.к. и на оси симметрии, и на стенке, радиальная скорость жидкости равна 0, тогда получим:

$$\int_0^R 2\pi r\rho U \Big|_{x=L} dr - \int_0^R 2\pi r\rho U \Big|_{x=0} dr = 0.$$

Это означает, что для проверки закона сохранения массы мы должны убедиться в том что, сколько жидкости в область втекло, столько же должно из нее и вытечь. Для этого выполним следующую последовательность действий: Reports→Fluxes→Set Up, рис. 1.73. Появится окно Flux Reports, в котором выделяем границы inlet и outlet и жмем кнопку Compute, рис. 1.74. В поле Results появятся значения потоков массы (кг/сек) для каждой границы, а в поле Net Results – сумма этих потоков. Обратите внимание на то, что поток массы на выходной границе отрицательный, что говорит о вытекании жидкости из области.

Интегральную ошибку расчета по массе в процентах можно определить как отношение суммы потоков на границах области к потоку на входной границе, умноженное на 100.

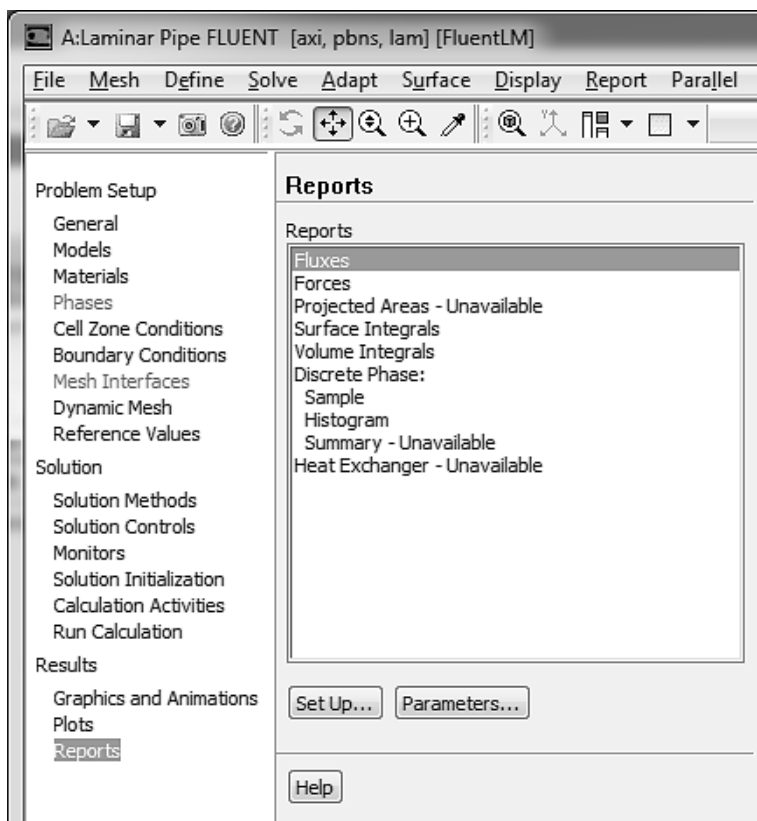


Рис. 1.73

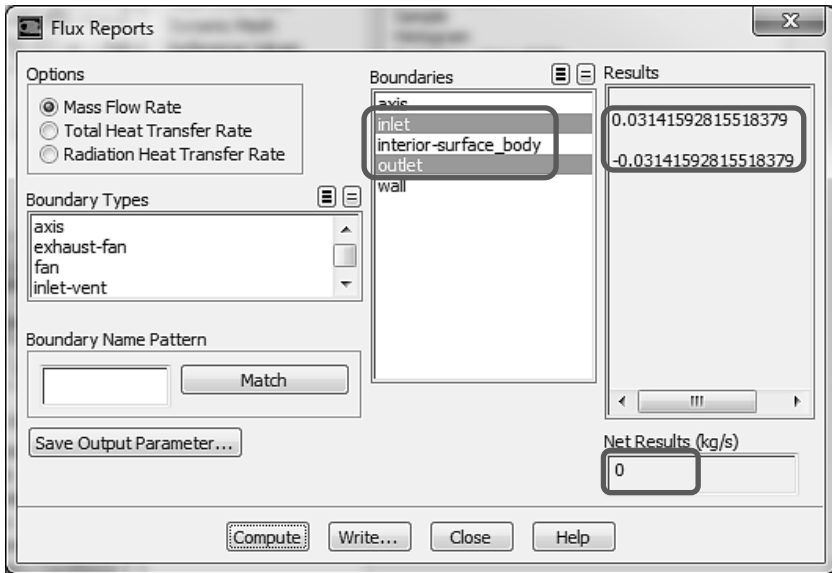


Рис. 1.74

Проверим теперь выполнение закона сохранения импульса для продольной компоненты вектора скорости. Уравнение импульса в продольном направлении можно записать в виде:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[r \left(\rho U^2 + P - \mu \frac{\partial U}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial r} \left[r \left(\rho UV - \mu \frac{\partial U}{\partial r} \right) \right] = 0.$$

Повторяя те же самые действия, что мы делали с уравнение неразрывности, получим:

$$\begin{aligned} & - \int_0^L 2\pi r \left(\rho UV - \mu \frac{\partial U}{\partial r} \right) \Big|_{r=0} dx - \int_L^0 2\pi r \left(\rho UV - \mu \frac{\partial U}{\partial r} \right) \Big|_{r=R} dx + \\ & + \int_0^R 2\pi r \left(\rho U^2 + P - \mu \frac{\partial U}{\partial x} \right) \Big|_{x=L} dr + \int_R^0 2\pi r \left(\rho U^2 + P - \mu \frac{\partial U}{\partial x} \right) \Big|_{x=0} dr = 0 \end{aligned}$$

Учитывая, что на входе в канал и на выходе из канала $\frac{\partial U}{\partial x} = 0$, и

на поверхности канала $V=0$, получим:

$$\int_L^0 2\pi r \left(\mu \frac{\partial U}{\partial r} \right) \Big|_{r=R} dx + \int_0^R 2\pi r (\rho U^2 + P) \Big|_{x=L} dr - \int_0^R 2\pi r (\rho U^2 + P) \Big|_{x=0} dr = 0$$

Первое слагаемое полученного соотношения представляет собой не что иное, как силу трения жидкости о боковую цилиндрическую поверхность канала, а другие два – разность потоков импульса жидкости на выходе и входе в канал.

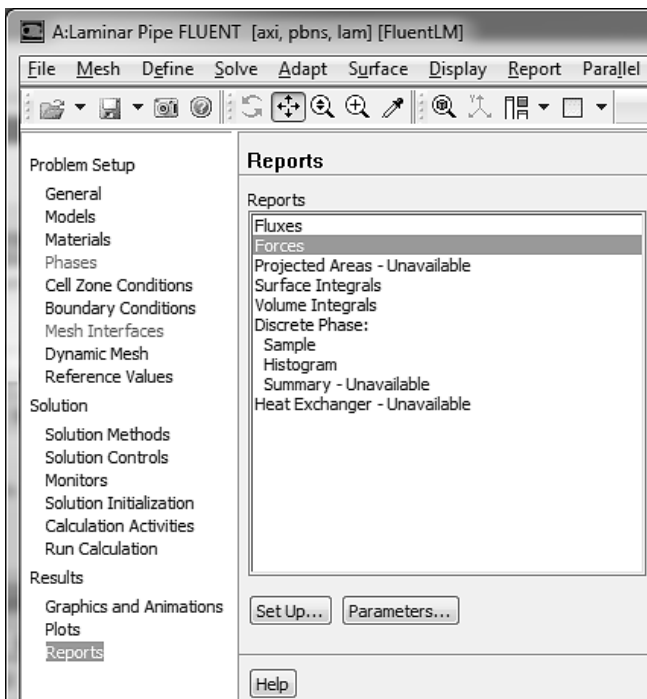


Рис. 1.75

Для нахождения силы трения следует выполнить Reports→Forces→Set Up , рис. 1.75. В появившемся окне Force Reports настроить опции, как показано на рис. 1.76, и нажать кнопку Print. В окне консоли будет выведена информация о силе трения на боковой поверхности, которой мы дали имя wall, рис. 1.77.

Для нахождения потоков импульса через входную и выходную границы создадим новую переменную под названием *impulse*. Для этого через строку меню выполним Define →Custom Field Functions, рис. 1.78.

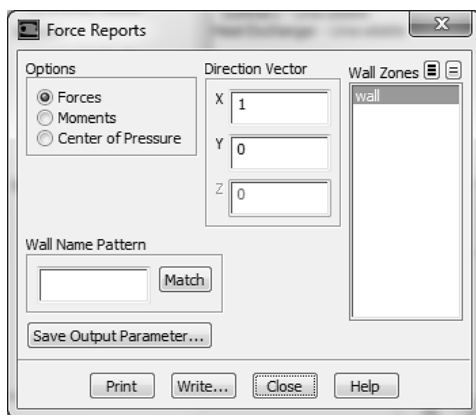


Рис. 1.76

Forces		Forces (n)		
Zone	Pressure	Viscous		
wall	(0 0 0)	(0.39561415 0 0)		
Net		(0.39561415 0 0)		
Forces - Direction Vector		Forces (n)		
Zone	Pressure	Viscous	Total	Coefficients Pressure
wall	0	0.39561415	0.39561415	0
Net		0	0.39561415	0

Рис. 1.77

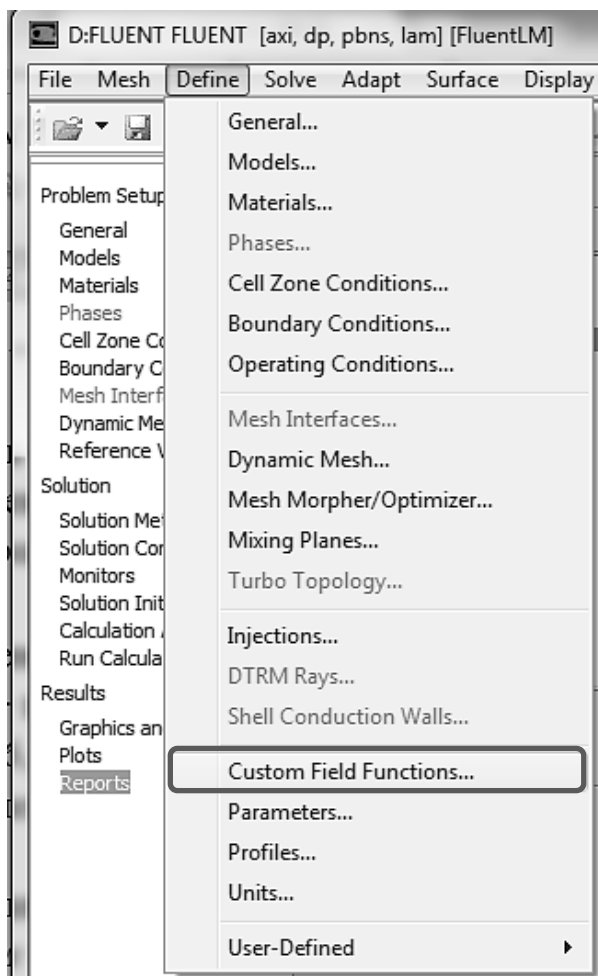


Рис. 1.78

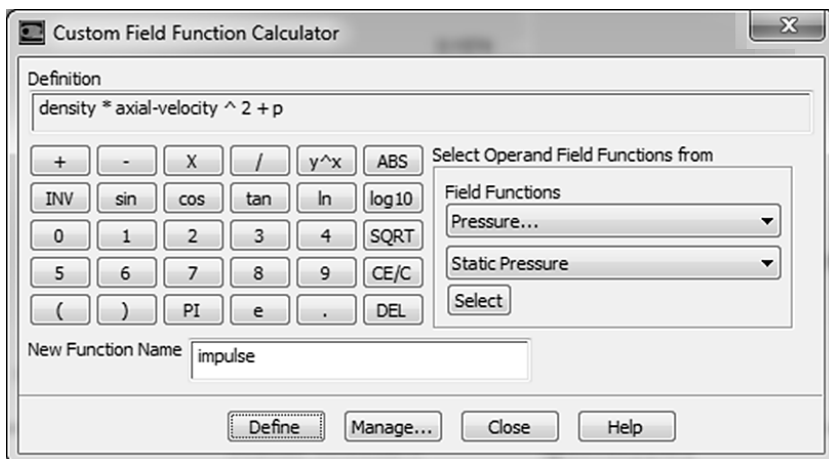


Рис. 1.79

Открывается окно Custom Field Functions Calculator, рис. 1.79. В этом окне с помощью значений поля Field Functions, кнопки Select и кнопок калькулятора и создаем выражение $density * axial-velocity^2 + p$, которое появится в поле Definition, и этому выражению в поле New Function Name даем имя *impulse*. Жмем кнопку Define. Далее выполняем действия: Results→Reports→Surface Integrals→Set Up появится окно Surface Integrals. В этом окне в поле Reports Type выбираем Integrals. В поле Field Variable выбираем Custom Field Functions и затем имя созданной нами переменной *impulse*. В поле Surfaces выбираем inlet и outlet. Жмем кнопку Compute, рис. 1.80.

В окне консоли появятся значения потока импульса на входе и выходе из канала, рис. 1.81.

Находим разность между потоками импульса на выходе и входе в канал: 0.395444201. Сравним полученное изменение потоков импульса с силой, действующей на боковую поверхность 0.39561415. Видим, что погрешность не превосходит 0.04%.

Закройте FLUENT: File→Close FLUENT.

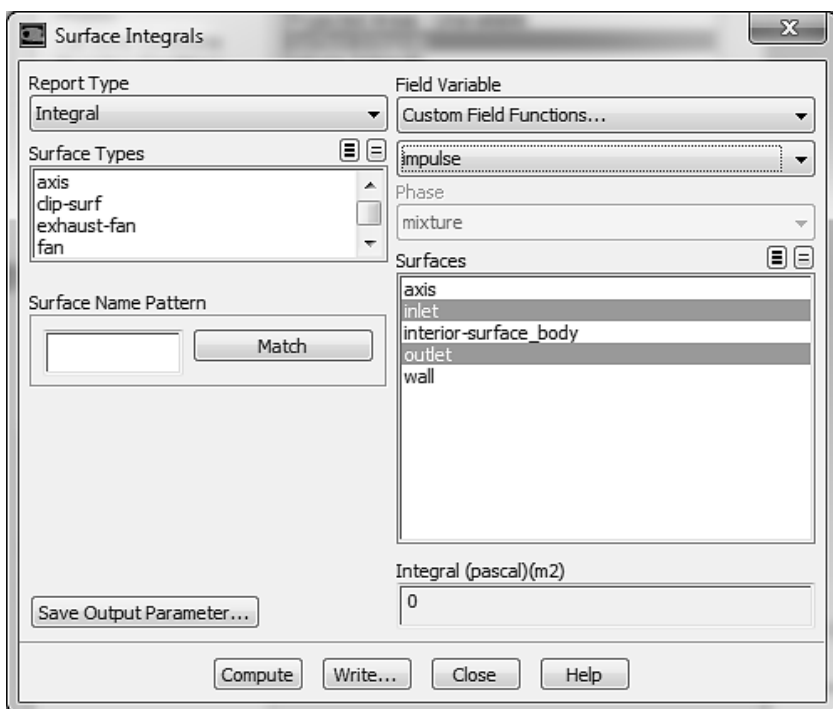


Рис. 1.80

Integral	
impulse	

inlet	0.43578309
outlet	0.040338889

Net	0.47612199

Рис. 1.81

1.7. Измельчение сетки

Получим решение на более мелкой сетке, для чего увеличим число разбиений в радиальном направлении с 5 до 10.

- 1) Для этого надо кликнуть правой кнопкой мыши на схеме проекта по Mesh и выбрать Duplicate, рис. 1.82.
- 2) Появится новая страница проекта. Переименуем ее в Laminar Pipe (mesh2), рис. 1.83.
- 3) Кликаем по Mesh в странице Laminar Pipe (mesh2).
- 4) На панели Details of “Mesh” в разделе Sizing значение строки Use Advanced Size Function изменяем на Off.
- 5) Увеличиваем число разбиений в радиальном направлении.
- 6) Число ячеек должно равняться 1000. Это можно увидеть на панели Details of “Mesh” в разделе Statistics в правой части строки Elements.
- 7) Закрываем программу Meshing.

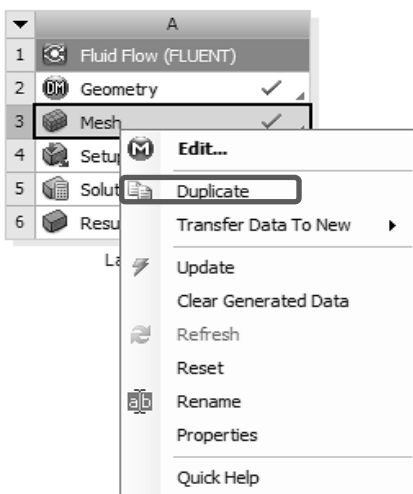


Рис. 1.82

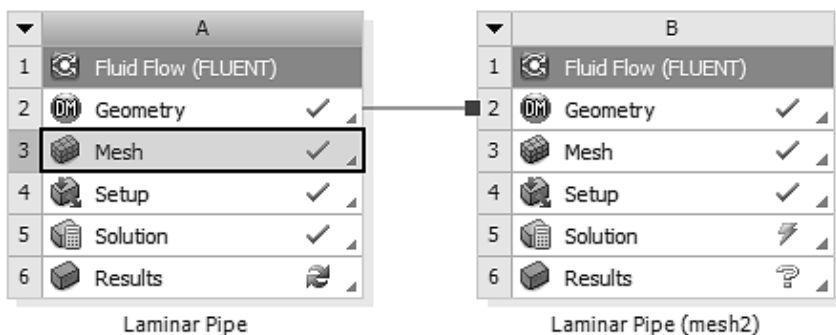


Рис. 1.83

1.8. Просмотр результатов

- 1) На схеме проекта Laminar Pipe (mesh2) выполняем правый клик по строке Fluid Flow (FLUENT) и в контекстном меню выбираем Update.
- 2) Ждем некоторое время, пока FLUENT проведет весь расчет. Запускаем FLUENT снова. Анализируем результаты.

1.9. Задание для самостоятельной работы

Решите задачу о развитии течения несжимаемой жидкости в трубе длиной 8 метров, диаметром 0.2 метра. Плотность жидкости 1 кг/м^3 , вязкость жидкости $0.002 \text{ Па}\cdot\text{с}$, скорость жидкости на входе в трубу 1 м/с .

Для решения используйте FLUENT, схему второго порядка аппроксимации для уравнения сохранения импульса. Решение требуется получить на разностных сетках 100×5 , 100×10 и 100×20 , (осевое разбиение \times радиальное разбиение).

1. Постройте профили осевой скорости на выходе из трубы, полученные на трех различных сетках. Также постройте профиль скорости, полученный из решения задачи о развитом течении несжимаемой жидкости в трубе постоянного сечения. На одном графике должно быть 4

кривых. Осевая скорость должна быть отложена на оси абсцисс, а радиальная координата – по оси ординат.

2. Рассчитайте сдвиговое напряжение τ_{xy} на стенке в области полностью развитого течения на трех сетках. Рассчитайте это значение из теории полностью развитого течения жидкости в трубе. Для каждой сетки рассчитайте ошибку относительно аналитического решения. Поместите результаты расчетов в таблицу:

Сетка	τ_{xy}	% ошибка

3. На выходе из трубы, где течение полностью развитое, ошибку в осевой скорости на оси симметрии можно определить как

$$\varepsilon = \frac{|u_{calc} - u_{exact}|}{u_{exact}}$$

Ожидается, что ошибка будет иметь вид: $\varepsilon = K\Delta r^p$, Δr – размер ячейки в радиальном направлении, K и p – постоянные, значение которых будет зависеть от выбранной разностной схемы. Используя метод наименьших квадратов, предварительно прологарифмировав зависимость $\ln \varepsilon = \ln K + p \cdot \ln \Delta r$, найти постоянные K и p .

4. Посмотрите, как изменится значение p при смене разностной схемы с "second-order upwind" на "first-order upwind". На графике должно быть изображено четыре кривые. По две для каждой разностной схемы. Сравните значения p и дайте объяснение полученным результатам. Следует помнить, что схемы второго и первого порядка точности применяются только для инерционных членов уравнения сохранения импульса, а дискретизация вязких членов всегда имеет второй порядок точности.

Справочная информация

Профиль скорости полностью развитого ламинарного течения вязкой несжимаемой жидкости в круглой трубе радиуса R определяется по формуле:

$$u(y) = 2u_{av} \left(1 - \frac{y^2}{R^2} \right),$$

где u_{av} – средняя по сечению трубы скорость течения жидкости. В рассматриваемой задаче эта скорость равна скорости жидкости на входе в трубу.

Сдвиговое напряжение жидкости на стенке трубы находится из выражения:

$$\tau_w \equiv \tau_{xy} = \mu \left(\frac{\partial u(y)}{\partial y} \right)_{y=R} = -\mu \frac{4u_{av}}{R}$$

Сила трения, действующая со стороны жидкости на стенку трубы, определяется по формуле:

$$F_{fric} = - \int_S \tau_w ds = - \int_0^L 2\pi R \tau_w dx = 8 \cdot \pi \cdot u_{av} \cdot L \cdot \mu.$$

Коэффициент трения жидкости о поверхность трубы определяется по формуле:

$$c_D = \frac{F_{fric}}{\frac{1}{2} \rho u_{av}^2 S} = \frac{8 \cdot \pi \cdot u_{av} \cdot L \cdot \mu}{\frac{1}{2} \rho u_{av}^2 \cdot \pi \cdot D \cdot L} = \frac{16}{\text{Re}},$$

где $\text{Re} = \rho u_{av} D / \mu$.

2. ТУРБУЛЕНТНОЕ ТЕЧЕНИЕ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ В КРУГЛОЙ ТРУБЕ

2.1. Описание задачи

Рассмотрим задачу о турбулентном течении жидкости в круглой трубе постоянного сечения, рис. 2.1. Диаметр трубы $D = 0.2$ м, длина трубы $L = 8$ м. Скорость жидкости на входе в трубу $U_z = 1$ м/сек является постоянной по всему входному сечению. Жидкость вытекает в окружающую среду, давление которой равно 1 атм. Примем плотность среды $\rho = 1$ кг/м³, а коэффициент вязкости $\mu = 2 \times 10^{-5}$ Па·с. Число Рейнольдса, построенного на основе диаметра трубы равно:

$$\text{Re} = \frac{\rho U_z D}{\mu} = 10000$$

При таких значениях числа Рейнольдса течение в трубе будет полностью турбулентным.

Решим эту задачу, используя FLUENT с помощью ANSYS Workbench. Построим поля скорости и давления внутри трубы, и проверим результаты.

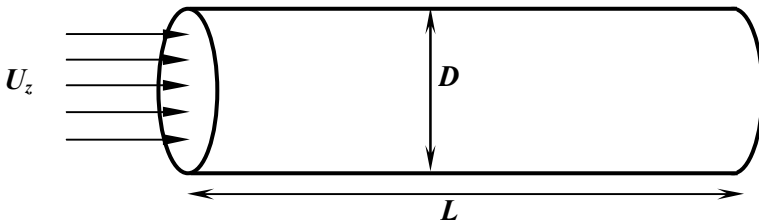


Рис. 2.1

2.2. Предварительные замечания

При турбулентном течении возникают мелко-масштабные по времени пульсации. Обычно, эти пульсации не удастся разрешить, применяя средства вычислительной гидродинамики. Поэтому такие переменные потока, как скорость, давление и т.д., усредняются по времени. К сожалению, усредненные по времени определяющие уравнения не замыкаются. (Т.е. они содержат пульсационные величины, которые

нужно определить с помощью каких либо моделей турбулентности). До сих пор не существует единой модели турбулентности, которая бы была справедлива для всех типов течений, и поэтому необходимо выбирать и настраивать модель для конкретного класса течений.

В данном задании рассматриваются только, так называемая, $k-\epsilon$ модель турбулентности. При решении же практических задач необходимо проводить тщательный анализ вида течения, чтобы обосновано выбрать ту или иную модель турбулентности. $k-\epsilon$ модель турбулентности включает в себя два уравнения – для турбулентной кинетической энергии k , и для скорости диссипации турбулентной энергии ϵ . Эти два уравнения решаются совместно с осредненными по времени уравнениями неразрывности, импульса и энергии. Расчеты турбулентных течений занимают гораздо больше времени, чем расчеты ламинарных течений.

2.3. Создание проекта в ANSYS Workbench

1) Запускаем ANSYS Workbench:

Start> All Programs> ANSYS 14.0> Workbench 14.0.

На рис. 2.2 показано окно Workbench:

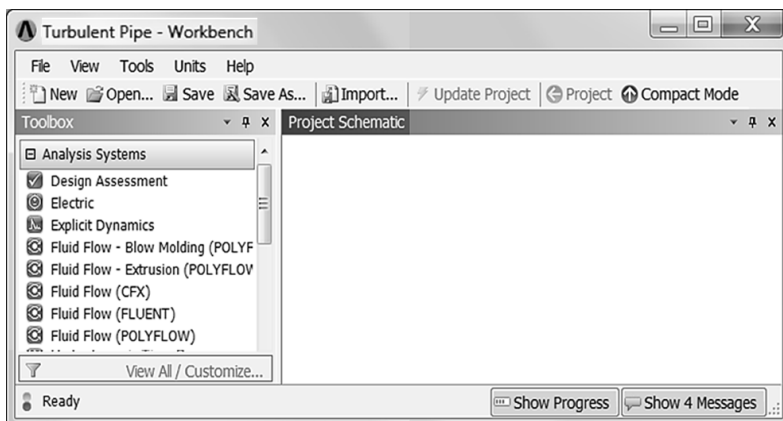


Рис. 2.2

В левой стороне окна Workbench будет находиться панель инструментов, заполненная системами для решения различных физических задач. Посредине будет организован создаваемый проект. В окне Analysis Systems дважды щелкаем по строке Fluid Flow (FLUENT). Окно Workbench будет выглядеть как на рис. 2.3.

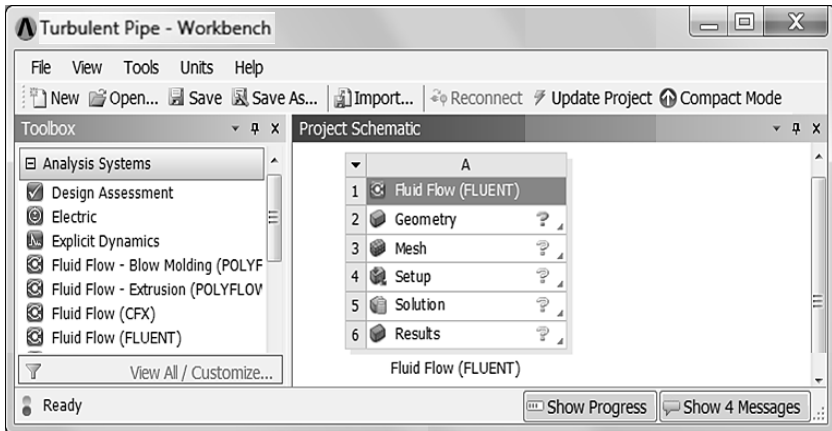


Рис. 2.3

- 2) В окне Property of Schematic, в разделе Advance Geometry Options измените значение Analysis Type на 2D, поскольку далее мы будем использовать двумерную модель.
- 3) Сохраните проект под именем Turbulent Pipe.
- 4) В окне Project Schematic (окна Workbench) кликните правой кнопкой мышки на Geometry и выберите Properties, как показано на рис. 2.4. В правой части окна Workbench появится окно Property of Schematic.
- 5) Импортируем геометрию из задачи о ламинарном течении жидкости в трубе. В окне Project Schematic кликаем правой кнопкой мыши по Geometry и в появившемся окне выбираем Import Geometry, затем выбираем Browse, рис. 2.5:

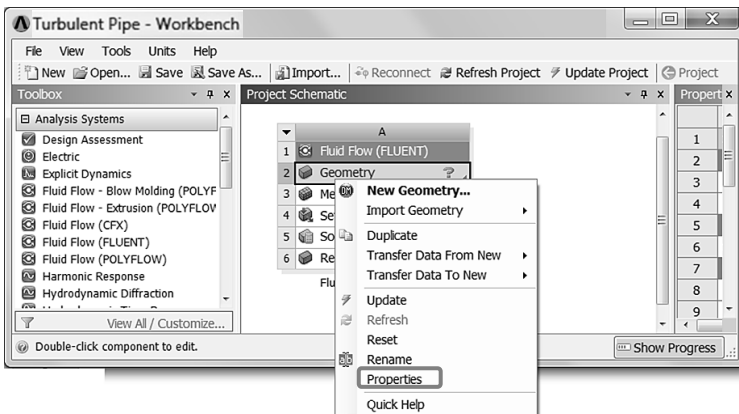


Рис. 2.4

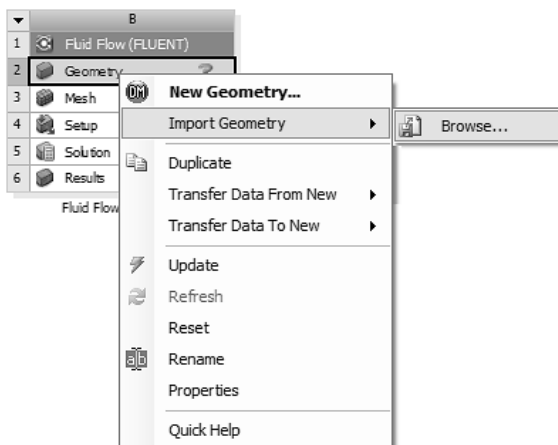


Рис. 2.5

6) В появившемся окне выбираем файл, в котором хранится геометрия трубы, созданная нами в предыдущей задаче, рис. 2.6.

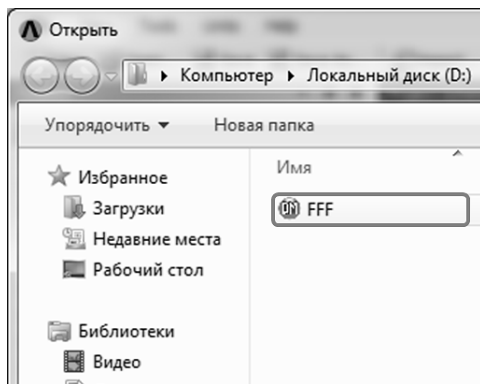


Рис. 2.6

7) В окне проекта кликаем правой кнопкой мыши по строке Mesh и далее Edit, рис. 2.7. После этого откроется окно Meshing.

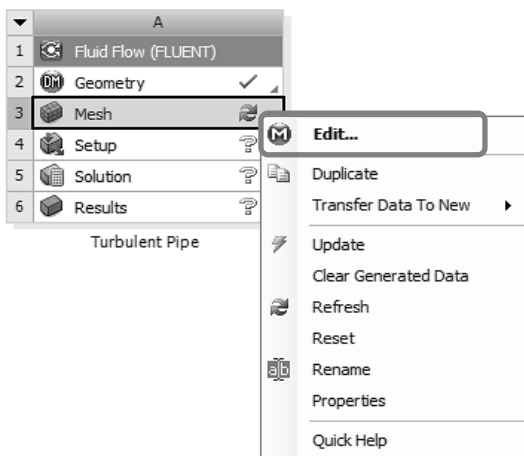


Рис. 2.7

2.4. Построение сетки

Сетка будет состоять из 3000 элементов, в продольном направлении выбираем 100 элементов, а в поперечном 30 элементов. Сетку построим так, чтобы она сгущалась к стенке.

- 1) Генерируем сетку: Generate Mesh.
- 2) Применяем стиль Mapped Face Meshing. Чтобы включить этот стиль выполняю последовательность Mesh Control→ Mapped Face Meshing, рис. 2.8.
- 3) Кликаем по геометрической области, после чего она окрашивается в зеленый цвет. После этого кликаем Apply на панели Details of “Mapped Face Meshing”, рис. 2.9.

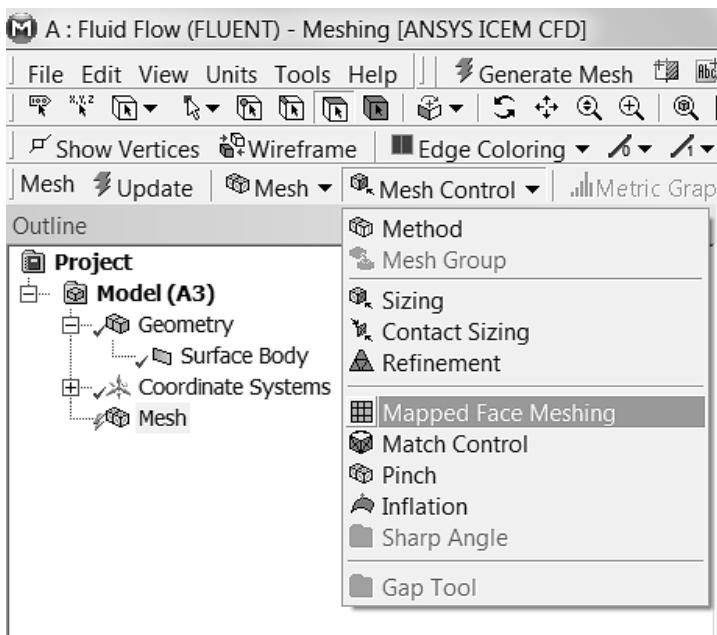


Рис. 2.8

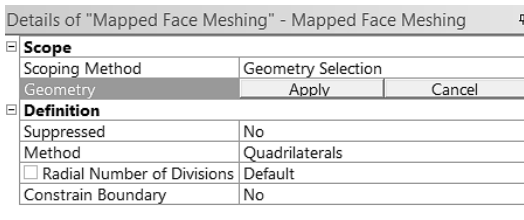



Рис. 2.9

2.4.1. Задание узлов сетки на границе области

- 1) Сначала зададим число разбиений вдоль осевого направления. Для этого кликаем Mesh Control > Sizing.
- 2) Кликаем по фильтру Edge . Затем подвдвим курсор к нижней границе прямоугольника, (она при этом окрасится в зеленый йцвет), нажимаем левую кнопку мыши, и не опуская ее переводим курсор к верхней границе прямоугольника. После этой процедуры обе границы должны быть окрашены в зеленый цвет. После этого кликаем Apply на панели Details of "Sizing".
- 3) На панели Details of "Sizing" в поле Type выбираем Number of Divisions и устанавливаем значение 100.
- 4) Значение поля Behavior меняем на Hard.
- 5) Прodelываем аналогичную процедуру с п.1 по п.2 для левой границы. На панели Details of "Sizing" в строке Type выбираем Number of Divisions и устанавливаем значение 30.
- 6) Значение поля Behavior меняем на Hard.
- 7) Значение поля Bias Type меняем на **Biased**, а значение поля Bias Factor устанавливаем равным 10.
- 8) Прodelываем те же операции, что и в п.5-7 для правой границы, с той лишь разницей, что значение поля Bias Type выбираем: **Biased**.
- 9) Поле этого в строке меню кликаем Generate Mesh. После всех выполненных сетка будет иметь вид:
- 10) В разделе статистика панели Details of "Mesh" можно видеть, что число элементов получилось 3000.

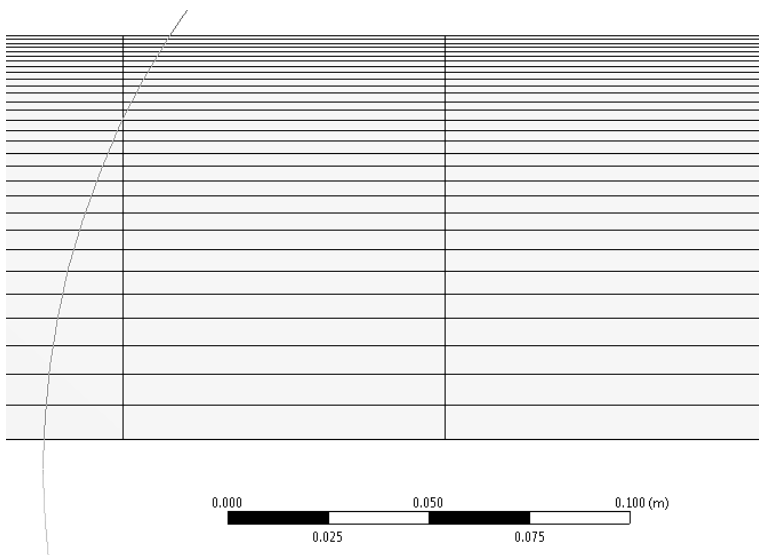



Рис. 2.10

2.4.2. Присвоение имен границам области

Левую границу области назовем Inlet, правую – Outlet, нижнюю – Axis, верхнюю Wall. Эти имена пригодятся на последующих шагах при построении модели с помощью программы Fluent.

- 1) Выполнить клик правой кнопкой мыши по свободному полю, где нарисована область с построенной сеткой. Из строки Cursor Mode выбрать фильтр Edge . Подвести курсор к левой границе, когда она окрасится в зеленый цвет, выполнить левый клик мышкой, после этого выполнить правый клик мышкой. В появившемся контекстном меню выбрать Create Named Selection, рис. 2.11.
- 2) Появится окно Selection Name, рис. 2.12, в которое следует ввести Inlet. Нажать ОК. Подобную операцию проделать со всеми границами, вводя соответствующие имена.

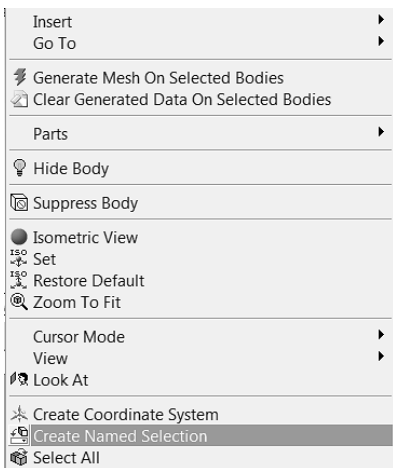


Рис. 2.11

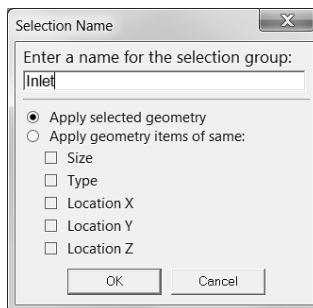



Рис. 2.12

2.4.3. *Сохранение, выход, обновление*

- 1) Сохраните проект. File→Save project
- 2) Закройте окно Meshing. File→ Close Meshing.
- 3) Перейдите в окно Workbench и обновите проект, нажав на кнопку Update Project,  Update Project , которая находится под строкой меню.
- 4) Окно проекта примет вид, рис. 2.13:

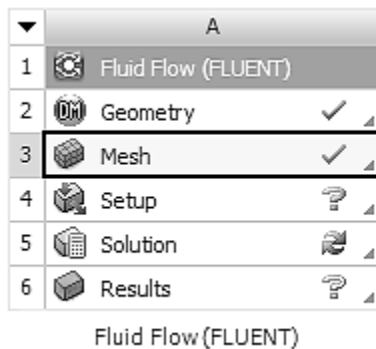


Рис. 2.13

2.5. Запуск ANSYS FLUENT

- 1) Чтобы считать геометрию и сетку во FLUENT кликните правой кнопкой мыши по Setup и в контекстном меню выберите Refresh
- 2) После чего, следует кликнуть на Update. В правой части ячейки Setup должен появиться знак вопроса, который означает, что процесс еще не завершен.
- 3) Дважды кликните на Setup. Загрузится FLUENT Launcher.
- 4) В разделе Options поставьте галочку рядом Double Precision
- 5) Нажмите на ОК. FLUENT будет запущен.
- 6) Проверяем информацию о разностной сетке Mesh→Info→Size.
- 7) Проверяем сетку на наличие ошибок Mesh→Check,

2.5.1. Внесение данных в решатель

- 1) Задаем осесимметричную геометрию области. В разделе General→Solver→2D Space выбираем Axisymmetric.
- 2) Отключаем уравнение энергии:
Problem Setup → Models→ Energy→Off.
- 3) Устанавливаем модель турбулентного течения: Problem Setup → Models→Viscous-Laminar→Edit. Откроется окно Viscous Model, в котором выбираем значение k-epsilon (2 eqn), рис. 2.14.

- 4) В группе Near Wall Treatment выбираем модель неравновесных пристеночных функций: Enhanced Wall Function. В этом случае выбор пристеночных функций будет происходить в зависимости от того какова величина y_+ . Будут использованы либо стандартные пристеночные функции ($30 < y_+ < 100$), либо функции, соответствующие двухслойной модели ($y_+ < 30$).
- 5) Кликаем ОК.

2.5.2. Задание свойств жидкости

Свойства жидкости были указаны при постановке задачи.

- 4) Для создания жидкости с такими свойствами выполняем следующие действия: Problem Setup → Materials → Fluid → Create/Edit.
- 5) В появившемся окне устанавливаем плотность 1 кг/м^3 и вязкость $2 \cdot 10^{-5} \text{ кг/(м·сек)}$.
- 6) Кликаем кнопку Change/Create, затем Close.

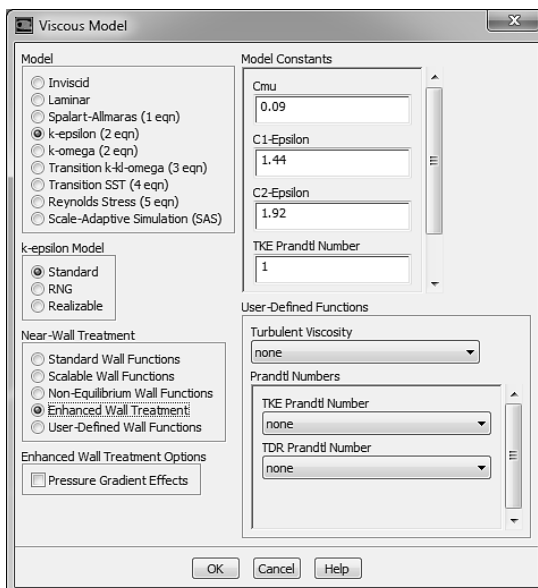


Рис. 2.14

2.5.3. Задание граничных условий

По условию задачи необходимо задать условия на четырех границах.

- 1) Задаем условия на входной границе: Problem Setup→Boundary Conditions→Zone (Inlet)→Edit, как показано на рис. 2.15. Задание скорости на входе 1 м/сек обеспечивает $Re=10000$.
- 2) В разделе Turbulence в строке Specification Method выбираем значение Intensity and Hydraulic Diameter. Устанавливаем значение Turbulent Intensity равным 1%, а Hydraulic Diameter 0.2 м.

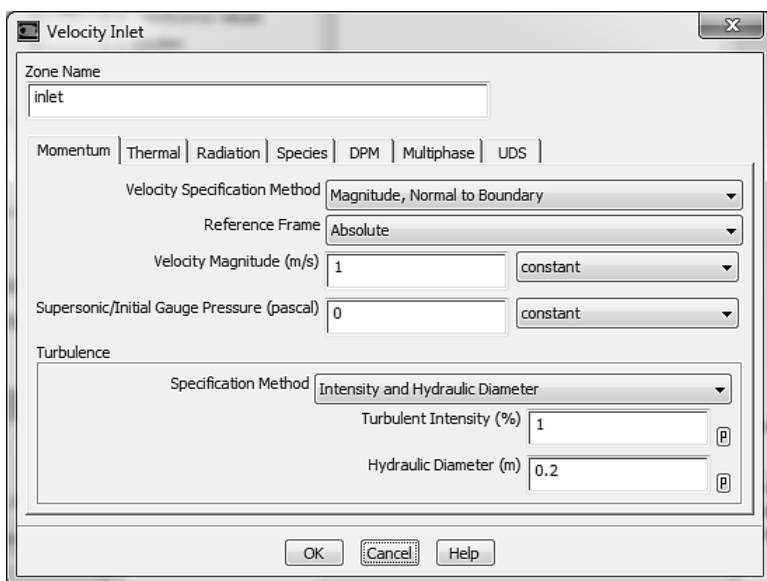


Рис. 2.15

- 3) Кликаем на ОК.
- 4) На всех других границах устанавливаем те же значения, что и в предыдущей задаче.
- 5) После задания настроек, сохраните проект через строку меню File→Save Project.

2.5.4. Выбор разностной схемы

Для решения поставленной задачи мы будем использовать алгоритм SIMPLE метода Патанкара, с привлечением противопоточной схемы второго порядка точности для конвективных членов в уравнении сохранения импульса, для уравнения кинетической турбулентной энергии и уравнения диссипации турбулентной энергии.

В разделе Solution выбираем Solution Methods. Значения соответствующих полей должны быть выбраны так, как показано на рис. 2.16.

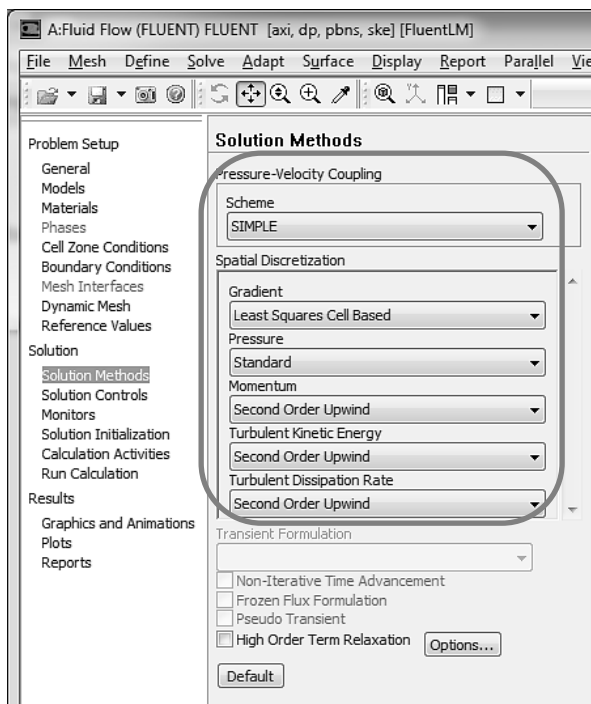


Рис. 2.16

2.5.5. Настройка критерия сходимости

Мы будем итерировать каждое уравнение до тех пор, пока невязка не упадет ниже 10^{-6} . Для задания критерия невязки выполняем следующие действия.

- 1) Solution → Monitors → Residuals, Statistic and Force Monitors → Residuals → Edit.
- 2) В появившемся окне Residual Monitors изменяем значения Absolute Criteria, расположенные напротив строк Residual для continuity, x-velocity, y-velocity, k и epsilon на 10^{-6} рис. 2.17.
- 3) В разделе Options ставим галочки напротив Print to Console и Plot.
- 4) Жмем на ОК.

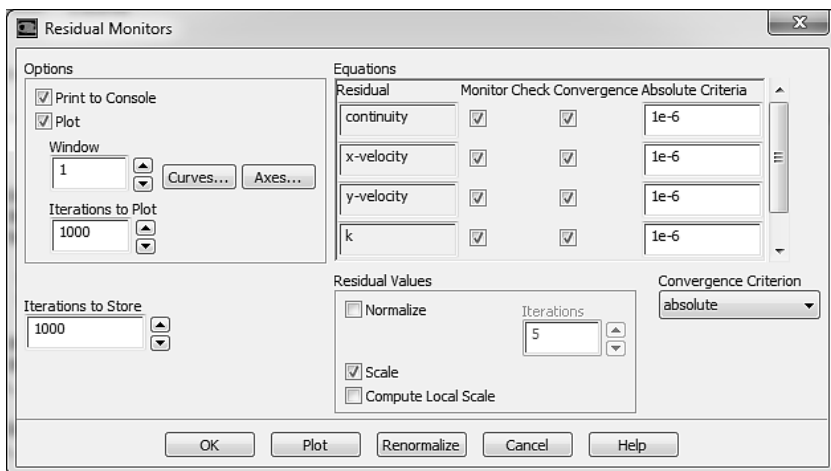


Рис. 2.17

2.5.6. Задание начальных условий

- 1) В разделе Solution выбираем Solution Initialization.
- 2) Меняем метод инициализации на Standard Initialization.
- 3) Кликаем на Compute from и выбираем inlet.

4) Кликаем Initialize.

2.5.7. Сохранение проекта

File → Save Project

2.5.8. Выполнение расчетов

Задаем число итераций равное 700

- 1) Solution → Run Calculation.
- 2) В строке Number Iterations задайте число итераций 700.
- 3) Нажмите кнопку Calculate.
- 4) Невязки на каждой итерации будут выводиться в окно консоли и строиться в виде зависимостей от номера итерации в графическом окне, рис. 2.18. Решение сойдется за 220 итераций. Здесь понадобилось больше итераций, чем при решении задачи о ламинарном течении, т.к. здесь была использована более мелкая разностная сетка.

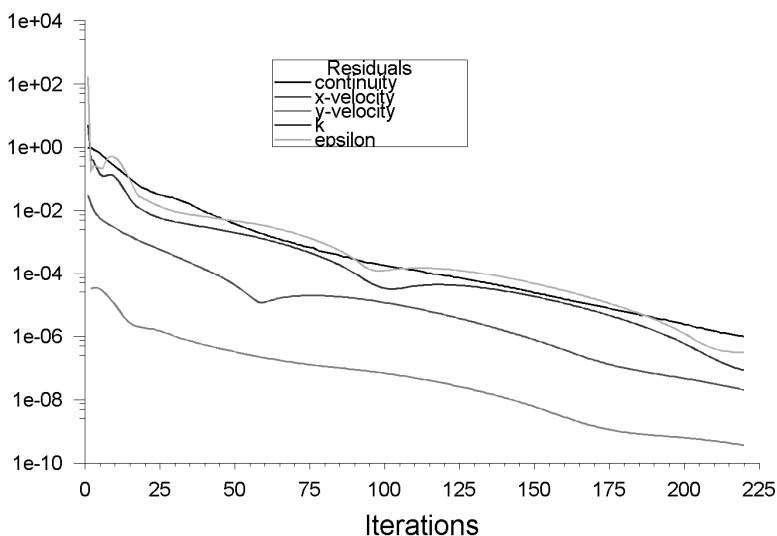


Рис. 2.18

2.6. Обработка результатов расчета

Обработаем результаты расчетов с помощью средств встроенных во FLUENT

2.6.1. Расчет местного коэффициента трения

В примере о ламинарном течении в трубе мы показывали, как можно строить распределения каких либо параметров вдоль трубы или поперек трубы. По умолчанию FLUENT содержит определенный (стандартный) набор параметров, распределение которых можно посмотреть, например, давление, скорость, сдвиговое напряжение на стенке трубы и т.д. Другой набор параметров (дополнительный) требуется подключать. Например, если мы хотим вывести распределение местного коэффициента трения на поверхности трубы, то через меню выполняем следующие действия:

- 1) File→Data File Quantities, как показано на рис. 2.19. Откроется окно Data File Quantities.
- 2) В разделе Additional Quantities этого окна выбираем Skin Friction Coefficient, рис. 2.20.
- 3) Кликаем ОК.

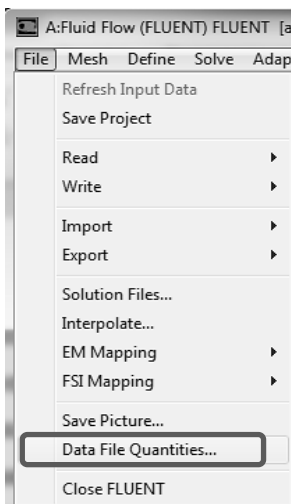


Рис. 2.19

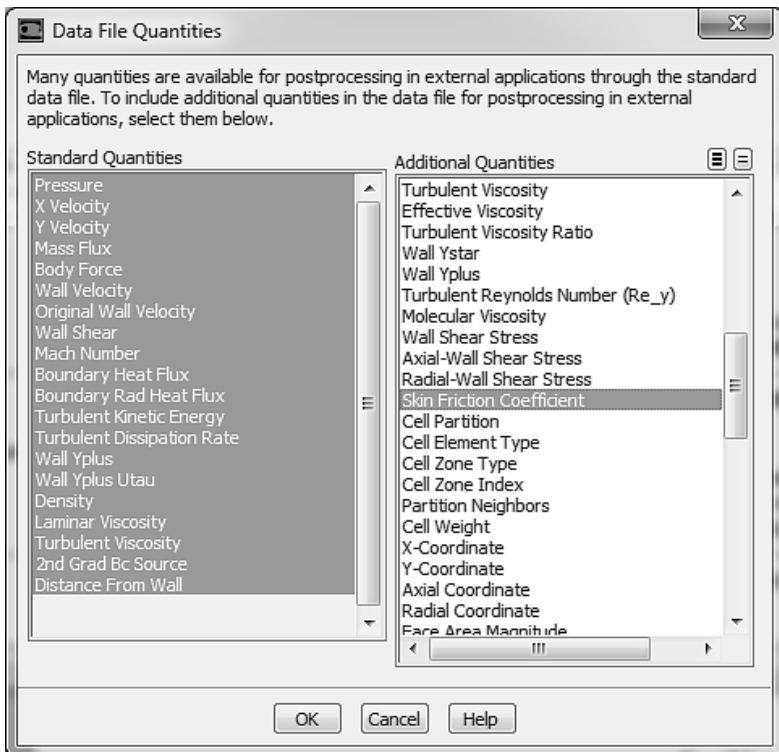


Рис. 2.20

Теперь коэффициент поверхностного трения будет доступен в разделе Results

Для построения этого параметра вдоль стенки трубы выполним действия:

- 1) Results→Plots→XYPlot→SetUp
- 2) В качестве Y Axis Function выбираем Wall Fluxes и Skin Friction Coefficient, рис.21.
- 3) Остальные настройки показаны на рис. 2.21.
- 4) Жмем кнопку Plot. В графическом окне, рис. 2.22, появится распределение местного коэффициента трения вдоль стенки трубы.

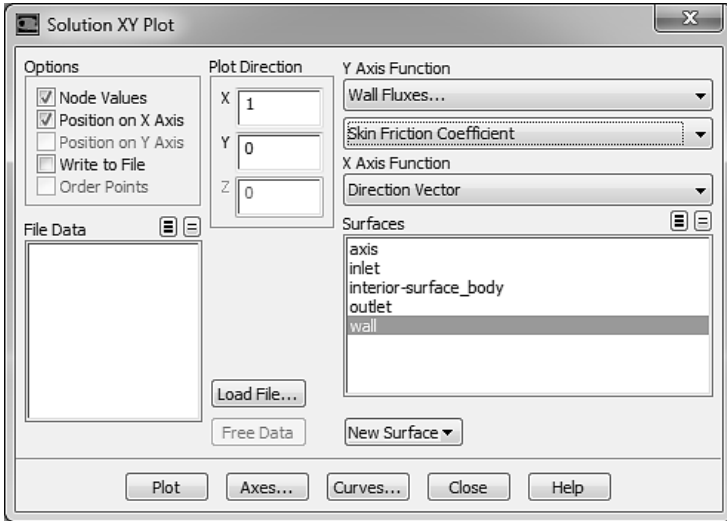


Рис. 2.21

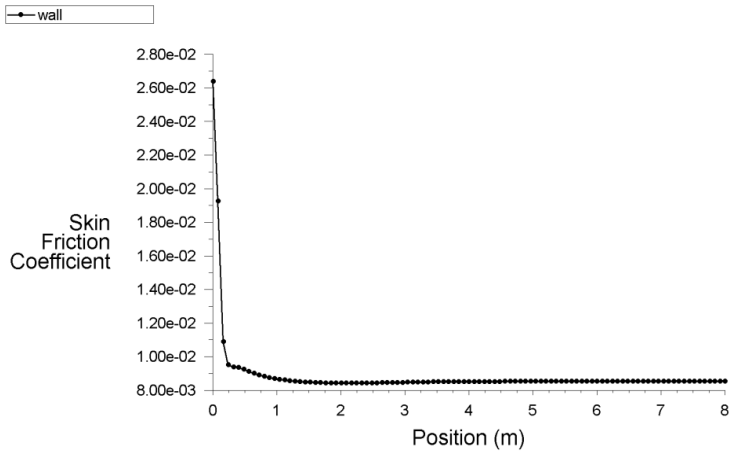


Рис. 2.22

Коэффициент сопротивления по всей боковой поверхности можно определить двумя способами.

Первый способ: Найти среднее интегральное значение от местного коэффициента трения по боковой поверхности трубы.

- 1) Results→Reports→Surface Integrals→SetUp
- 2) В появившемся окне Surface Integrals в разделе Report Type выбрать Area-Weighted Average, в разделе Field Variable выбрать Wall Fluxes и Skin Friction Coefficient, в разделе Surfaces выбрать wall.
- 3) Нажать кнопку Compute. В окно консоли будет выведено число 0.0087826382.

Второй способ: Используя возможности раздела Force.

- 1) Results→Reports→Force→SetUp.
- 2) В появившемся окне Force Reports в разделе Options выбрать Forces, в разделе Wall Zones выбрать wall.
- 3) Нажать Print.
- 4) В окно консоли будет выведена информация о силах, действующих на боковую поверхность канала, и коэффициентах. Смотрим число, стоящее под coefficients и Viscous: 0.0087826389.

2.6.2. Контроль и проверка решения

Для проверки выполнения интегральных законов сохранения (сохранение массы и импульса) можно поступить аналогично тому, как было описано в задаче о ламинарном течении в трубе.

Сравнение можно провести и с имеющимися экспериментальными данными по коэффициенту сопротивления λ для трубы, который определяется из формулы:

$$\lambda = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2} \rho u_{av}^2} \frac{D}{L},$$

где ΔP – перепад давления вдоль трубы.

Коэффициент сопротивления λ связан с коэффициентом трения C_D зависимостью:

$$\lambda = 4C_D.$$

Известна формула Г. Блазиуса для коэффициента сопротивления турбулентному течению в гладких трубах с поперечным сечением

круглой формы, которая справедлива для чисел Re от $4 \cdot 10^3$ до 10^5 , где $Re = \rho u_{av} D / \mu$:

$$\lambda = \frac{0.3164}{Re^{0.25}}.$$

Для чисел $Re > 10^5$, более точной является экспериментальная формула Никурадзе

$$\lambda = 0.0032 + \frac{0.221}{Re^{0.237}}.$$

Тогда касательное напряжение на боковой стенке трубы будет вычисляться по формуле:

$$\tau_w = \frac{\lambda}{8} \rho u_{av}^2.$$

Для $Re = 10^4$ и исходных данных $\rho = 1 \text{ кг/м}^3$, $u_{cp} = 1 \text{ м/сек}$, получаем величину касательного напряжения 0.003955 Па .

Определим эту величину с помощью FLUENTA. Выполним действия:

- 1) Results → Reports → Surface Integrals → Set Up
- 2) В появившемся окне Surface Integrals в разделе Report Type выбрать Area-Weighted Average, в разделе Field Variable выбрать Wall Fluxes и Wall Shear Stress, в разделе Surfaces выбрать wall.
- 3) Нажать кнопку Compute. В окно консоли будет выведено число 0.0043913191

Как видим, расхождение между экспериментальным значением и расчетным составляет 11%.

Другой способ проверки – нахождение отношения максимальной скорости жидкости (на оси) u_m к средней скорости u_{cp} . Известно, что профиль скорости развитого турбулентного течения жидкости в трубе для чисел Re от 10^4 до 10^6 с достаточной степенью точности аппроксимируется следующей формулой:

$$u(y) = u_m \left(1 - \frac{y}{R} \right)^{1/7},$$

где R – радиус трубы.

Тогда выражение для средней скорости имеет вид:

$$u_{\text{А}} = \frac{2}{R^2} \int_0^R u(y)y dy = \frac{49}{60} u_m .$$

Согласно проведенным расчетам отношение u_m/u_{av} составляет 1.195, что на 2.4% меньше «точного» значения $60/49=1.224$.

Результаты расчетов также можно проверить, используя тот факт, что в теории турбулентного движения профиль скорости жидкости вблизи стенки (в турбулентном погранслое) является логарифмическим. Для определения местного коэффициента трения $c_D = \tau_w / (0.5\rho u_{\text{А}}^2)$ имеет место уравнение:

$$\sqrt{\frac{2}{c_D}} = 2.5 \ln \left(\frac{1}{2} \text{Re} \sqrt{\frac{c_D}{2}} \right) + 1.75 .$$

Решение этого нелинейного уравнения для $\text{Re}=10^4$ дает величину $c_D = 0.007719$, которая меньше рассчитанного значения 0.0087826389 на 13.8%.

Логарифмический профиль скоростей в турбулентном погранслое позволяет определить отношение осевой скорости к средней скорости потока u_m/u_{av} :

$$\frac{u_m}{u_{av}} = \frac{2.5 \ln \left(\frac{1}{2} \text{Re} \sqrt{\frac{c_D}{2}} \right) + 5.5}{2.5 \ln \left(\frac{1}{2} \text{Re} \sqrt{\frac{c_D}{2}} \right) + 1.75} ,$$

которое равно 1.233, что на 3.1% выше полученного из расчетов.

2.7. Задание для самостоятельной работы

Решите задачу о развитии турбулентного течения несжимаемой жидкости в трубе длиной 8 метров, диаметром 0.2 метра. Плотность

жидкости 1 кг/м³, вязкость жидкости 0.00002 Па·с, скорость жидкости на входе в трубу 1 м/с.

Для решения используйте FLUENT, схему второго порядка аппроксимации для уравнения сохранения импульса. Решение требуется получить на разностных сетках 100 × 15, 100 × 30, 100 × 60 (осевое разбиение × радиальное разбиение).

Для получения правильного решения задачи о турбулентном течении в трубе, необходимо помнить, что первый пристенный узел разностной сетки должен лежать либо в вязком подслое, либо находится в области, где имеет место логарифмический профиль скоростей. Т.е. должно выполняться какое-либо из двух неравенств: $y^+ < 5$, либо

$$y^+ > 70, \text{ где } y^+ = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \frac{y}{\nu}; \nu - \text{кинематическая вязкость жидкости,}$$

м²/с. Для определения величины y^+ необходимо выполнить следующие действия: Display→Contours. Далее в окне Contours of выбрать поле Turbulence и поле Wall YPlus. Далее кликнуть на кнопку Compute. В окне Max появится значение величины y^+ . Убедитесь, что оно меньше 5.

1. Постройте профили осевой скорости на выходе из трубы, полученные на трех различных сетках. Также постройте профиль скорости, полученный из решения задачи о развитом течении несжимаемой жидкости в трубе постоянного сечения. На одном графике должно быть 4 кривых. Осевая скорость должна быть отложена на оси абсцисс, а радиальная координата – по оси ординат.

2. Рассчитайте сдвиговое напряжение τ_w на стенке в области полностью развитого течения на трех сетках. Рассчитайте это значение из теории полностью развитого течения жидкости в трубе. Для каждой сетки рассчитайте ошибку относительно аналитического решения. Поместите результаты расчетов в таблицу:

Сетка	τ_{xy}	% ошибка

3. На выходе из трубы, где течение полностью развитое, ошибку в осевой скорости на оси симметрии можно определить как

$$\varepsilon = \frac{|u_{calc} - u_{exact}|}{u_{exact}}$$

Ожидается, что ошибка будет иметь вид: $\varepsilon = K \Delta r^p$, Δr – размер ячейки в радиальном направлении, K и p – постоянные, значение которых будет зависеть от выбранной разностной схемы. Используя метод наименьших квадратов, предварительно прологарифмировав зависимость $\ln \varepsilon = \ln K + p \cdot \ln \Delta r$, найти постоянные K и p .

4. Посмотрите, как изменится значение p при смене разностной схемы с "second-order upwind" на "first-order upwind". На графике должно быть изображено четыре кривые. По две для каждой разностной схемы. Сравните значения p и дайте объяснение полученным результатам. Следует помнить, что схемы второго и первого порядка точности применяются только для инерционных членов уравнения сохранения импульса, а дискретизация вязких членов всегда имеет второй порядок точности.

3. ЗАДАЧА О КОСОМ СКАЧКЕ УПЛОТНЕНИЯ

3.1. Описание задачи

Рассматривается задача о течении сжимаемого газа, набегающего со сверхзвуковой скоростью на бесконечный клин с углом при вершине 2θ . На рис. 3.1 приведена схема картины течения, ось x соответствует линии симметрии клина. Начальная скорость потока U больше скорости звука, $U > c$. В зависимости от величины угла θ и числа Маха, соответствующего начальной скорости потока, возможно возникновение косоугольного скачка уплотнения с углом между линией скачка и направлением набегающего потока β .

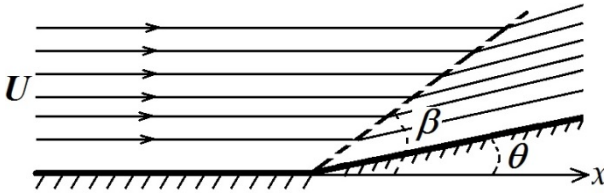


Рис. 3.1

Будем рассматривать течение газа в области со следующими размерами: $AB = 10$ м, $BC = 5$ м, $\theta = 30^\circ$, $AA_1 = 10$ м (см. рис. 3.2). Считаем, что на клин (BC) набегают поток воздуха с плотностью $\rho = 1.225$ кг/м³, вязкостью $\mu = 2 \cdot 10^{-5}$ Па·с, давлением $p = 101325$ Па. Скорость набегающего потока характеризуется числом Маха $M = 3$.

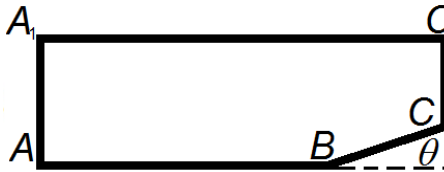


Рис. 3.2

Решение задачи выполним, используя FLUENT с помощью ANSYS Workbench.

3.2. Создание проекта в ANSYS Workbench

1) Запустите ANSYS Workbench: Start> All Programs> ANSYS 14.0> Workbench 14.0. Окно Workbench показано на рис. 3.3.

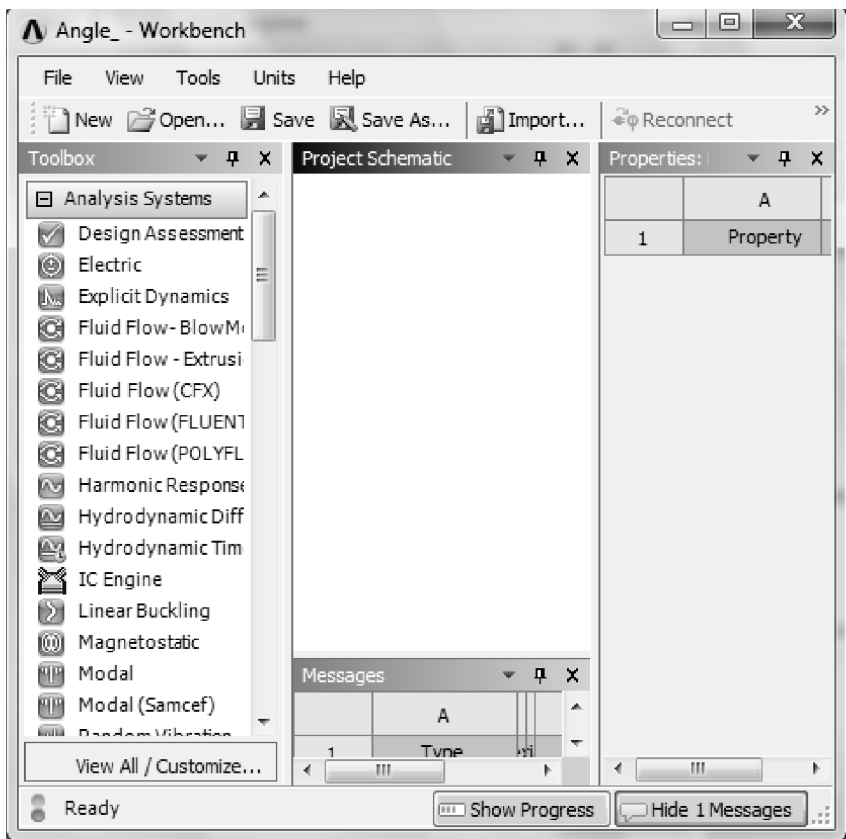


Рис. 3.3

В левой стороне окна Workbench будет находиться панель инструментов, заполненная системами для решения различных физических

задач. Посредине будет организован создаваемый проект. В окне Analysis Systems дважды кликните левой клавишей мыши по строке Fluid Flow (FLUENT). После этого окно Workbench будет выглядеть как на рис. 3.4.

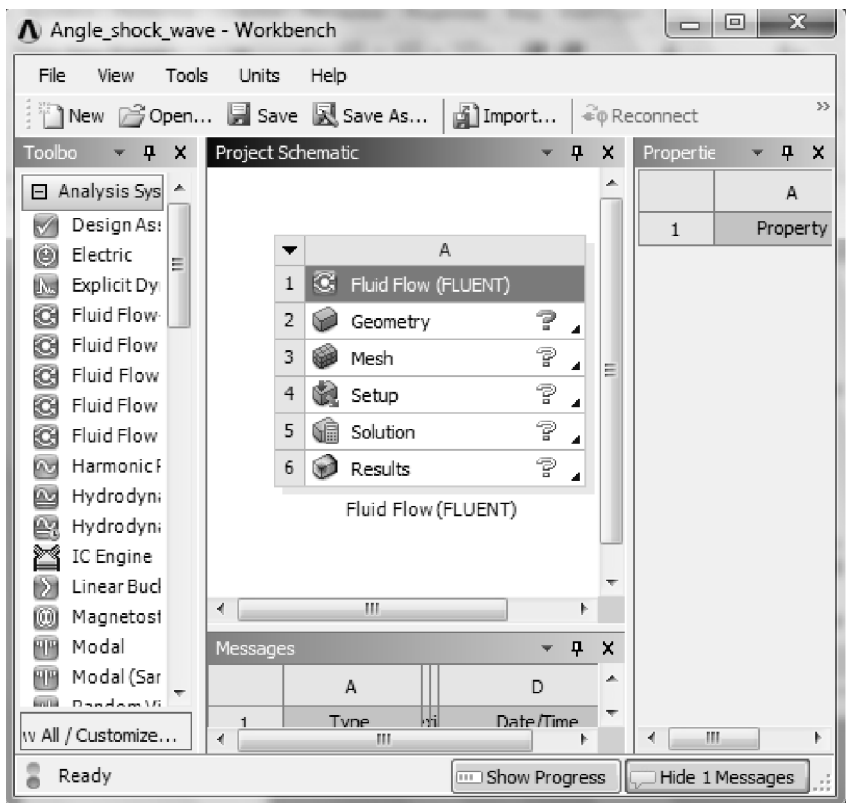


Рис. 3.4

- 2) Сохраните проект под именем Angle_shock_wave.
- 3) В окне Project Schematic (окна Workbench) кликните правой кнопкой мышки на Geometry и выберите Properties, как показано на

рис. 3.5. В правой части окна Workbench появится окно Property of Schematic.

4) В окне Property of Schematic, в разделе Advance Geometry Options измените значение Analysis Type на 2D, поскольку далее мы будем использовать двумерную модель течения газа.



Рис. 3.5

5) В окне Project Schematic дважды кликните левой клавишей мыши на Geometry чтобы начать подготовку построения геометрической

области. При этом произойдет запуск программы ANSYS Design Modeler. Вам будет предложено выбрать желаемую единицу измерения длины, рис. 3.6. Выберите метры и нажмите ОК.

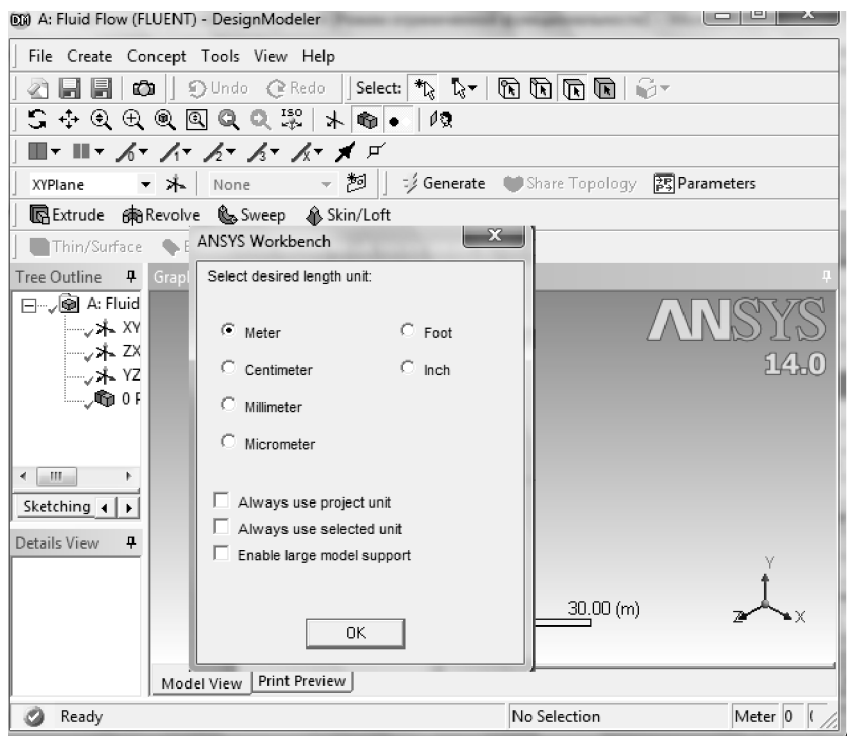



Рис. 3.6

3.2.1. Создание эскиза

1) В панели Graphics в нижнем правом углу кликните левой кнопкой мыши по оси +Z. После этого плоскость XY совпадет с плоскостью экрана. (Ось +Z будет смотреть на вас), рис. 3.7.

Чтобы приблизить или отдалить изображение на панели Graphics, следует кликнуть левой кнопкой мыши по панели и, вращая колесико

мышки, можно добиться желаемого результата. Если возникает необходимость переместить изображение влево, вправо, вверх, вниз, то следует кликнуть правой кнопкой мыши и в контекстном меню выполнить следующую последовательность действий: Cursor Mode→Pan.

После этого курсор примет форму . Кликнув по панели Graphics левой кнопкой мыши и удерживая ее, можно перемещать изображение в любом направлении.

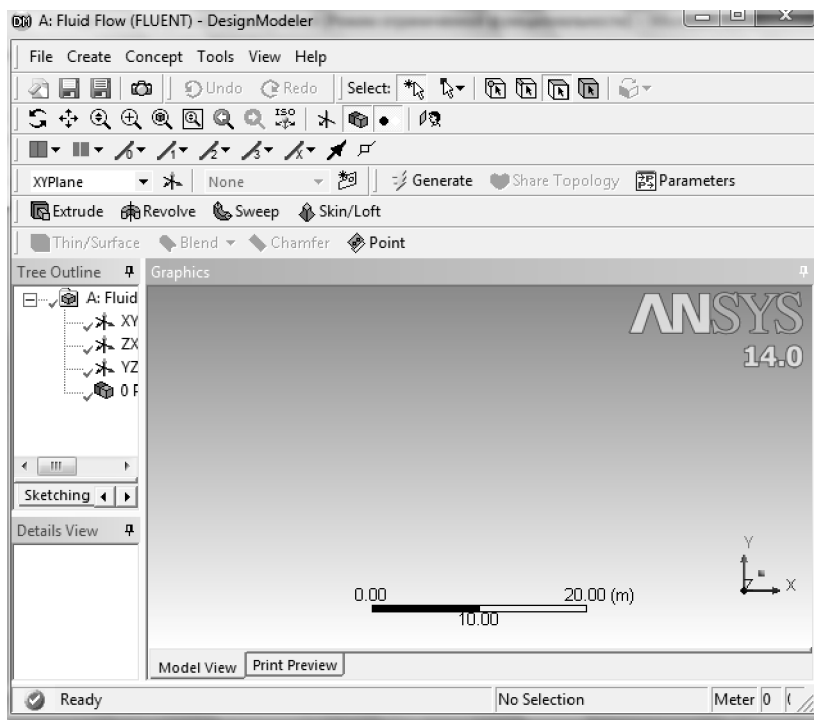


Рис. 3.7

2) Эскиз будем создавать в плоскости XY. Для этого на панели Tree Outline кликните по XYPlane (рис. 3.7). В левом нижнем углу панели Tree Outline выберите закладку Sketching. Вместо панели Tree Outline появится панель Sketching Toolboxes – панель инструментальных средств для построения эскиза, рис. 3.8. По умолчанию открывается набор инструментов Draw.

3) Перед построением области покажем координатную сетку. Для этого на панели Sketching Toolboxes кликните по табулятору Settings, находящемуся внизу панели, затем – по инструменту Grid и напротив Show in 2D установите галочку, рис. 3.9. После этого на панели Graphics будет показана координатная сетка, расстояние между координатными линиями по умолчанию равно 5 мм. Перейдите в набор инструментов Draw.

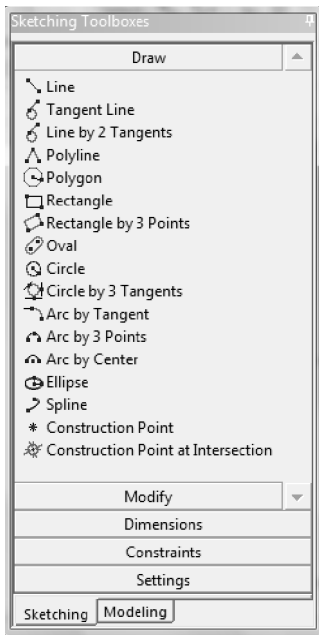


Рис. 3.8

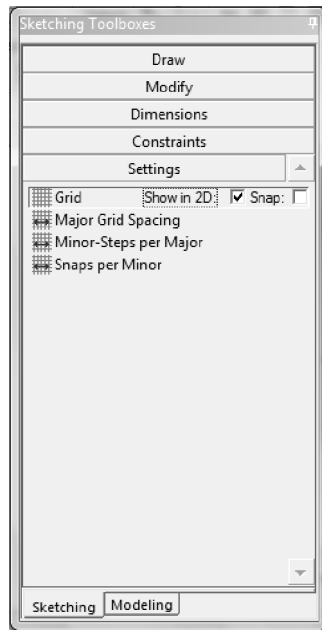


Рис. 3.9

4) На панели Draw в Sketching Toolboxes выберите Line и постройте 5 линий, ограничивающих область расчета, рис. 3.10. Для построения первой линии кликните левой кнопкой мыши в начале координат, затем проведите прямую в направлении оси x . Вторую линию постройте из конца первой линии под углом к оси x . Из конца второй линии строится третья линия и так далее до получения пятиугольника, качественно соответствующего рис. 3.2. Если курсор вести вдоль оси x , то рядом с курсором появляется буква H, вдоль оси y – буква V, если курсор поместить в начало координат, то рядом с ним появляется буква P.

5) Нанесем размеры на пятиугольник. На панели Sketching Toolboxes выбираем табулятор Dimensions → Generals. На панели Graphics подводя курсор к левой стороне пятиугольника, нажимая и удерживая левую кнопку мыши, отводим курсор влево. При этом появятся линии разметки. Такие же действия проделываем с нижней стороной и с наклонной стороной пятиугольника, только курсор отводим вниз. Для нанесения угла выбираем в табуляторе Dimensions опцию Angle, выделяем наклонную и нижнюю горизонтальную линии и ведем курсор вверх до появления разметки. На панели Details View, которая находится под панелью Sketching Toolboxes, в группе Dimensions: 4 устанавливаем размеры пятиугольника соответствующие входным данным задачи. Для того, чтобы вместо названий линий нанести на рисунок размеры фигуры выбираем на панели Sketching Toolboxes вкладку Dimensions, далее выбираем опцию Display и устанавливаем флажок на поле Value. В результате мы получили фигуру с нанесенными размерами, представленную на рис. 3.10.

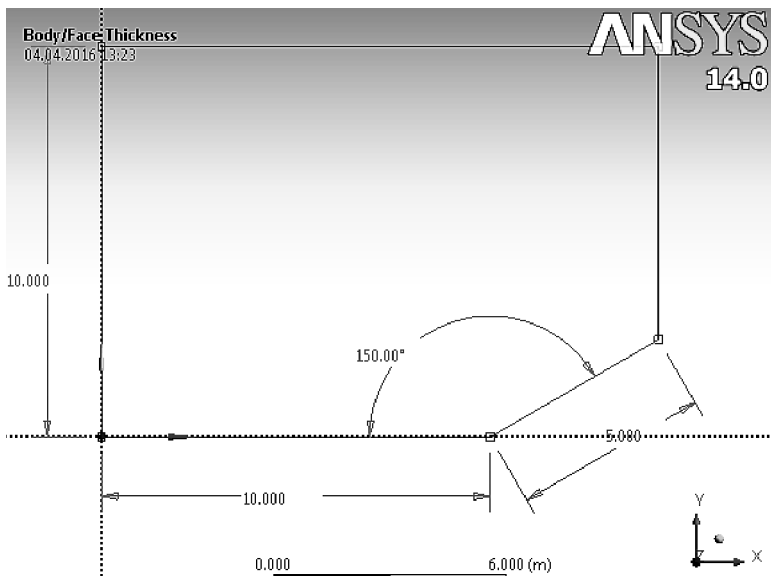


Рис. 3.10

3.2.2. Создание поверхности

1) Для создания поверхностей выбираем в меню Concept, а затем Surface From Sketches, как показано на рис. 3.11.

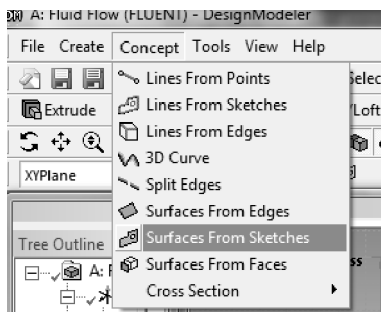


Рис. 3.11

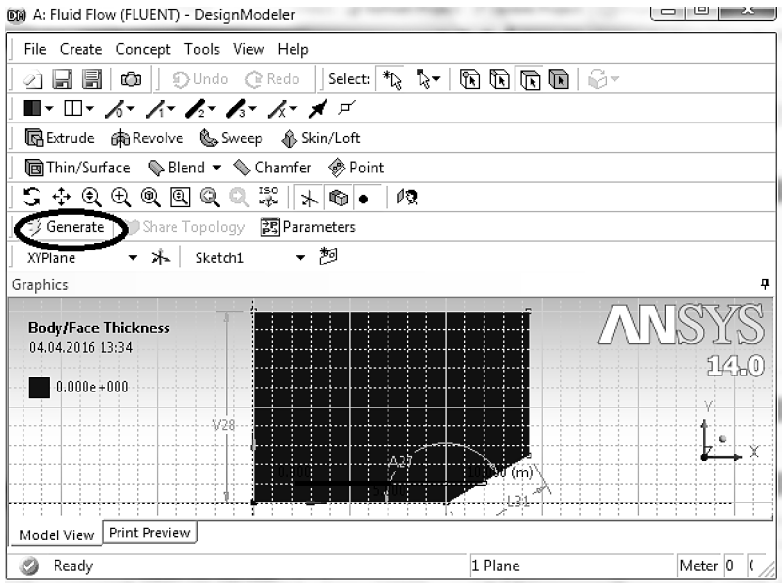


Рис. 3.12

2) На панели Tree Outline, выберите Sketch1, затем на панели Details View, напротив Thickness (≥ 0), выберите толщину 0.1m. Напротив Base Objects кликните Apply. Окончательно кликните Generate, чтобы сгенерировать поверхность, рис. 3.12.

3) На этом можно закрыть Design Modeler и вернуться в Workbench Project Schematic для построения разностной сетки.

3.2.3. Построение сетки

Будем решать задачу на равномерной сетке с фиксированным размером ячеек. Заходим в меню Mesh (рис. 3.13)

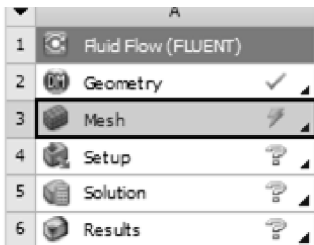


Рис. 3.13

1) Генерируем сетку: Generate Mesh (рис. 3.14).

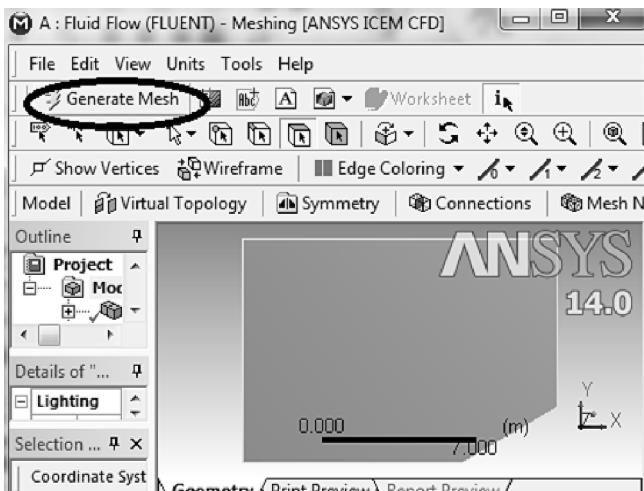


Рис. 3.14

2) Применяем стиль Mapped Face Meshing. Для этого на панели Outline кликаем Mesh. Затем на панели инструментов выполняем последовательность Mesh Control → Mapped Face Meshing, рис. 3.15.

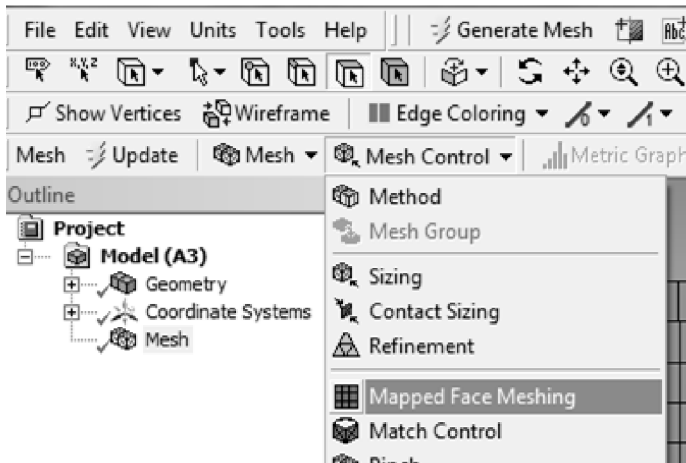


Рис. 3.15

3) Кликаем по геометрической области, после чего она окрашивается в зеленый цвет. После этого кликаем Apply на панели Details of “Mapped Face Meshing”, рис. 3.16.

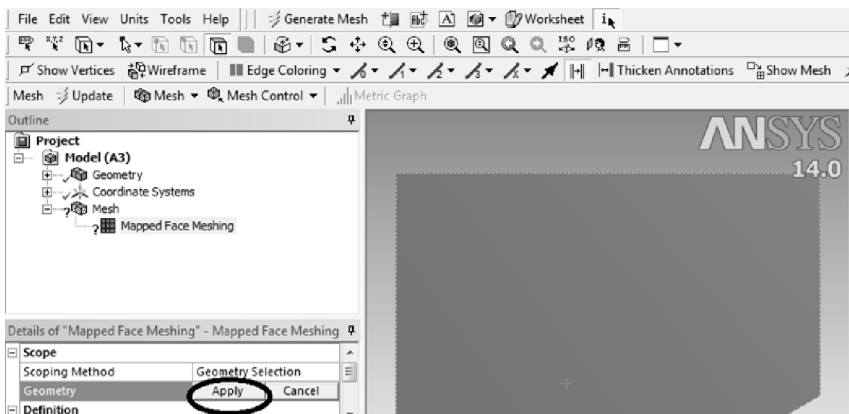


Рис. 3.16

3.2.4. Задание узлов сетки на границах

1) Сначала зададим число разбиений вдоль левой вертикальной границы (линия AA₁, рис. 3.2). Для этого кликаем Mesh Control > Sizing (рис. 3.17).

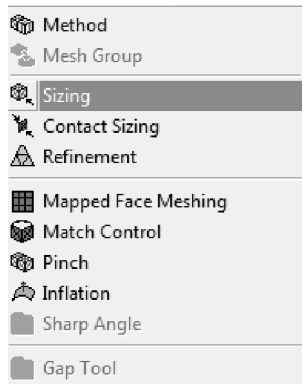


Рис. 3.17

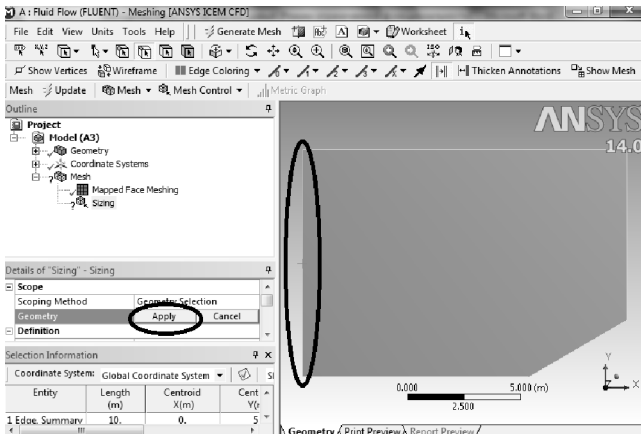



Рис. 3.18

2) Кликаем по фильтру Edge . Затем подводим курсор к линии AA₁, рис.3.2 (она при этом окрасится в зеленый цвет), нажимаем левую кнопку мыши. После этого кликаем Apply на панели Details of “Sizing” (рис. 3.18).

3) На панели Details of “Sizing” в поле Type выбираем Element Size и устанавливаем значение 0.2 (рис. 3.19)

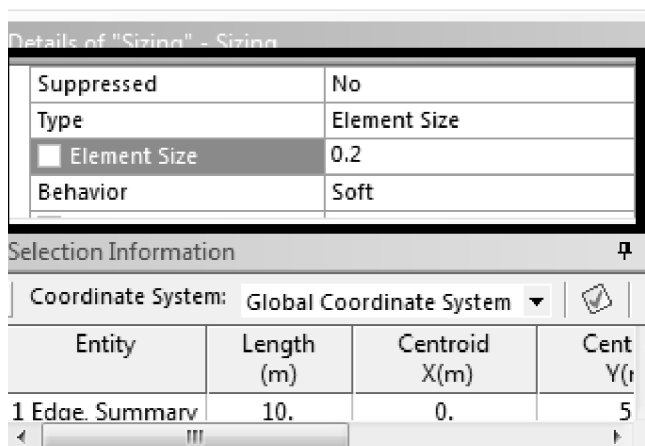
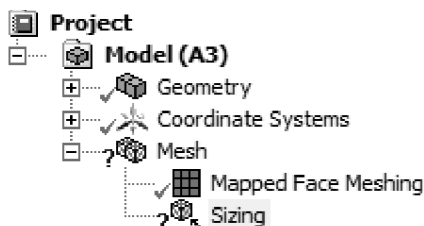


Рис. 3.19

- 4) Значение поля Behavior оставляем Soft (рис. 3.19).
- 5) Продельваем аналогичную процедуру с п.1 по п.4 для других границ.
- 6) После этого в строке меню кликаем Generate Mesh (рис. 3.20). Чтобы увидеть созданную сетку следует кликнуть на Mesh панели Outline. В разделе статистика панели Details of “Mesh” можно видеть, что число элементов получилось 3256.

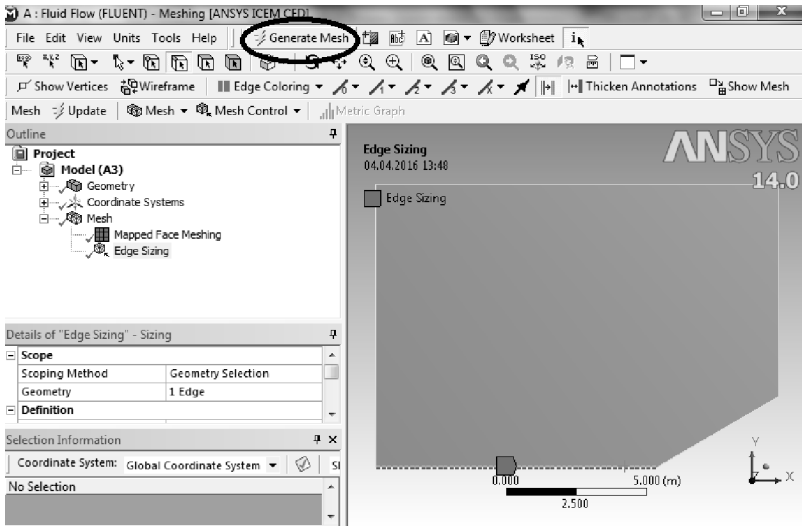



Рис. 3.20

7) Можно поступить по-другому и задать на границах фиксированное количество разбиений. Для этого в пункте 3 в поле Type нужно выбрать Number of Division. Построим сетку, задав значения разбиений согласно геометрическим пропорциям области расчета. Так, для линии AA_1 зададим 50 разбиений, линии BC – 25 разбиений, линии AB – 50, тогда линии A_1C_1 соответствует 75 разбиений, линии CC_1 – 25. Количество элементов равно 2625.

8) Будем решать задачу на сетке, содержащей 2625 элементов.

3.2.5. Присвоение имен границам области

1) Левую границу области (линия AA_1 , рис. 3.2) назовем Inlet, правую (линия CC_1 , рис. 3.2) – Outlet, нижнюю прямую (линия АВ, рис. 3.2) – Symmetry, нижнюю линию, направленную под углом (линия ВС, рис. 3.2) – Wall_Conus, верхнюю (линия A_1C_1 , рис. 3.2) Wall. Эти имена пригодятся на последующих шагах при построении модели с помощью программы Fluent.

2) Выполните клик правой кнопкой мыши по свободному полю, где нарисована область с построенной сеткой. Из строки Cursor Mode выберите фильтр Edge . Подведите курсор к левой границе, когда она окрасится в зеленый цвет, выполните левый клик мышкой, после этого выполните правый клик мышкой. В появившемся контекстном меню выберите Create Named Selection, рис. 3.21.

3) Появится окно Selection Name, рис. 3.22, в которое следует ввести Inlet. Нажать ОК. Подобную операцию проделать со всеми границами, вводя соответствующие имена.

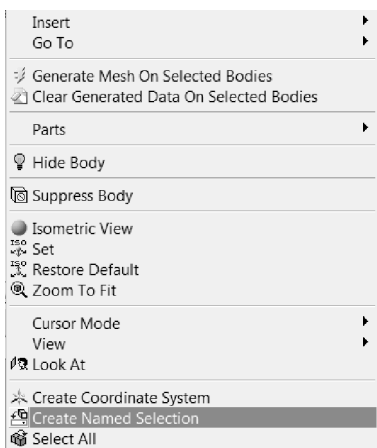


Рис. 3.21

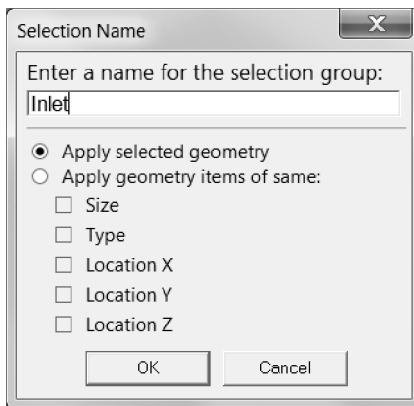



Рис. 3.22

3.2.6. Сохранение, выход, обновление

- 1) Сохраните проект. File→Save project
- 2) Закройте окно Meshing. File→ Close Meshing.
- 3) Перейдите в окно Workbench и обновите проект, нажав на кнопку Update Project,  Update Project , которая находится под строкой меню.
- 4) Окно проекта примет вид, рис. 3.23:

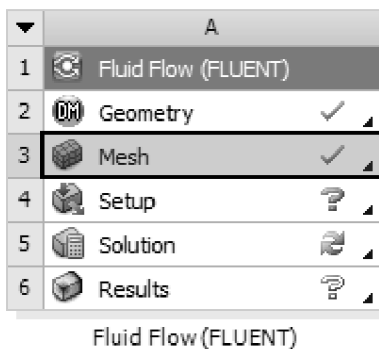


Рис. 3.23

3.3. Запуск ANSYS FLUENT

- 1) Чтобы считать геометрию и сетку во FLUENT кликните правой кнопкой мыши по Setup и в контекстном меню выберите Refresh
- 2) После этого следует кликнуть на Update. В правой части ячейки Setup должен появиться знак вопроса, который означает, что процесс еще не завершен. Эти же действия можно выполнить с помощи панели инструментов, находящейся под строкой меню.
- 3) Дважды кликните на Setup. Загрузится FLUENT Launcher.
- 4) В разделе Options поставьте галочку рядом Double Precision.
- 5) Нажмите на ОК. FLUENT будет запущен.
- 6) Проверяем информацию о разностной сетке Mesh→Info→Size.
- 7) Проверяем сетку на наличие ошибок Mesh→Check.

3.3.1. Установки Problem Setup

1) Для получения решения выберем установки, соответствующие нашей задаче. Рассмотрим по пунктам, что мы задаем в разделе Problem Setup (рис. 3.24).

2) Выбираем тип решателя. В разделе General ставим галочку возле Density-Based Type.

3) Выбираем модель, в рамках которой будем проводить решение. Включаем уравнение энергии: Problem Setup → Models → Energy → On.

4) Устанавливаем модель невязкого течения: Problem Setup → Models → Viscous → Inviscid → Ok.

5) Получившаяся окно Models показано на рис. 3.25

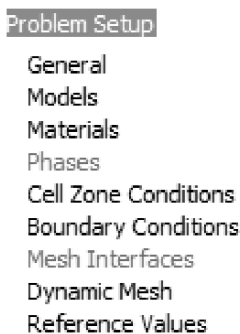


Рис. 3.24

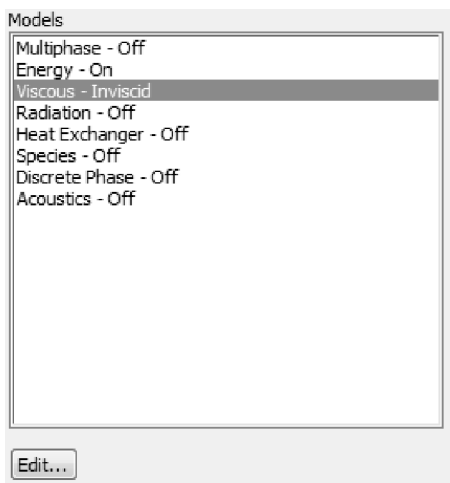


Рис. 3.25

6) Задаем свойства газа. В разделе Materials выбираем Fluid – air (стоит по умолчанию) и задаем свойства воздуха. Для этого нажимаем Create/Edit, в поле Density задаем идеальный газ – ideal gas, в поле Cp (теплоемкость) выбираем constant со значением 1006.43 Дж/кг/К, в поле Molecular Weight (Молярная масса) выбираем constant со значе-

нием 28.966 кг/кмоль. Получившиеся свойства газа показаны на рис. 3.26. Нажимаем Change/create и закрываем окно Create/Edit Materials.

7) Задаем граничные условия. В поле Boundary Condition выбираем для границ **inlet**, **outlet**, **wall** тип (Type) Pressure-Far-Field. Для каждого из полей кликаем edit и выставляем свойства. Задаем Gauge Pressure – 101325, Mach Number – 3, X-Component of Flow Direction – 1, Y-Component of Flow Direction – 0. Во вкладке Thermal задаем температуру газа 300 К. Для границы **wall_conus** выставляем тип wall, для границы **symmetry** ставим тип symmetry.

8) Для проведения расчета задаем масштабные величины. Для этого во вкладке Reference Values выставляем значения, показанные на рис. 3.27.

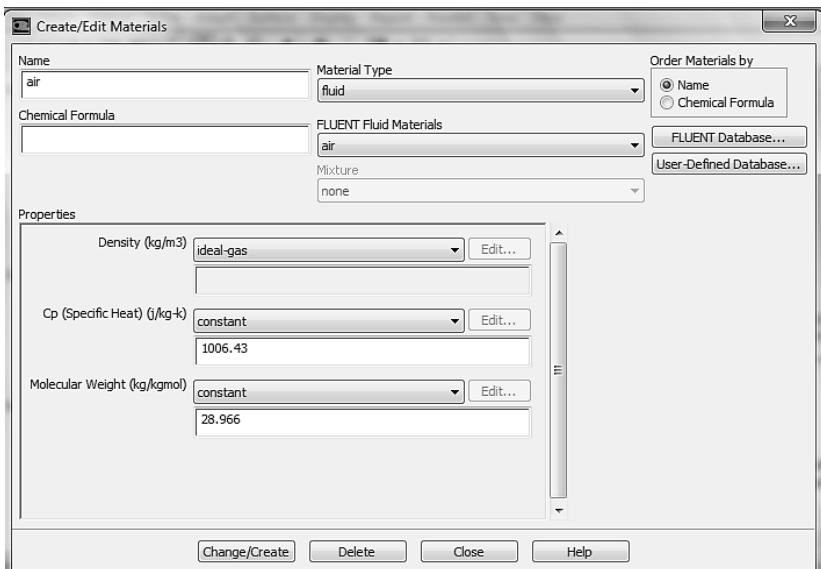


Рис. 3.26

Reference Values	
Compute from	<input type="text"/>
Reference Values	
Area (m2)	<input type="text" value="1"/>
Density (kg/m3)	<input type="text" value="1.225"/>
Depth (m)	<input type="text" value="1"/>
Enthalpy (j/kg)	<input type="text" value="844043.4"/>
Length (m)	<input type="text" value="1"/>
Pressure (pascal)	<input type="text" value="0"/>
Temperature (k)	<input type="text" value="300"/>
Velocity (m/s)	<input type="text" value="1"/>
Ratio of Specific Heats	<input type="text" value="1.4"/>

Рис. 3.27

3.3.2. Установки Solution

Рассмотрим теперь установки решателя (рис. 3.28), для которых будем проводить решение задачи. Для решения поставленной задачи будем использовать алгоритм SIMPLE метода Патанкара, с привлечением противопоточной схемы второго порядка точности для конвективных членов.

Solution

- Solution Methods
- Solution Controls
- Monitors
- Solution Initialization
- Calculation Activities
- Run Calculation

Рис. 3.28

1) Выберем метод расчета. Во вкладке Solution Method задаем явный метод (Formulation-Implicit) и второй порядок точности (Flow-Second Order Upwind).

2) Во вкладке Solution Controls задаем значение числа Куранта, равное 5.

3) Во вкладке Monitors кликаем по Residuals-Print, Plot, откроется окно, в котором мы можем регулировать величину «невязок», задаем во всех полях значение 10^{-6} (см. рис. 3.29).

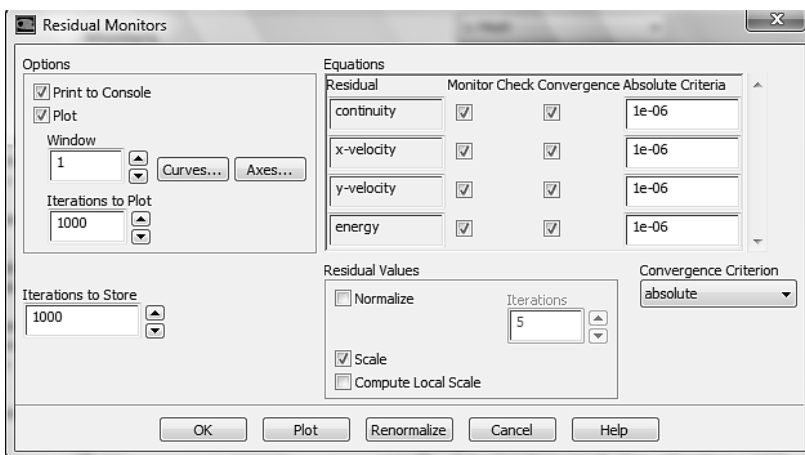


Рис. 3.29

4) Во вкладке Solution Initialization задаем начальные данные. Выбираем Initialization Method – Standard Initialization. Во вкладке Compute from выбираем поле inlet и жмем Initialize.

5) Во вкладке Calculation Activities можно задать автосохранение расчетов (Autosave), которое имеет смысл делать при проведении длительных расчетов, и при аварийной остановке можно возобновлять расчет с последней точки сохранения. Мы не будем устанавливать автосохранение, так как расчеты не предполагаются долгими.

6) Во вкладке Run Calculation выставляем число итераций - 10000. Если величина невязок будет меньше значения 10^{-6} , то расчет прекратится автоматически. Иначе, расчет будет идти до тех пор, пока не пройдет 10000 итераций. Перед началом расчетов сохраняем проект – Save Project. Кликаем Calculate и смотрим на окно результатов. В окне результатов выдаются графики, соответствующие величинам «невязок».

3.4. Результаты расчета

Величина «невязок» в зависимости от номера итерации представлена на рис. 3.30. Решение сошлось за 167 итераций.

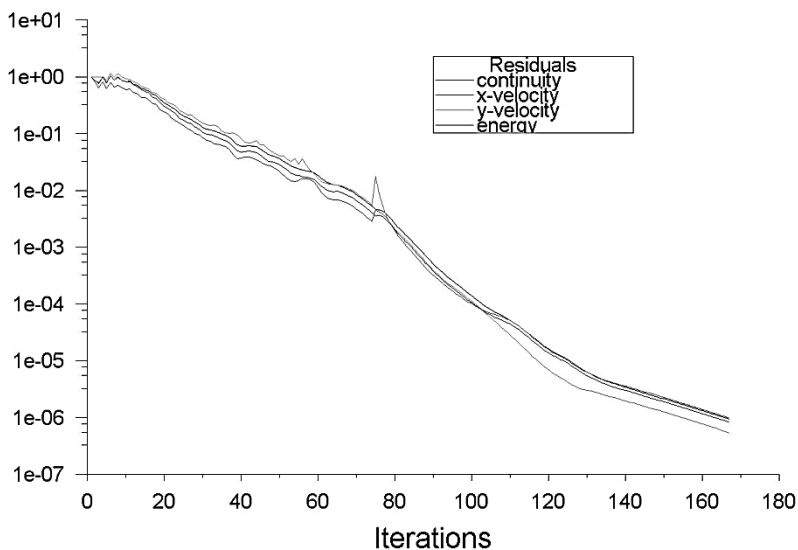


Рис. 3.30

Ниже представлены распределения скорости (рис. 3.31), давления (рис. 3.32) и температуры газа (рис. 3.33), получившиеся при расчете. Результаты расчета соответствуют косой ударной волне.

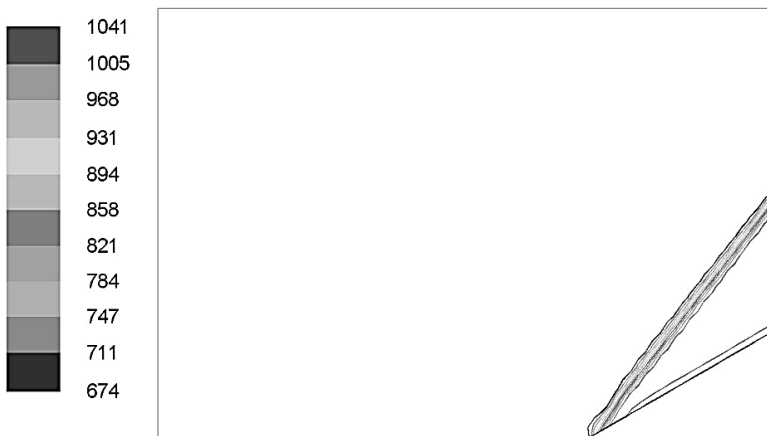


Рис. 3.31. Распределение скорости газа



Рис. 3.32. Распределение давления

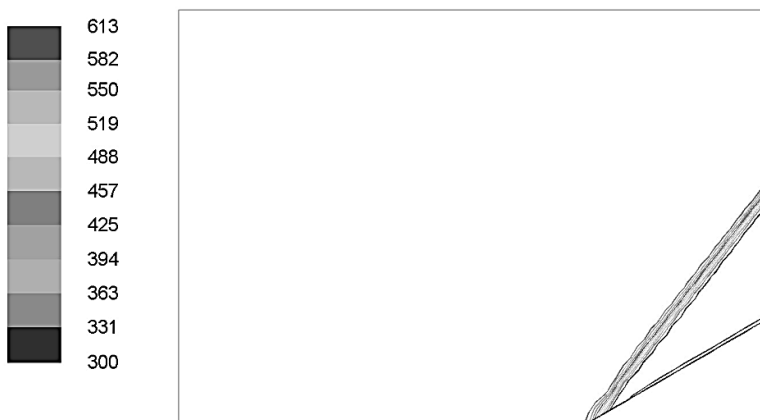


Рис. 3.33. Распределение температуры газа

Для того, чтобы как можно точнее рассчитать область течения в окрестности ударной волны, загустим разностную сетку в этой области.

1) Сначала покажем исходную сетку. Для этого выберем вкладку Results – Graphics and Animations– Mesh, в появившемся окне отметим все поверхности (Surfaces) и нажмем кнопку Display.

2) Приступим к загущению сетки. Выберем вкладку Adapt – Gradient Adaption. На экране появится окно, показанное на рис. 3.34.

3) В столбце Options отмечаем галочками пункты Refine и Coarsen. В столбце Method помечаем Gradient. Выбираем Gradients of Pressure – Static Pressure и нажимаем кнопку Compute. На экране отобразятся минимальное (min) и максимальное (max) значения градиента статического давления. Переходной области соответствует область резкого изменения градиента давления.

4) Откроем вкладку Results – Graphics and Animations–Contours. Выберем Contours of Adaption – Existing Value и нажмем кнопку Compute. В графах min и max автоматически появятся значения, вычисленные в предыдущем пункте. Снимем галочку с вкладки Node Value и нажмем кнопку Display. На экране отобразится картина без размыва-

ния. Вы можете видеть, что зона резкого изменения градиента давления показана «квадратиками».

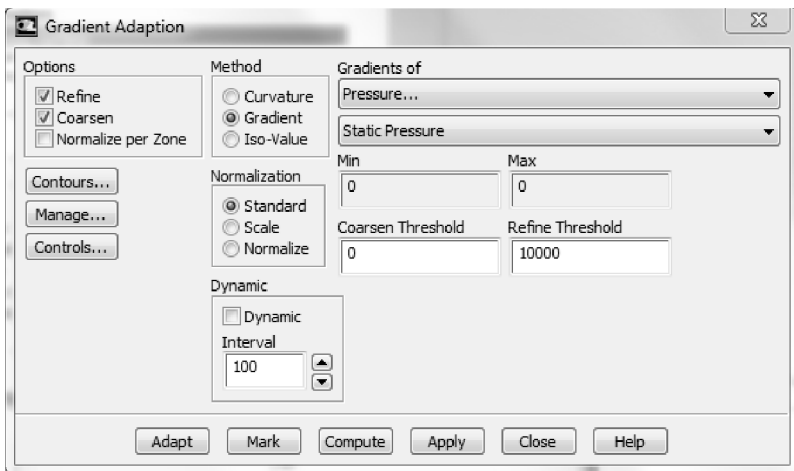


Рис. 3.34

5) Вернемся в окошко Gradient Adaption из пункта 3. В строке Refine Threshold введем значение 10000 и нажмем кнопку Mark. Это действие дает возможность отметить все точки, где градиент статического давления больше 10000. Эти точки задают границу переходной области. Количество точек можно увидеть в окне консоли. Далее, в окне Gradient Adaption кликаем кнопку Adapt, в окне Results – Graphics and Animations– Mesh строим получившуюся сетку. На рис. 3.35 видно, что сетка изменила свой вид и имеет загущение в окрестности косой ударной волны.

6) Проводим расчет задачи на новой сетке, для этого повторяем пункты 4 – 6 предыдущего раздела «Установки Solution». Скорость сходимости решения отличается от скорости сходимости для равномерной сетки, что объясняется резким изломом сетки. Ограничим расчет 200 итерациями и посмотрим на полученные результаты. Построив поле давления (рис. 3.36), можно убедиться в том, что область перехода стала более узкой.

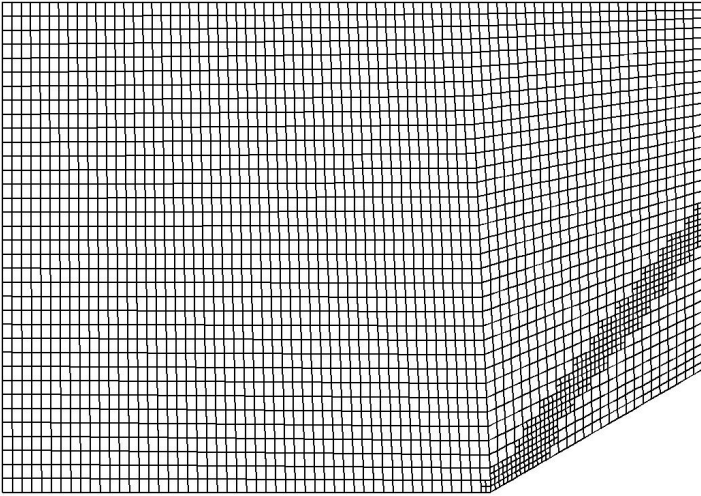


Рис. 3.35

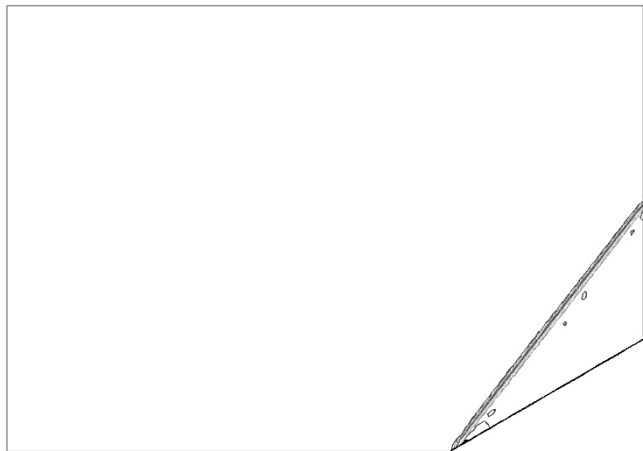
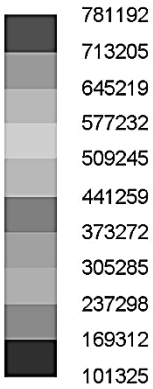


Рис. 3.36

3.5. Задание для самостоятельной работы

Решите задачу о течении газа, набегающего со сверхзвуковой скоростью на бесконечный клин с углом при вершине 2θ . Характеристики области расчета и значения углов даны в таблице. Клин обтекает поток воздуха со следующими параметрами: $\rho = 1.225 \text{ кг/м}^3$, $\mu = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}$. Статическое давление набегающего потока $P = 101325 \text{ Па}$, температура $T = 300 \text{ К}$, число Маха $M = 3$.

Решение проведите на двух сетках с размером ячейки 0.2 и 0.1. Сравните полученные решения. Проведите адаптацию (измельчение) каждой сетки в окрестности кривой ударной волны.

№	θ , град	AB , м	BC , м	AA_1 , м
1	40	15	7	10
2	30	15	7	10
3	20	15	7	10
4	40	14	5	10
5	35	14	5	10
6	25	14	5	10
7	40	14	5	12
8	42	14	5	12
9	38	14	5	12

Сравните полученные численные решения с точным решением этой задачи. Для получения точного решения выполните следующие расчеты:

1) Определите угол наклона кривой ударной волны к направлению набегающего потока β , который находится из следующего нелинейного уравнения:

$$\text{ctg}(\theta) = \text{tg}(\beta) \left[\frac{(\gamma + 1)M^2}{2(M^2 \sin^2(\beta) - 1)} - 1 \right],$$

где γ – отношение теплоемкостей, c_p/c_v ; M – число Маха набегающего потока; В качестве решения этого уравнения следует брать первый положительный корень.

2) Найдите число Маха потока за косой ударной волной M_1 из формулы:

$$M_1^2 \sin^2(\beta - \theta) = \frac{(\gamma - 1)M^2 \sin^2(\beta) + 2}{2\gamma M^2 \sin^2(\beta) - (\gamma - 1)}.$$

3) Найдите статическое давление воздуха за косой ударной волной P_1 из формулы:

$$\frac{P_1}{P} = \frac{2\gamma M^2 \sin^2(\beta) - (\gamma - 1)}{\gamma + 1}.$$

4) Найдите температуру воздуха за косой ударной волной T_1 из формулы:

$$\frac{T_1}{T} = \frac{P_1}{P} \left[\frac{(\gamma - 1)M^2 \sin^2(\beta) + 2}{(\gamma + 1)M^2 \sin^2(\beta)} \right].$$

5) Сравните результаты для M_1 , P_1 , T_1 с результатами, полученными с помощью Ansys-Fluent.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа : учеб. для вузов. – М. : Дрофа, 2003. – 840 с.
2. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. – М. : Наука, 1976. – 888 с.
3. Ansys Fluent Tutorial Guide / ANSYS Inc. – Southpointe, 2011. – 1146 p.
4. FLUENT – Laminar Pipe Flow [Электронный ресурс]. – URL: <https://confluence.cornell.edu/display/SIMULATION/FLUENT++Laminar+Pipe+Flow> (дата обращения: 18.02.2016).
5. FLUENT – Turbulent Pipe Flow [Электронный ресурс]. – URL: <https://confluence.cornell.edu/display/SIMULATION/FLUENT++Turbulent+Pipe+Flow> (дата обращения: 18.02.2016)
6. FLUENT – Supersonic Flow Over a Wedge [Электронный ресурс]. – URL: <https://confluence.cornell.edu/display/SIMULATION/FLUENT++Supersonic+Flow+Over+a+Wedge> (дата обращения: 18.02.2016).

Учебное издание

Леонид Леонидович Миньков
Ксения Михайловна Моисеева

**ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ
ЗАДАЧ ГИДРОДИНАМИКИ С ПОМОЩЬЮ
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ПАКЕТА ANSYS FLUENT**

Учебное пособие

Опубликовано в авторской редакции

Издательство “СТТ”
Россия, 634028, г. Томск, проспект Ленина, 15Б–1
Тел.: (3822)421-455
E-mail: stt@sttonline.com

Усл. печ. лист 7,2. Уч.-изд. л. 1,79.
Бумага для офсетной техники. Гарнитура Times,
Подписано к печати 02.07.2017 г. Формат 60x84/16
Тираж 100 экз. Заказ № 594.