МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Л.Л. Миньков

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ О ЛАМИНАРНОМ ТЕЧЕНИИ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ В ТРУБЕ С ПОМОЩЬЮ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ПАКЕТА ANSYS FLUENT

Учебно-методическое пособие

Томск
2016

РАССМОТРЕНО И РЕКОМЕНДОВАНО К ПЕЧАТИ Советом физико-технического факультета Томского государственного университета.
Протокол № 43 от «29» декабря 2015 г.
Председатель Совета ФТФ Э.Р. Шрагер.

Пособие составлено в соответствии с тематикой лабораторных занятий и программой курса «Вычислительная гидродинамика Ч.1» для студентов физико-технического факультета направлений подготовки 16.04.01 – Техническая физика, 24.04.03 – Баллистика и гидроаэродинамика. Особое внимание уделяется решению задачи о ламинарном течении вязкой несжимаемой жидкости в трубе с помощью современных вычислительных средств. В пособии приведены задания и методические указания.

Для преподавателей, аспирантов, студентов и магистрантов, слушателей ФПК.

СОСТАВИТЕЛЬ: *Л.Л. Миньков*

Учебно-методическое пособие разработано при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания № 10.1329.2014/К.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Описание задачи…… 4
2. Предварительные замечания…..... 4
3. Создание проекта в ANSYS Workbench…….. 5
4. Создание эскиза в Design Modeler…… 9
4.1. Создание поверхности……..... 14
4.2. Построение сетки……..... 15
4.3. Задание узлов сетки на границе области…… 19
4.4. Присвоение имен границам области…… 21
4.5. Сохранение, выход, обновление…….. 22
5. Запуск ANSYS FLUENT……... 22
5.1. Проверка и изображение разностной сетки…… 25
5.2. Внесение данных в решатель…… 28
5.3. Задание свойств жидкости…… 30
5.4. Задание граничных условий…… 31
5.5. Выбор разностной схемы……. 33
5.6. Задание начальных условий……. 35
5.7. Настройка критерия сходимости……. 35
5.8. Расчет коэффициента трения…… 38
5.9. Выполнение расчетов…… 43
5.10. Обработка результатов расчета с помощью средств FLUENTa…… 45
5.10.1. Построение поля векторов скоростей…… 45
5.10.2. Построение изолиний модуля скорости... 48
5.10.3. Построение профиля скорости на выходе из канала……... 52
5.10.4. Построение изменения давления вдоль оси канала……. 54
5.10.5. Контроль и проверка решения…….. 56
6. Измельчение сетки……. 64
7. Просмотр результатов……... 65
8. Задание…… 65
Литература……. 67

1. Описание задачи

Рассмотрим задачу о ламинарном течении жидкости в круглой трубе постоянного сечения, рис. 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 ρ = 1 кг/м^3, а коэффициент вязкости $\mu = 2\times10^{-3}$ Па·с. Число Рейнольдса, построенного на основе диаметра трубы равно $\mathrm{Re} = \dfrac{\rho U_z D}{\mu} = 100$.

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

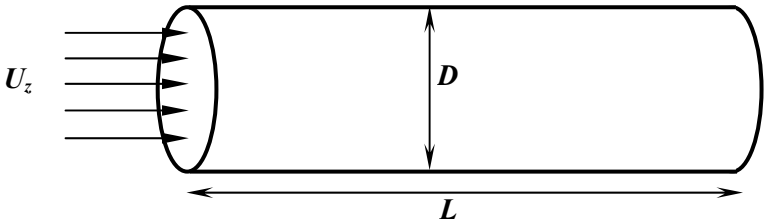


Рис. 1.

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. 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?

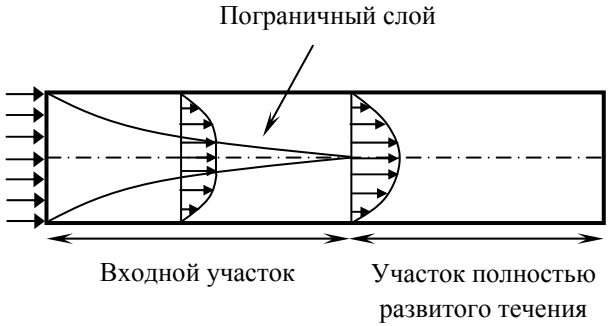


Рис. 2.

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

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. 3 показано окно Workbench. В левой стороне окна Workbench будет находиться панель инструментов, заполненная системами для решения различных физических задач. Посредине 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, перетащите значок в пустое пространство окна Project Schematic. После этого окно Workbench должно выглядеть так, как показано на рис. 4.

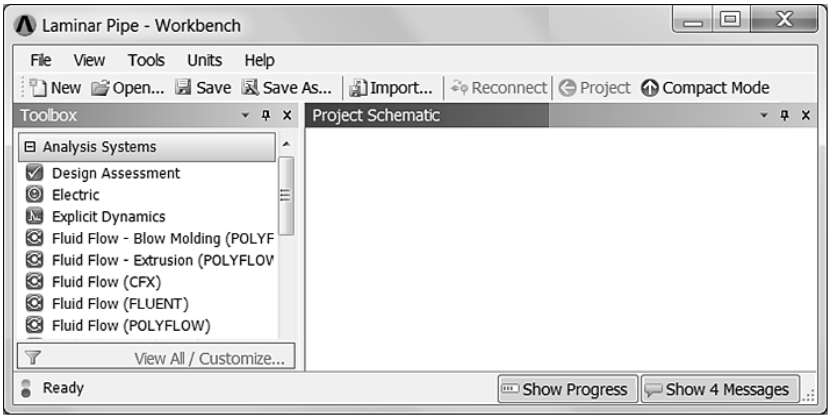


Рис. 3.

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. 5. В правой части окна Workbench появится окно Property of Schematic.
6) В окне Property of Schematic, рис. 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. 7. Выберите метры и нажмите OK.

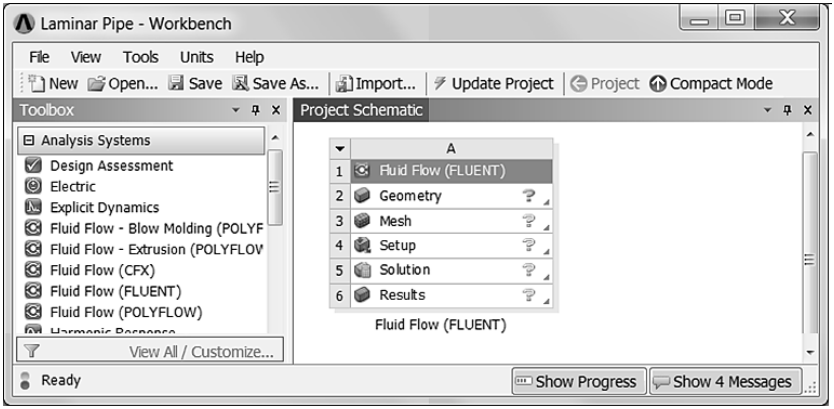

Laminar Pipe - Workbench
File View Tools Units Help
New Open... Save Save As... Import... Update Project Project Compact Mode
Toolbox
Analysis Systems
Design Assessment
Electric
Explicit Dynamics
Fluid Flow - Blow Molding (POLYF
Fluid Flow - Extrusion (POLYFLOW
Fluid Flow (CFX)
Fluid Flow (FLUENT)
Fluid Flow (POLYFLOW)
View All / Customize...
Project Schematic
A
1 Fluid Flow (FLUENT)
2 Geometry
3 Mesh
4 Setup
5 Solution
6 Results
Fluid Flow (FLUENT)
Ready
Show Progress
Show 4 Messages

Рис. 4.

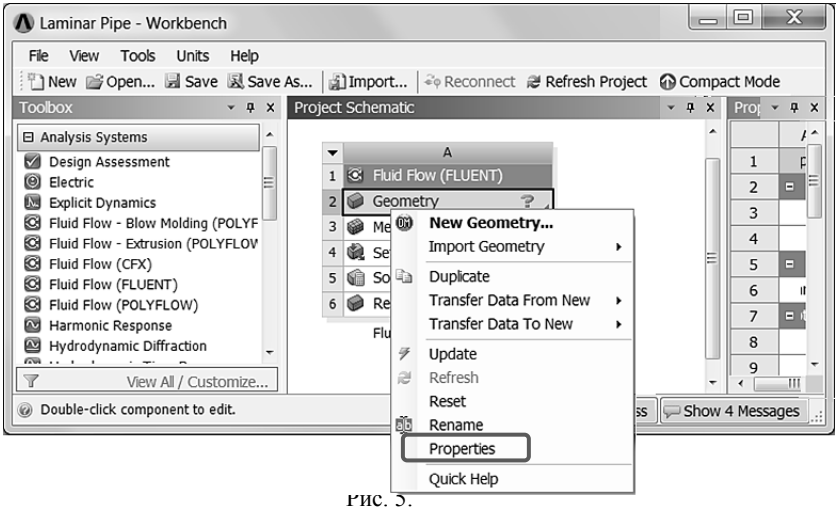

Laminar Pipe - Workbench
File View Tools Units Help
New Open... Save Save As... Import... Reconnect Refresh Project Compact Mode
Toolbox
Analysis Systems
Design Assessment
Electric
Explicit Dynamics
Fluid Flow - Blow Molding (POLYF
Fluid Flow - Extrusion (POLYFLOW
Fluid Flow (CFX)
Fluid Flow (FLUENT)
Fluid Flow (POLYFLOW)
Harmonic Response
Hydrodynamic Diffraction
View All / Customize...
Project Schematic
A
1 Fluid Flow (FLUENT)
2 Geometry
New Geometry...
Import Geometry
Duplicate
Transfer Data From New
Transfer Data To New
Update
Refresh
Reset
Rename
Properties
Quick Help
Double-click component to edit.
Show 4 Messages

Рис. 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	☑
9	Surface Bodies	☑
10	Line Bodies	☐
11	Parameters	☑
12	Parameter Key	DS
13	Attributes	☐
14	Named Selections	☐
15	Material Properties	☐
16	Advanced Geometry Options	
17	Analysis Type	2D
18	Use Associativity	☑
19	Import Coordinate Systems	☐
20	Import Work Points	☐
21	Reader Mode Saves Updated File	☐
22	Import Using Instances	☑
23	Smart CAD Update	☐
24	Enclosure and Symmetry Processing	☑
25	Decompose Disjoint Faces	☑
26	Mixed Import Resolution	None

Рис. 6.

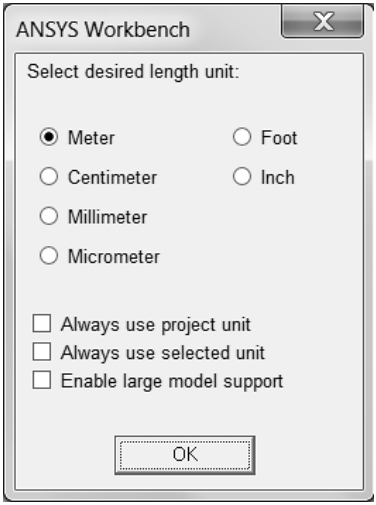


Рис. 7.

4. Создание эскиза в Design Modeler

1) Открывшееся окно программы Design Modeler имеет вид, рис. 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. 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 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.

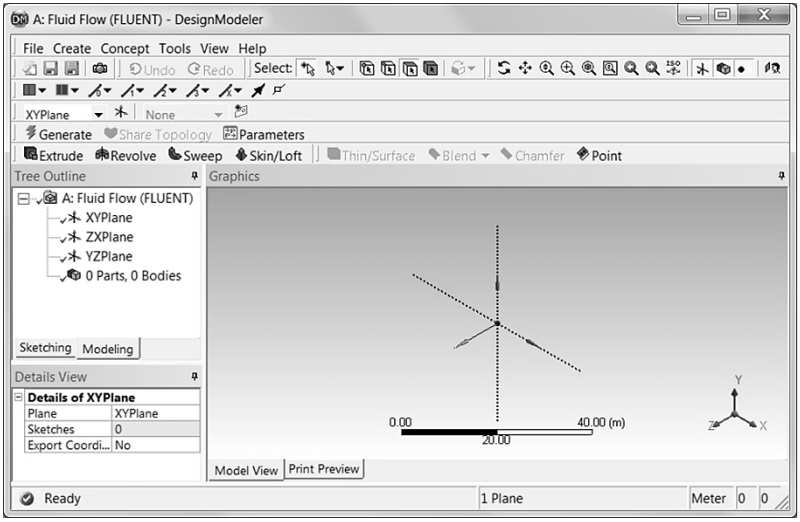

A: Fluid Flow (FLUENT) - DesignModeler
File Create Concept Tools View Help
Undo Redo Select:
XYPlane None
Generate Share Topology Parameters
Extrude Revolve Sweep Skin/Loft Thin/Surface Blend Chamfer Point
Tree Outline
Graphics
A: Fluid Flow (FLUENT)
XYPlane
ZXPlane
YZPlane
0 Parts, 0 Bodies
Sketching Modeling
Details View
Details of XYPlane
Plane XYPlane
Sketches 0
Export Coordi... No
0.00
40.00 (m)
20.00
Y
Z
X
Model View Print Preview
Ready
1 Plane
Meter 0 0

Рис. 8.

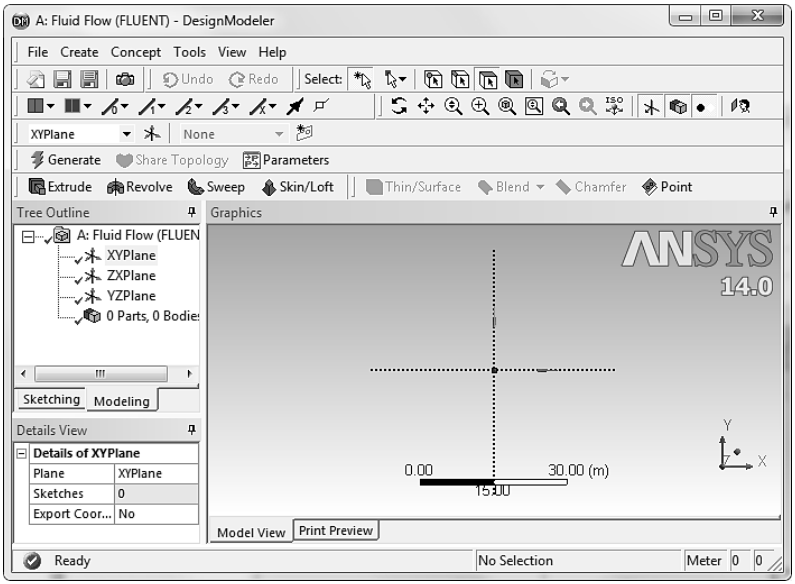

A: Fluid Flow (FLUENT) - DesignModeler
File Create Concept Tools View Help
Undo Redo Select:
XYPlane None
Generate Share Topology Parameters
Extrude Revolve Sweep Skin/Loft Thin/Surface Blend Chamfer Point
Tree Outline
Graphics
A: Fluid Flow (FLUEN
XYPlane
ZXPlane
YZPlane
0 Parts, 0 Bodie
Sketching Modeling
Details View
Details of XYPlane
Plane XYPlane
Sketches 0
Export Coor... No
ANSYS
14.0
0.00
30.00 (m)
15.00
Y
Z
X
Model View Print Preview
Ready
No Selection
Meter 0 0

Рис. 9.

4) Эскиз будем создавать в плоскости XY. Для этого на панели Tree Outline кликните по XYPlane (рис. 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. 10. По умолчанию открывается набор инструментов Draw.

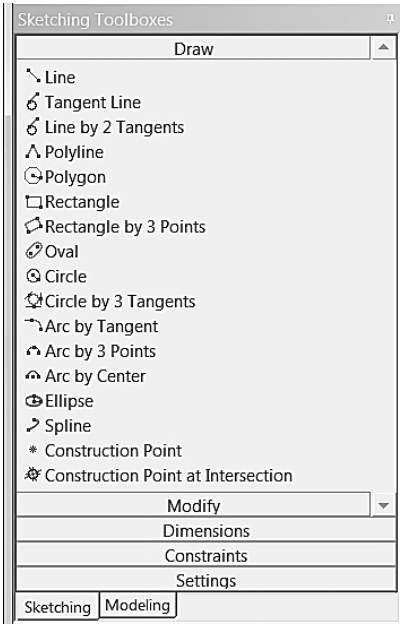


Рис. 10.

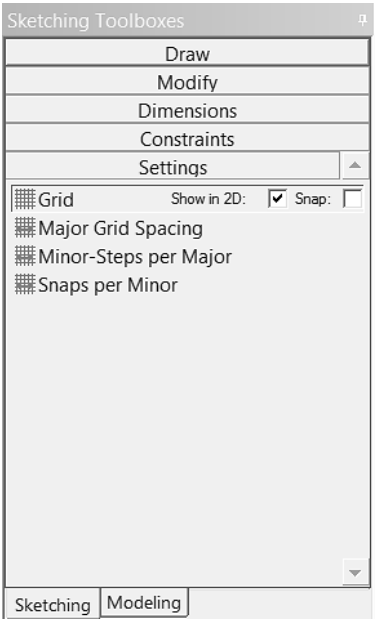


Рис. 11.

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. 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 C, если курсор поместить в начало координат, то рядом с ним появляется буква P. Приблизите рисунок, вращая колесико мышки, и сдвиньте его влево, рис. 12.

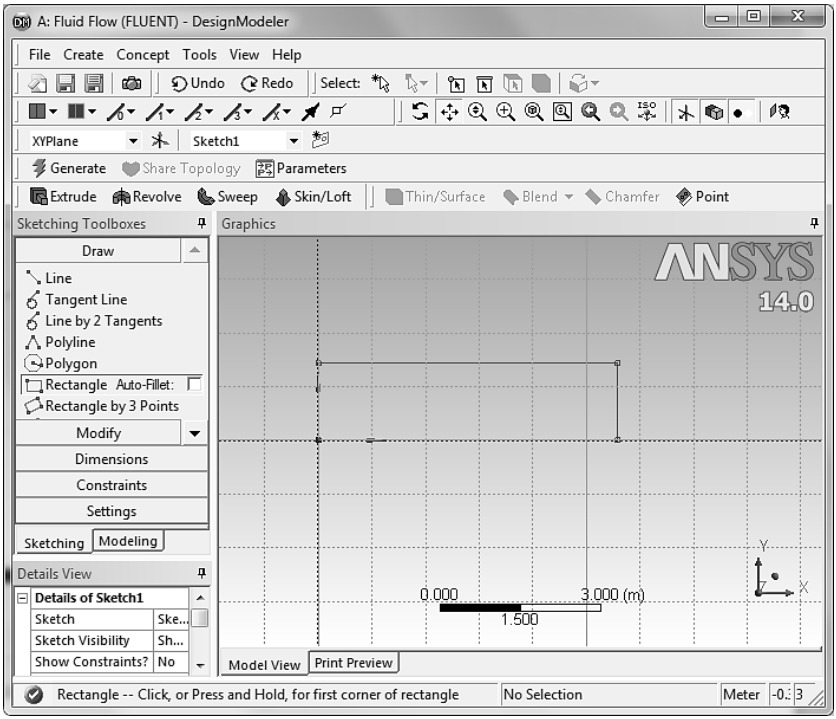


Рис. 12.

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. 13.
8) На панели Details View, которая находится под панелью Sketching Toolboxes, в группе Dimensions:2 устанавливаем H1=8, а V2=0.1, рис. 14.

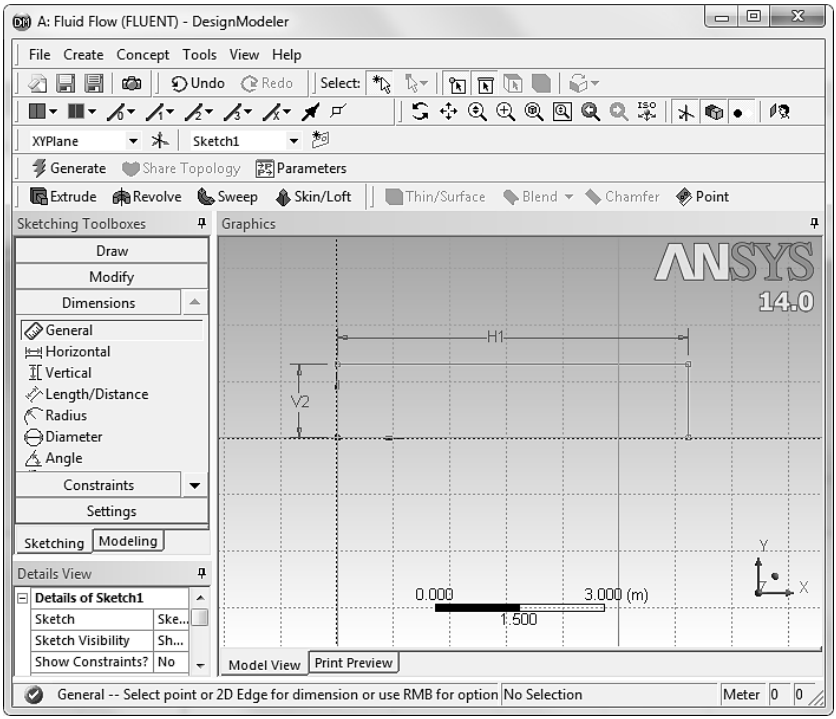
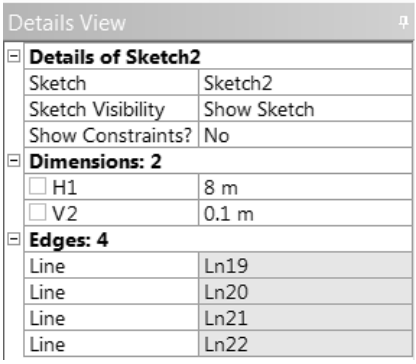


Рис. 13.



Details View

Details of Sketch2	
Sketch	Sketch2
Sketch Visibility	Show Sketch
Show Constraints?	No
Dimensions: 2	
H1	8 m
V2	0.1 m
Edges: 4	
Line	Ln19
Line	Ln20
Line	Ln21
Line	Ln22

Рис. 14.

4.1. Создание поверхности

1) Для создания поверхности выбираем в меню Concept, а затем Surface From Sketches, как показано на рис. 15.

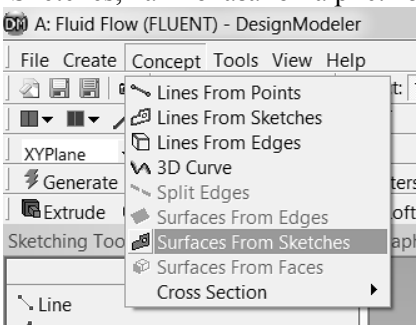


Рис. 15.

2) На панели Tree Outline (закладка Modeling) кликните по Sketch1.
3) На панели Details View, выберите Sketch1 как Base Objects и затем напротив Thickness (>=0) выберите толщину 0.1m и кликните Apply. Окончательно кликните Generate, чтобы сгенерировать поверхность, рис. 16.
4) На этом можно закрыть Design Modeler и вернуться в Workbench Project Schematic для построения разностной сетки.

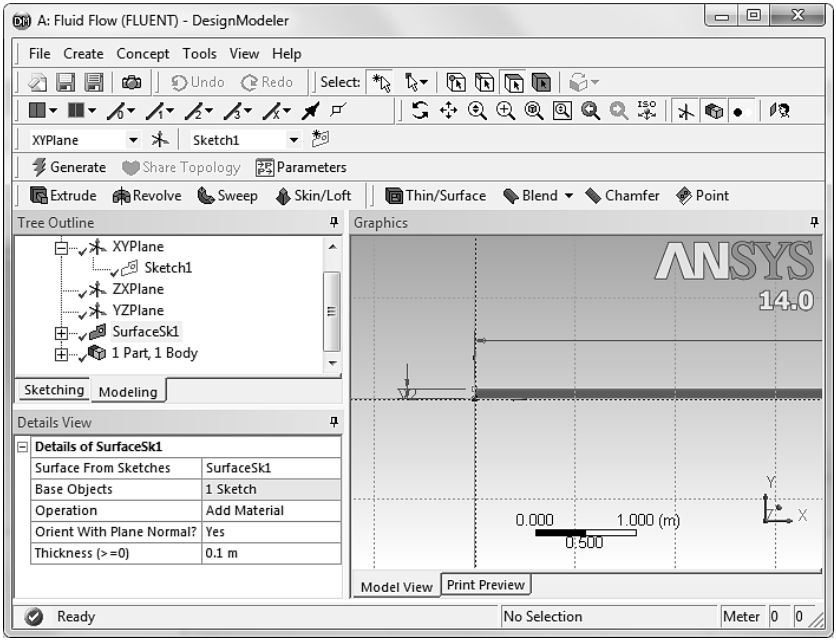


Рис. 16.

4.2. Построение сетки

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

1) В Workbench дважды кликаем по Mesh. При этом запускается программа Meshing, рис. 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. 18; б) второй – кликнуть в строке инструментов, находящейся под главным меню на Mesh, а затем на Generate Mesh, рис. 19.

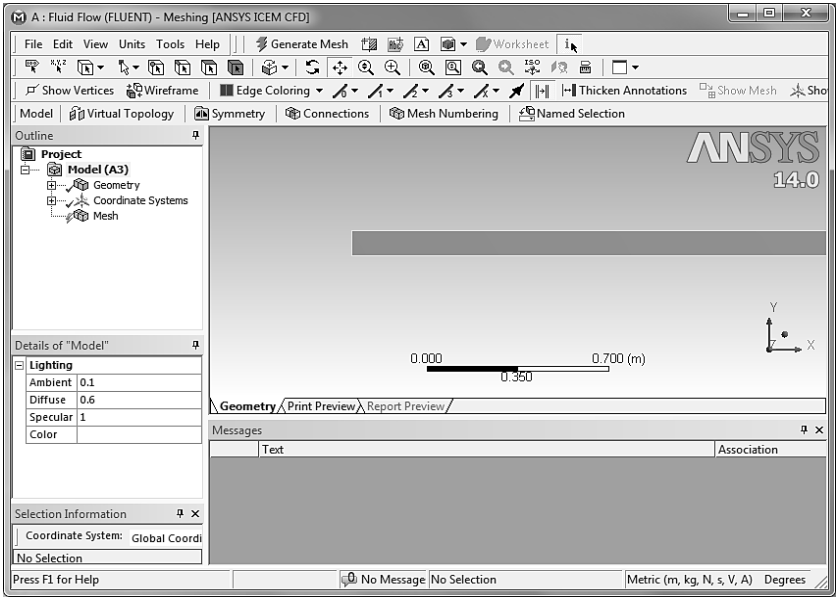

A : Fluid Flow (FLUENT) - Meshing [ANSYS ICEM CFD]
File Edit View Units Tools Help
Generate Mesh
Worksheet
Show Vertices
Wireframe
Edge Coloring
Thicken Annotations
Show Mesh
Model
Virtual Topology
Symmetry
Connections
Mesh Numbering
Named Selection
Outline
Project
Model (A3)
Geometry
Coordinate Systems
Mesh
ANSYS
14.0
Details of "Model"
Lighting
Ambient 0.1
Diffuse 0.6
Specular 1
Color
0.000
0.700 (m)
0.350
Geometry
Print Preview
Report Preview
Messages
Text
Association
Selection Information
Coordinate System: Global Coordi
No Selection
Press F1 for Help
No Message
No Selection
Metric (m, kg, N, s, V, A) Degrees

Рис. 17.

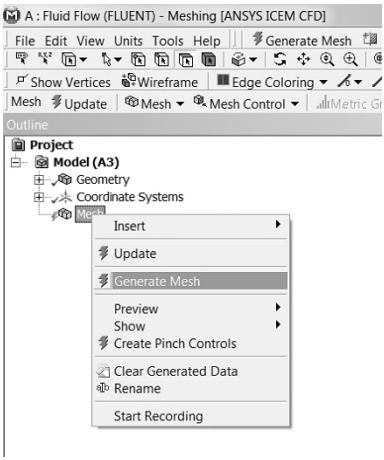

A : Fluid Flow (FLUENT) - Meshing [ANSYS ICEM CFD]
File Edit View Units Tools Help
Generate Mesh
Show Vertices
Wireframe
Edge Coloring
Mesh
Update
Mesh
Mesh Control
Outline
Project
Model (A3)
Geometry
Coordinate Systems
Mesh
Insert
Update
Generate Mesh
Preview
Show
Create Pinch Controls
Clear Generated Data
Rename
Start Recording

Рис. 18.

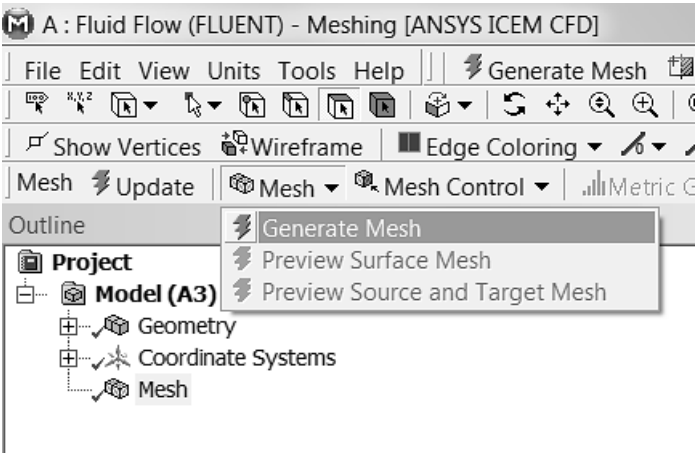


Рис. 19.

3) Результат будет выглядеть следующим:

4) Далее применяют стиль Mapped Face Meshing. Чтобы включить этот стиль выполняют последовательность Mesh Control→ Mapped Face Meshing, рис. 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. 21, после чего панель принимает вид, рис. 22, а геометрическая область окрашивается в фиолетовый цвет и принимает вид, рис. 23.

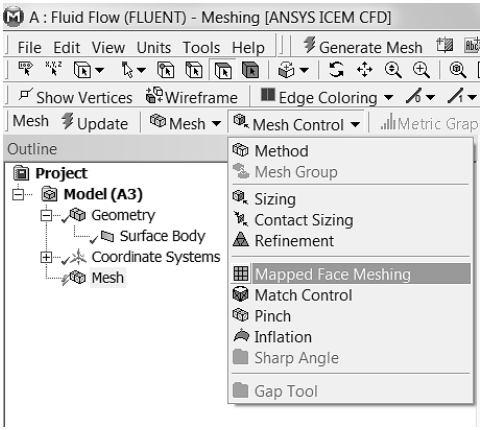


Рис. 20.

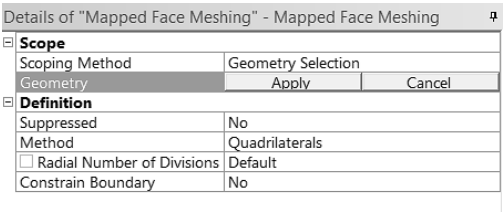


Рис. 21.

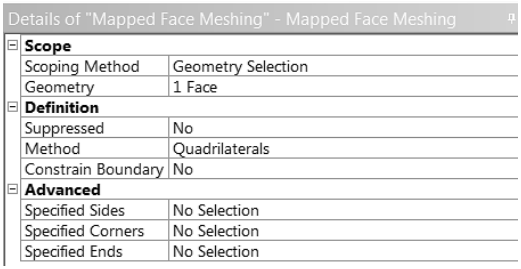


Рис. 22.

Рис. 23.

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. 24. Панель Details of “Sizing” принимает вид, рис. 25.

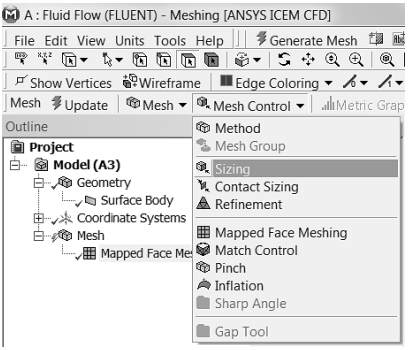


Рис. 24.

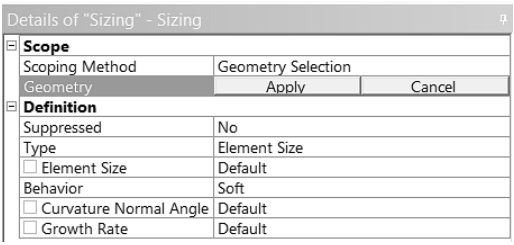


Рис. 25.

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 подвдим 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. 25.

3) На панели Details of “Sizing” в строке Type выбираем Number of Divisions, рис. 26 и устанавливаем значение 100, рис. 27.

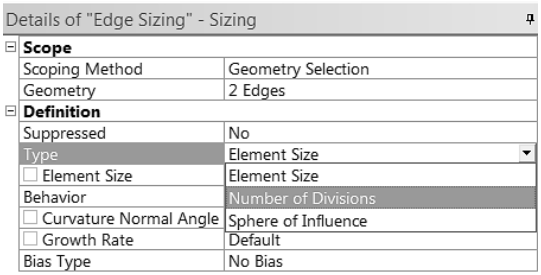


Рис. 26.

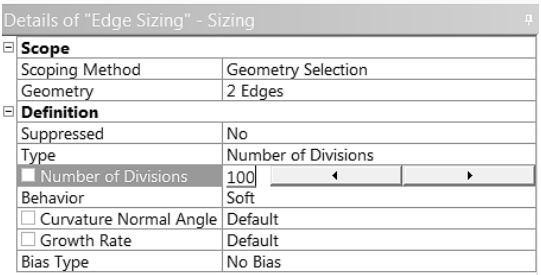


Рис. 27.

4) Проделываем 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) Поле этого в строке меню кликаем Generate Mesh. После всех выполненных операций окно программы Meshing будет выглядеть следующим образом:

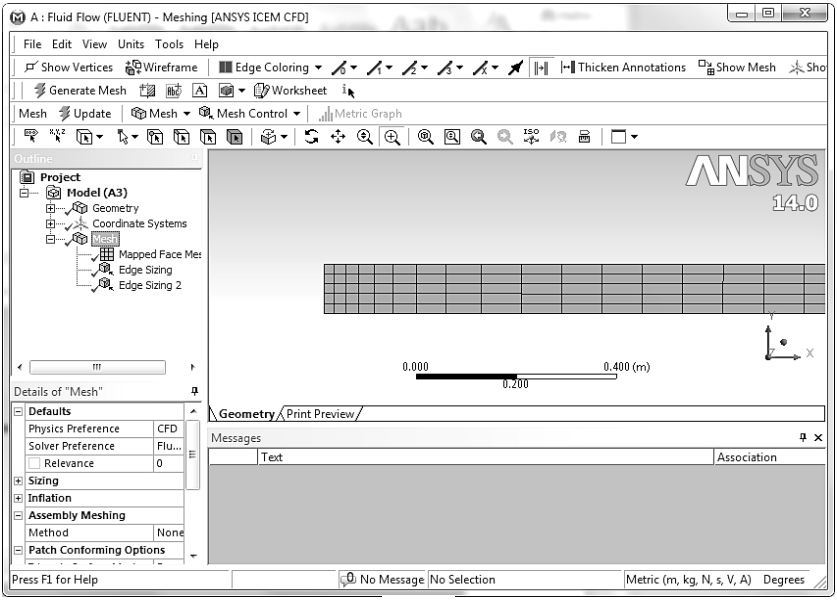


Рис.28.

6) В разделе статистика панели Details of “Mesh” (предварительно кликнув на Mesh панели Outline) можно видеть, что число элементов получилось не равное 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.

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. 29.

2) Появится окно Selection Name, рис. 30, в которое следует ввести Inlet. Нажать OK. Подобную операцию проделать со всеми границами, вводя соответствующие имена.

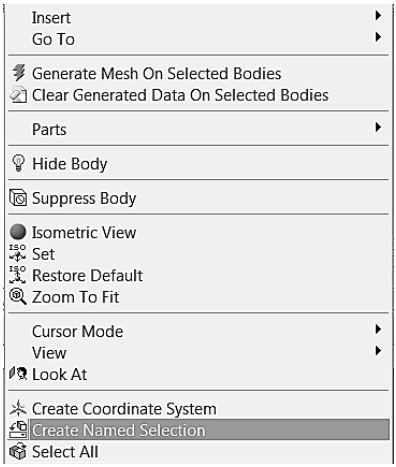


Рис. 29.

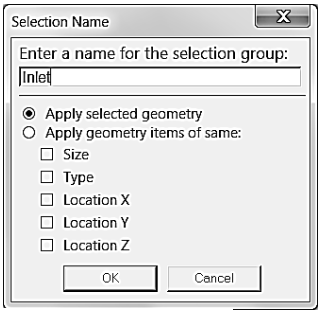


Рис. 30.

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,

, которая находится под строкой меню.

5. Запуск ANSYS FLUENT

Схема вашего проекта (Project Schematic) в Workbench должна иметь вид примерно такой же, как показано на рис. 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. 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. 33.
5) Нажмите на OK. FLUENT будет запущен.

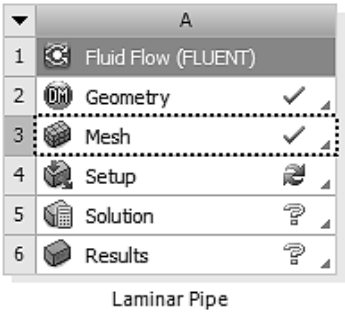


Рис. 31.

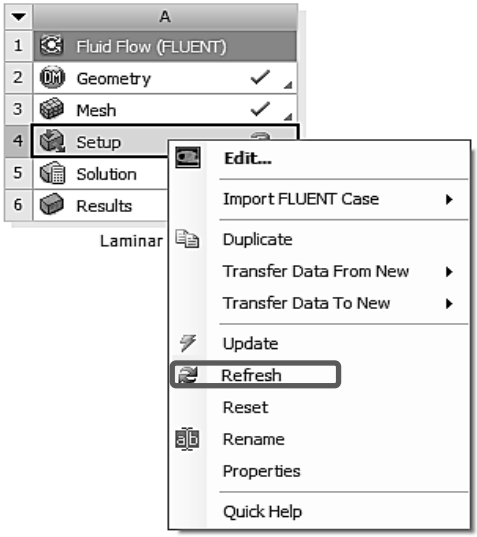


Рис. 32.

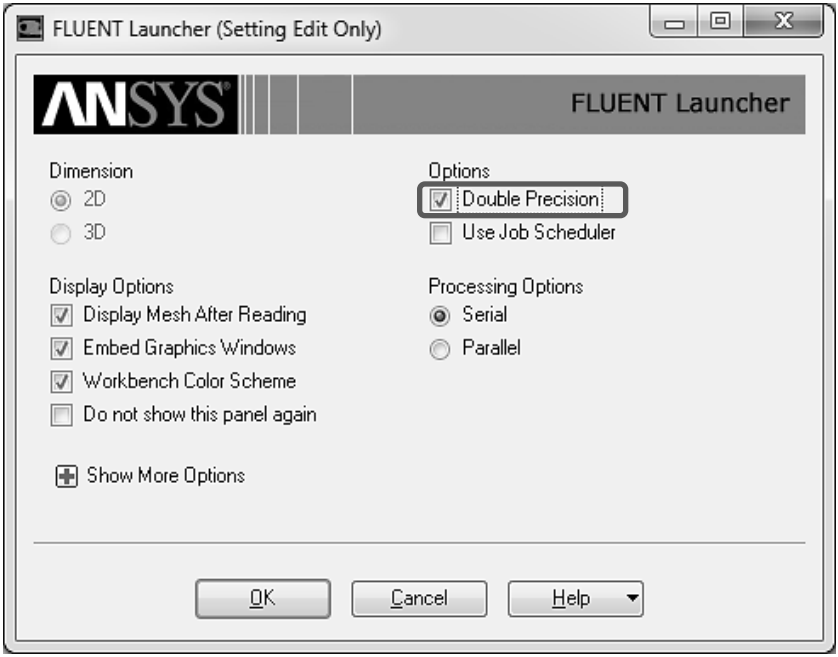


Рис. 33.

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

Рабочее окно FLUENTа имеет вид, показанный на рис. 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.

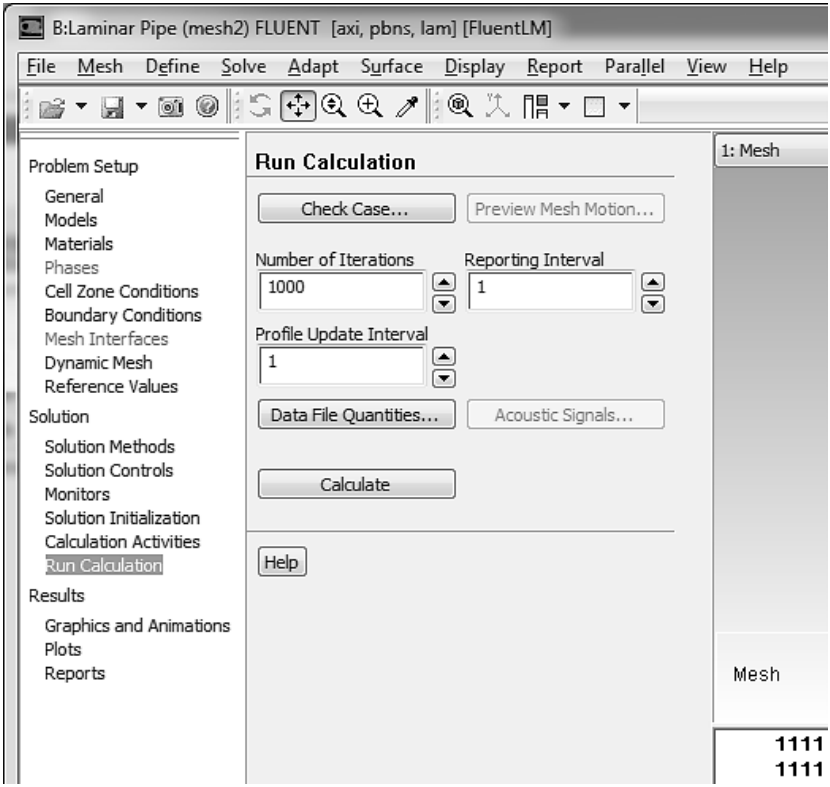


Рис. 34.

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. 35.

```
Mesh Size

Level    Cells    Faces    Nodes   Partitions
    0      500     1105      606            1

 1 cell zone, 5 face zones.
```

Рис. 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. 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. 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. 37.

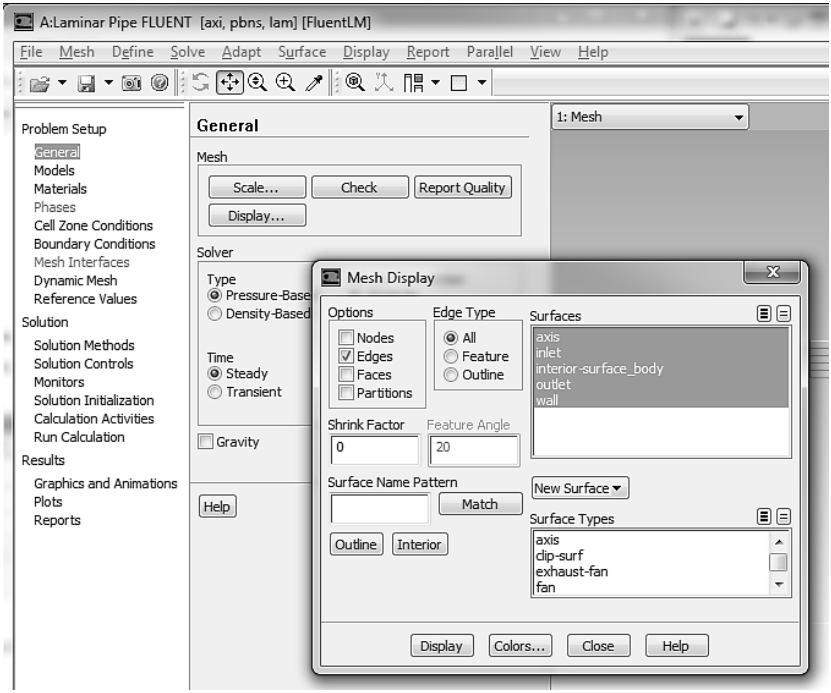


Рис. 37.

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.

5.2. Внесение данных в решатель

1) Задаем осесимметричную геометрию области. В разделе General→Solver→2D Space.
2) Выбираем Axisymmetric, рис. 38.

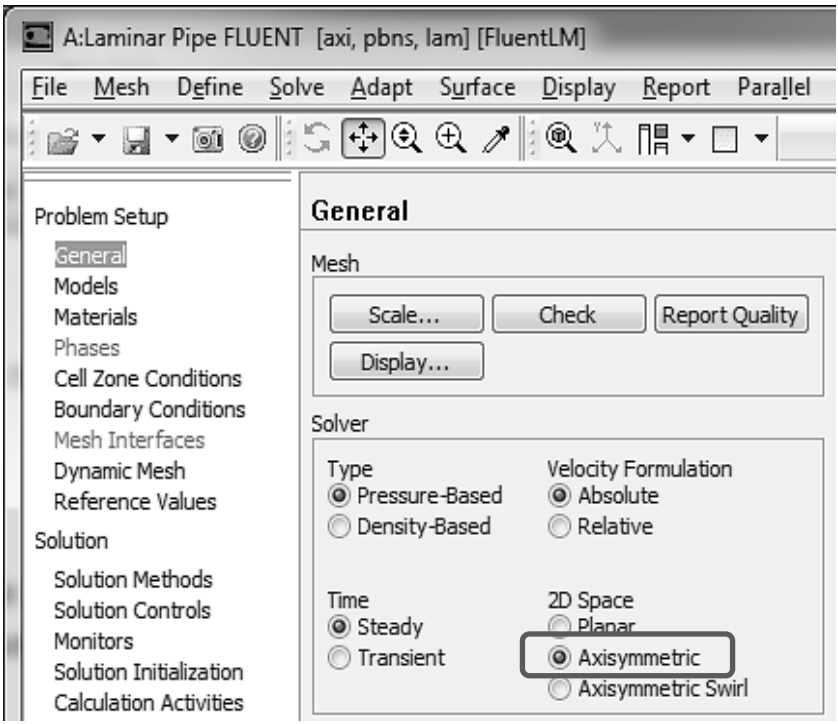


Рис. 38.

3) Устанавливаем модель вязкого ламинарного течения: Models→Viscous-Laminar→Edit. Откроется окно Viscous Model, в котором выбираем значение Laminar, рис. 39. Кликаем OK. (По умолчанию, во FLUENTe выбрана опция Laminar).

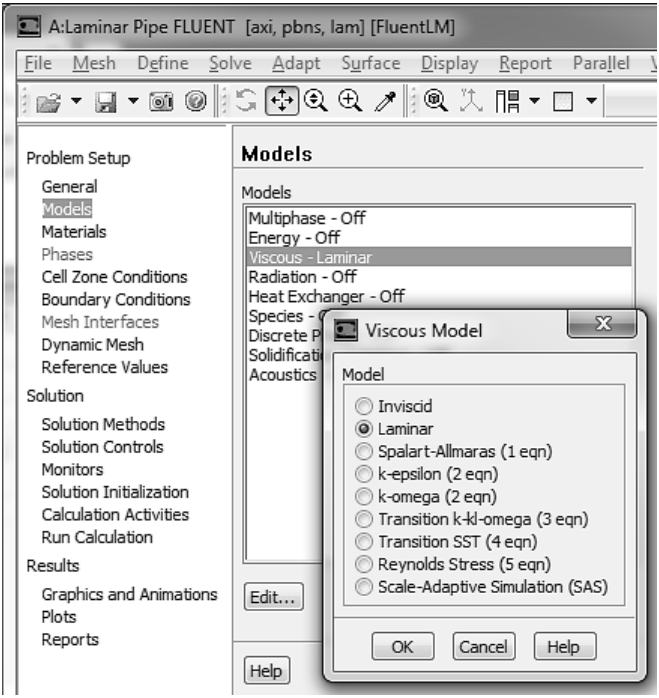


Рис. 39.

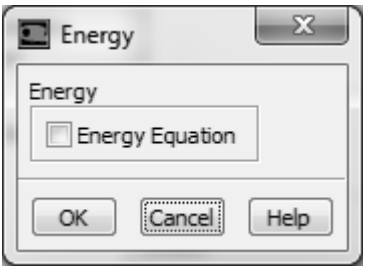


Рис. 40.

4) Отключаем уравнение энергии: Models→Energy→Edit, рис. 40. В нашем случае уравнение энергии решать не требуется. Поэтому нажимаем на Cancel.

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. 41.

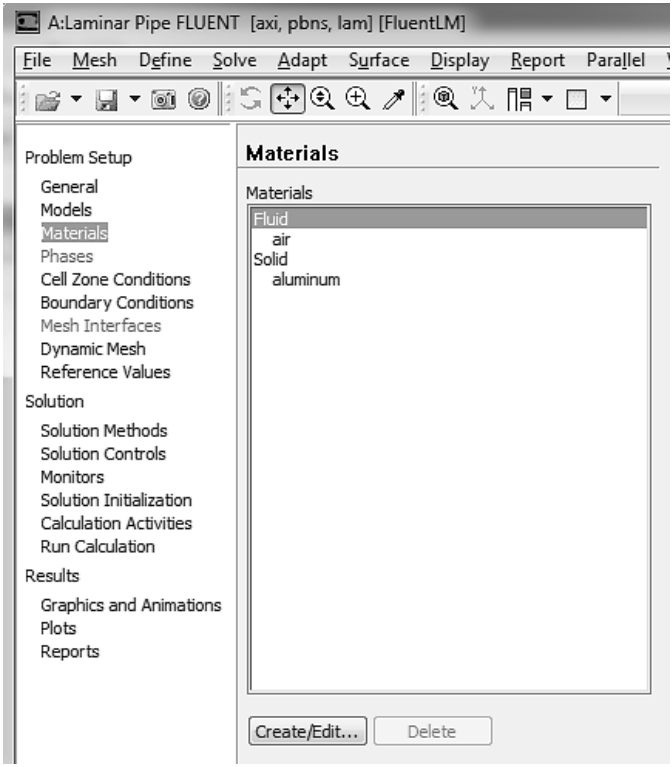


Рис. 41.

2) В появившемся окне устанавливаем плотность 1 кг/м^3 и вязкость 0.002 кг/(м·сек), рис. 42.

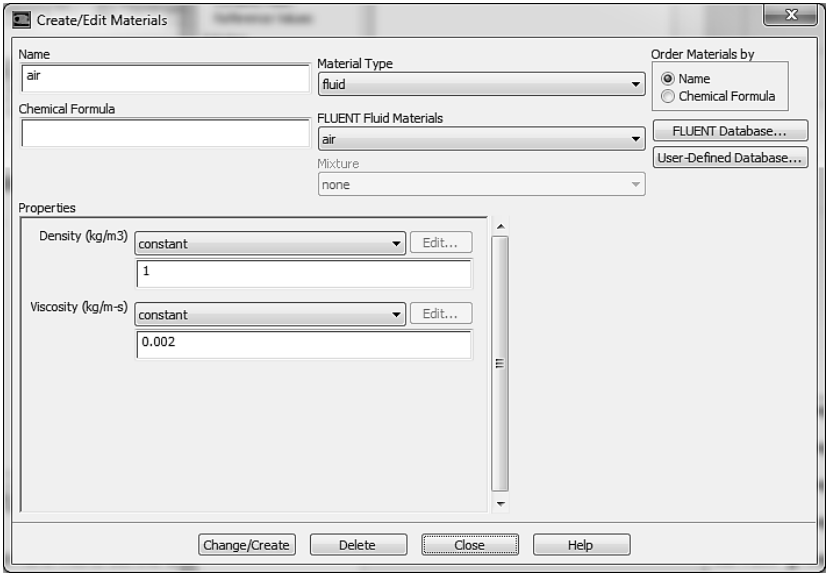


Рис. 42.

3) Кликаем кнопку Change/Create, затем Close.

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. 43. Автоматически произойдет выбор значения velocity-inlet в разделе Type.

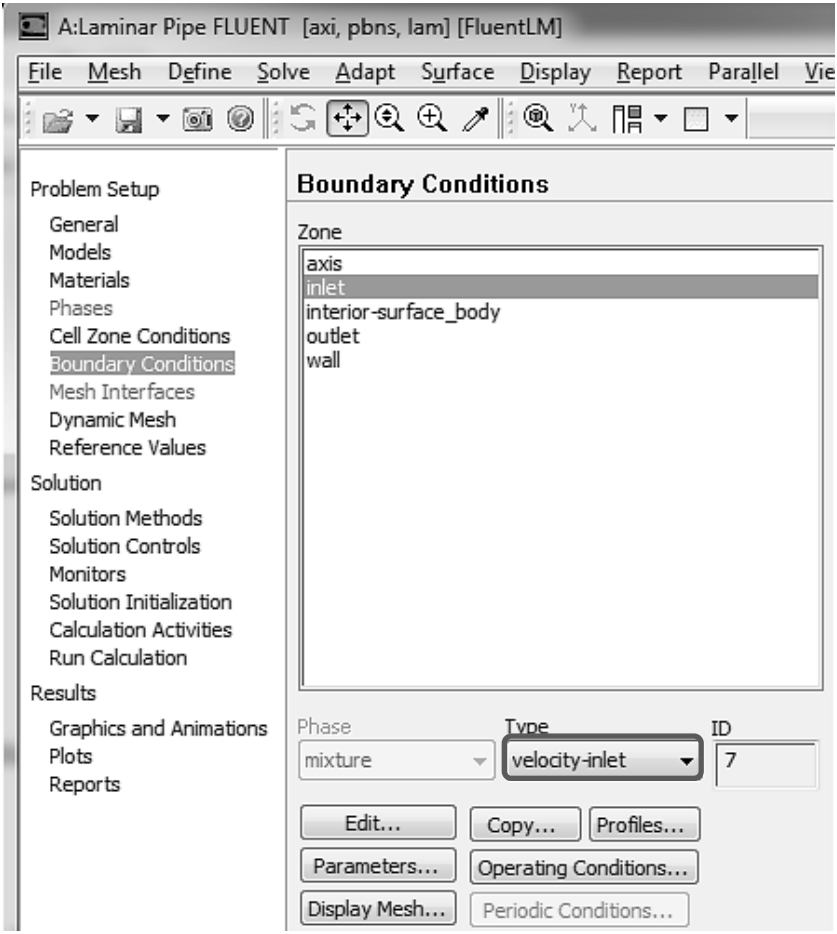


Рис. 43.

2) В появившемся окне Velocity Inlet, рис. 44 вбираем значение Velocity Specification Method равным Components и устанавливаем значение Axial-Velocity(m/s) равным 1.

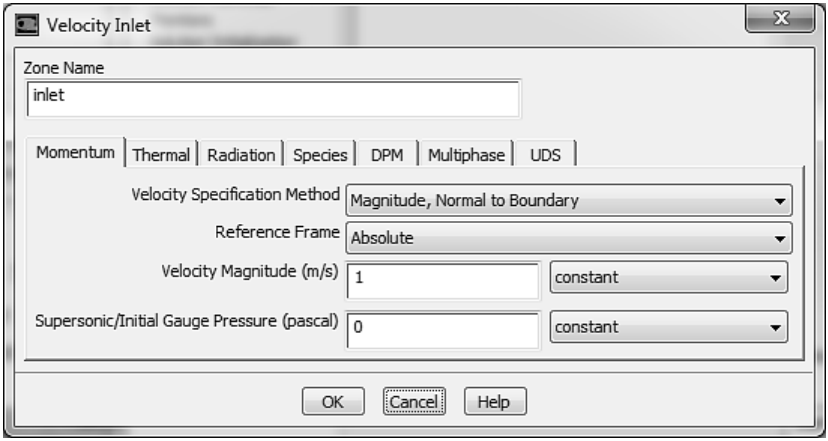


Рис. 44.

3) Кликаем OK и закрываем окно.
4) Задаем условия на выходной границе: Boundary Conditions→Outlet→Edit.
5) Значение Gauge Pressure (pascal) устанавливаем равное 0. Кликаем OK.
6) Задаем условия на оси симметрии: Boundary Conditions→Zone (axis). Меняем значение Type на axis, рис. 45. В появившемся окне Question кликаем Yes, а в окне Axis – на OK.
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.

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.

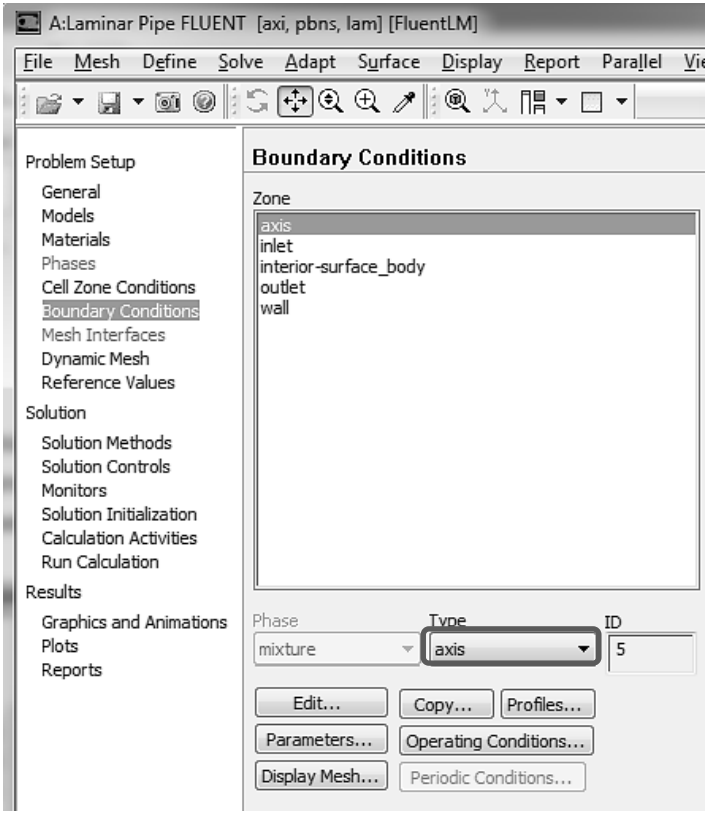


Рис. 45.

Для выбора разностных схем используется раздел Solution. Убедитесь, что в подразделе Solution Methods установлены значения, показанные на рис. 46.

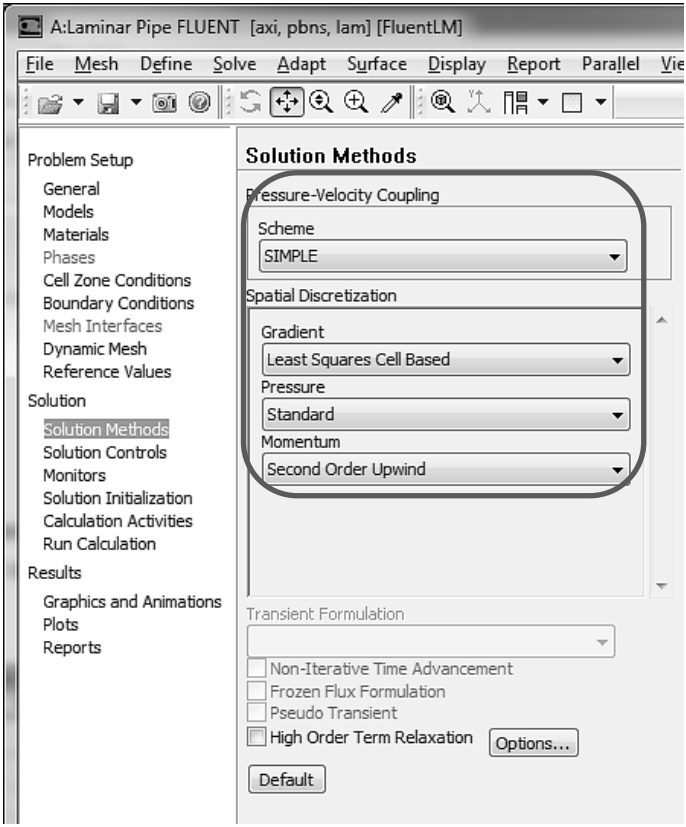


Рис. 46.

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. 47.

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 жмем кнопку Edit, рис. 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. 49.

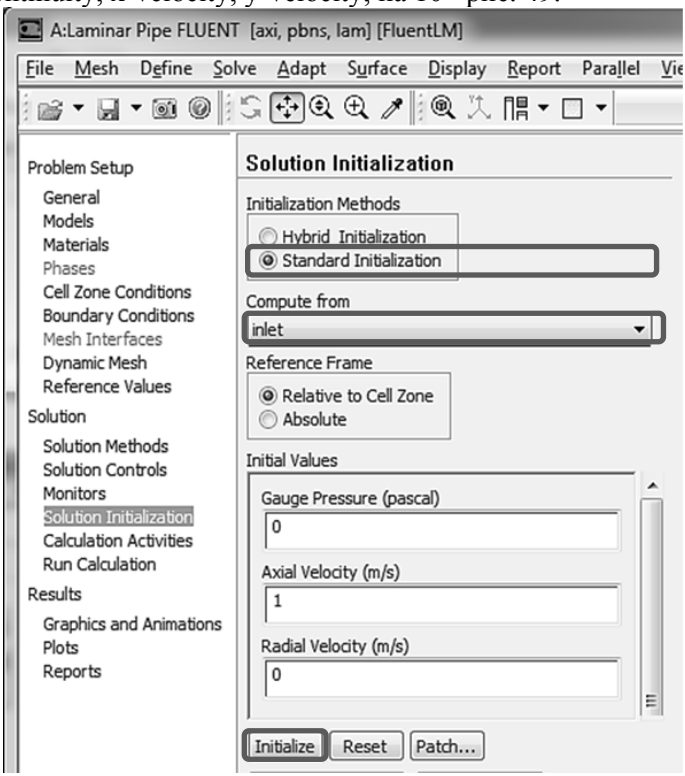


Рис. 47.

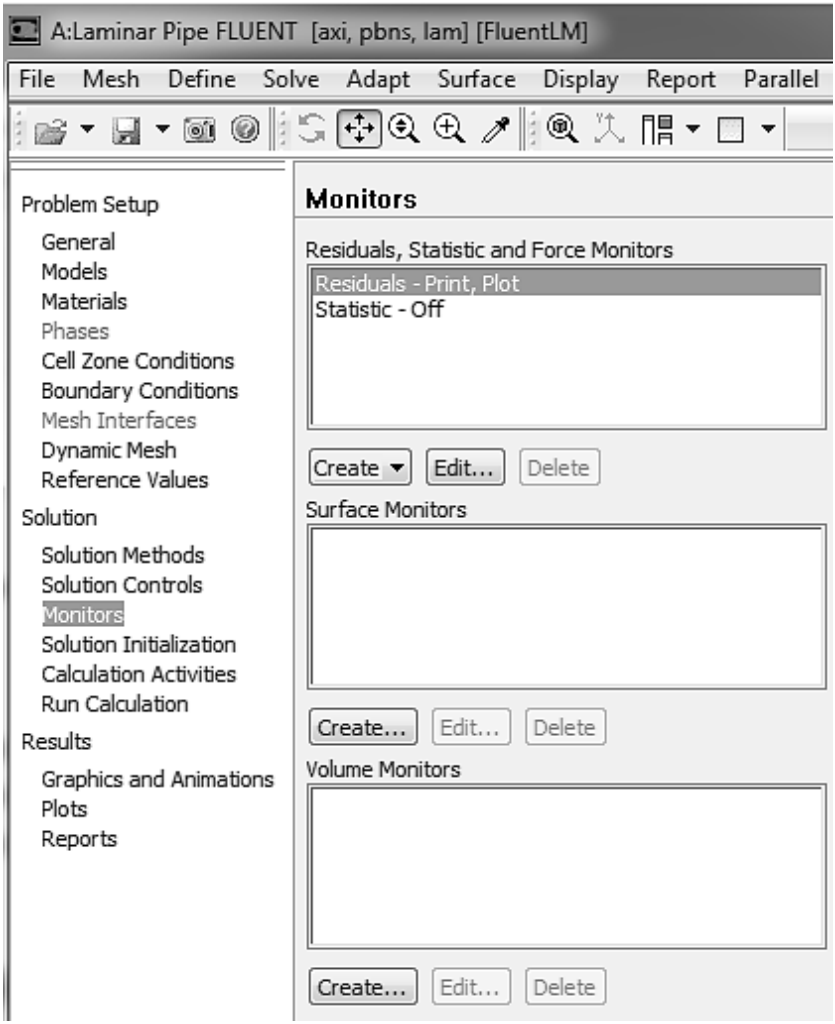

A:Laminar Pipe FLUENT [axi, pbns, lam] [FluentLM]
File Mesh Define Solve Adapt Surface Display Report Parallel
Problem Setup
General
Models
Materials
Phases
Cell Zone Conditions
Boundary Conditions
Mesh Interfaces
Dynamic Mesh
Reference Values
Solution
Solution Methods
Solution Controls
Monitors
Solution Initialization
Calculation Activities
Run Calculation
Results
Graphics and Animations
Plots
Reports
Monitors
Residuals, Statistic and Force Monitors
Residuals - Print, Plot
Statistic - Off
Create
Edit...
Delete
Surface Monitors
Create...
Edit...
Delete
Volume Monitors
Create...
Edit...
Delete

Рис. 48.

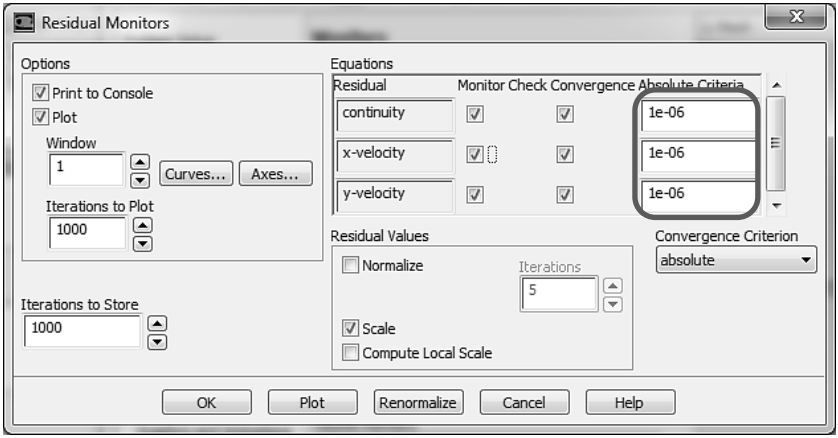


Рис. 49.

5.8. Расчет коэффициента трения

Коэффициент трения жидкости на поверхности определяется по формуле: $C_D = \dfrac{F_D}{\frac{1}{2}\rho_{ref} V_{ref} A_{ref}}$. 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, $\int \mu \dfrac{\partial u}{\partial n} d\sigma$. Для нахождения коэффициента трения необходимо 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. 50.

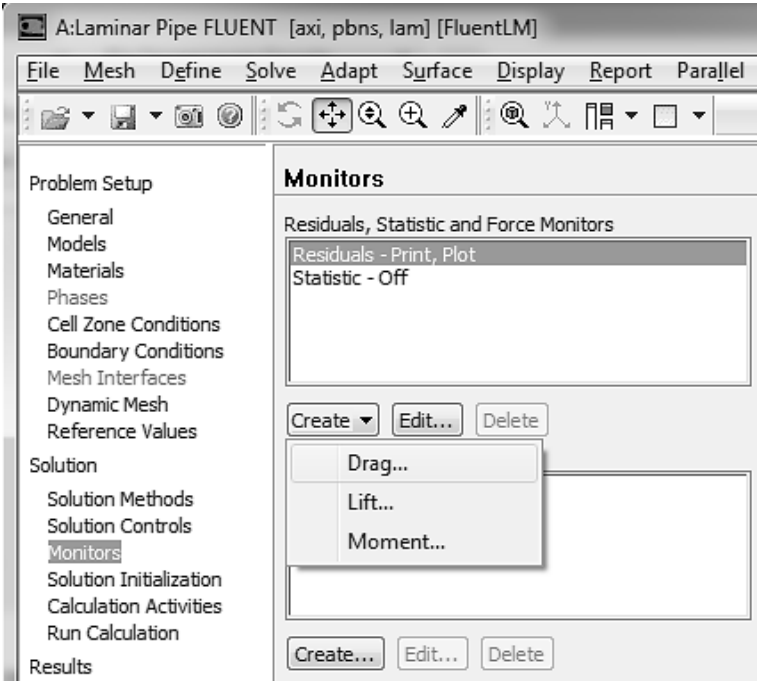


Рис. 50.

3) В появившемся окне Drag Monitor в разделе Options устанавливаем галочку напортив 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. 51.
6) Закрываем окно Drag Monitor, нажав OK.

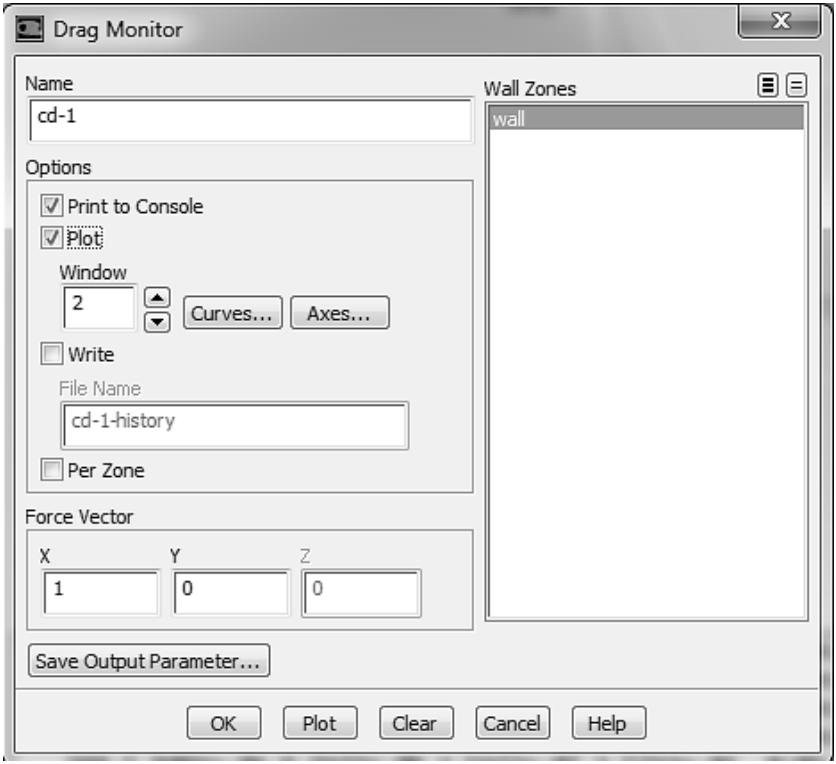


Рис. 51.

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. 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. 53. Это же значение будет напечатано в командном окне FLUETa, рис. 54.

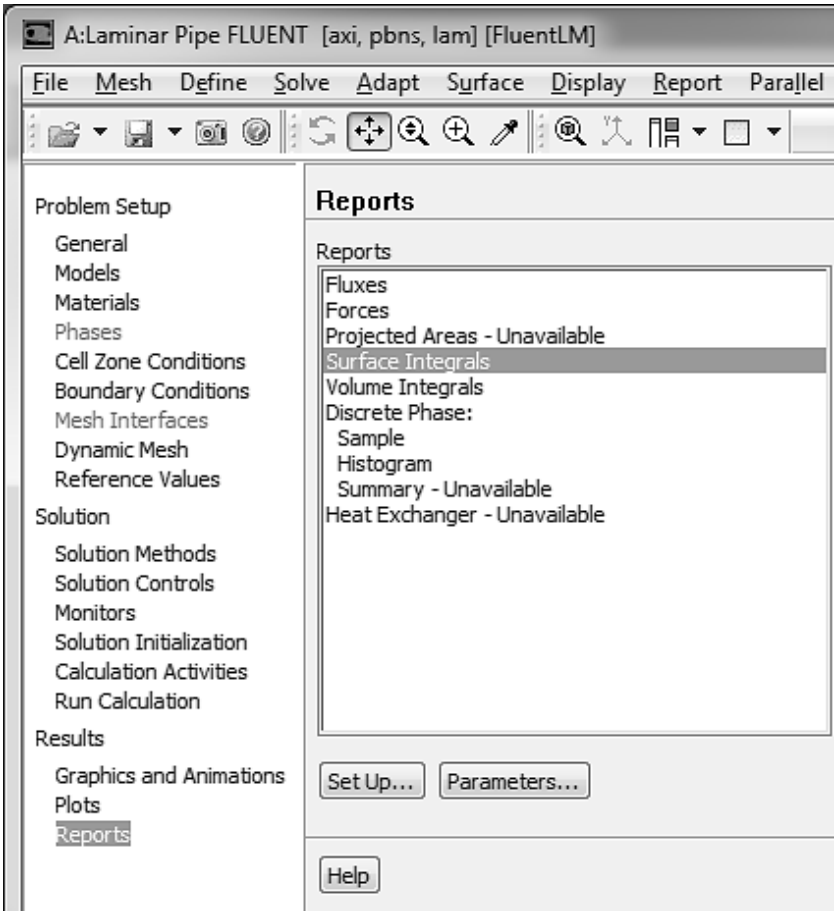

A:Laminar Pipe FLUENT [axi, pbns, lam] [FluentLM]
File Mesh Define Solve Adapt Surface Display Report Parallel
Problem Setup
General
Models
Materials
Phases
Cell Zone Conditions
Boundary Conditions
Mesh Interfaces
Dynamic Mesh
Reference Values
Solution
Solution Methods
Solution Controls
Monitors
Solution Initialization
Calculation Activities
Run Calculation
Results
Graphics and Animations
Plots
Reports
Reports
Reports
Fluxes
Forces
Projected Areas - Unavailable
Surface Integrals
Volume Integrals
Discrete Phase:
Sample
Histogram
Summary - Unavailable
Heat Exchanger - Unavailable
Set Up...
Parameters...
Help

Рис. 52.

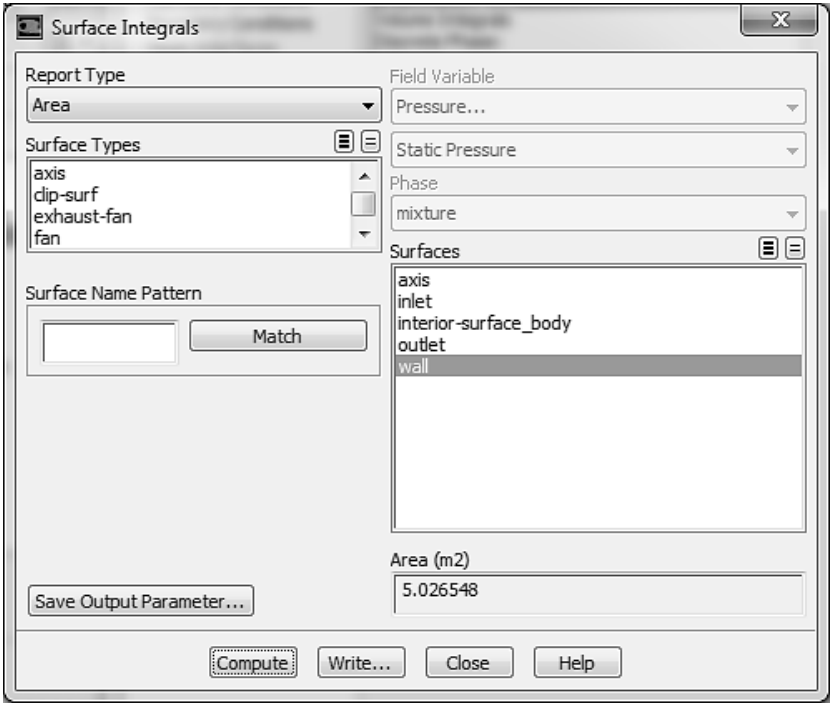


Рис. 53.

Area	(m2)
wall	5.0265484

Рис. 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. 55.
6) Вставляем скопированное значение площади в строку Area (m2).

7) В строках Density (kg/m^3), Velocity (m/s) задаем значения 1.

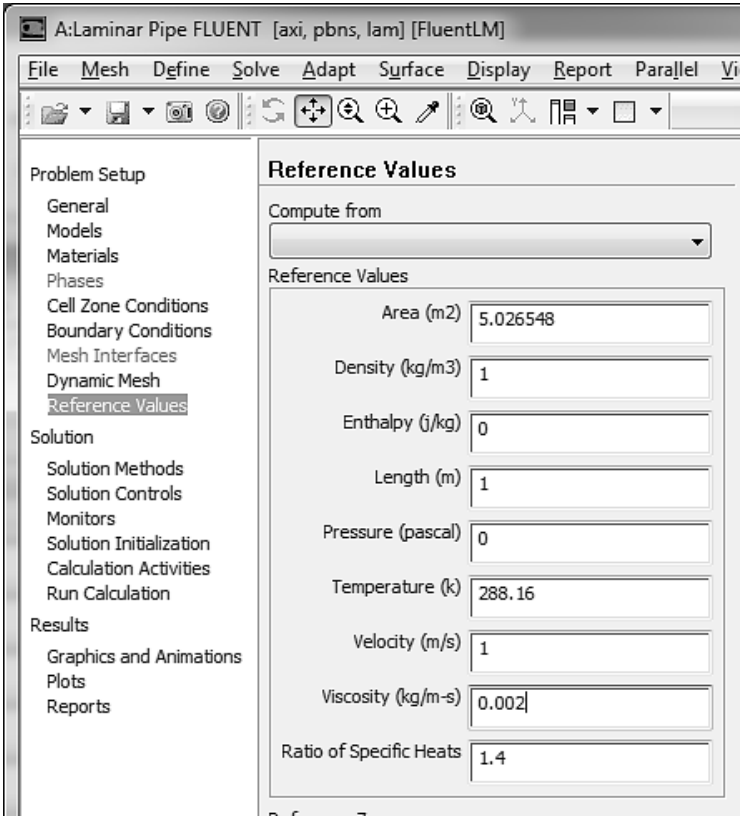


Рис. 55.

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. 56.

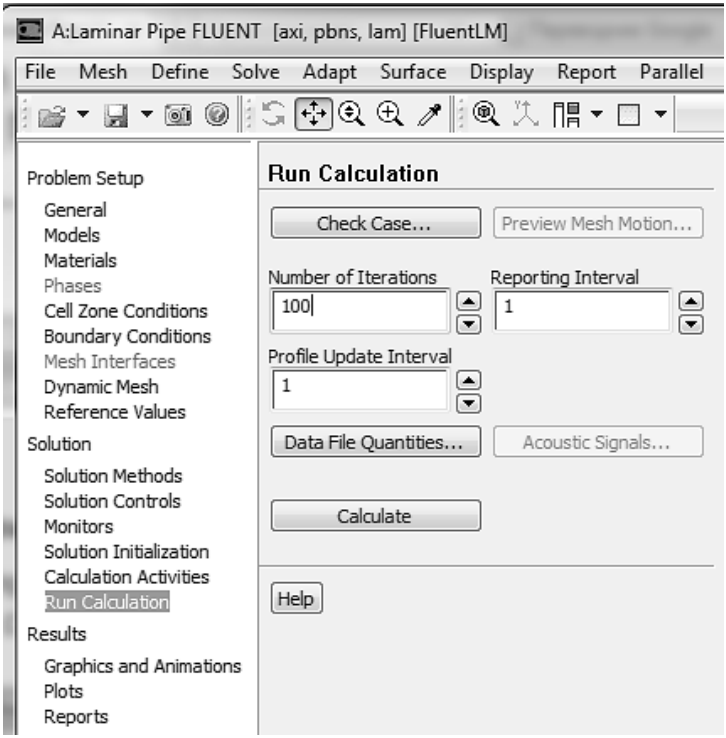


Рис. 56.

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. 57.
7) Сохраните проект, File →Save Project.

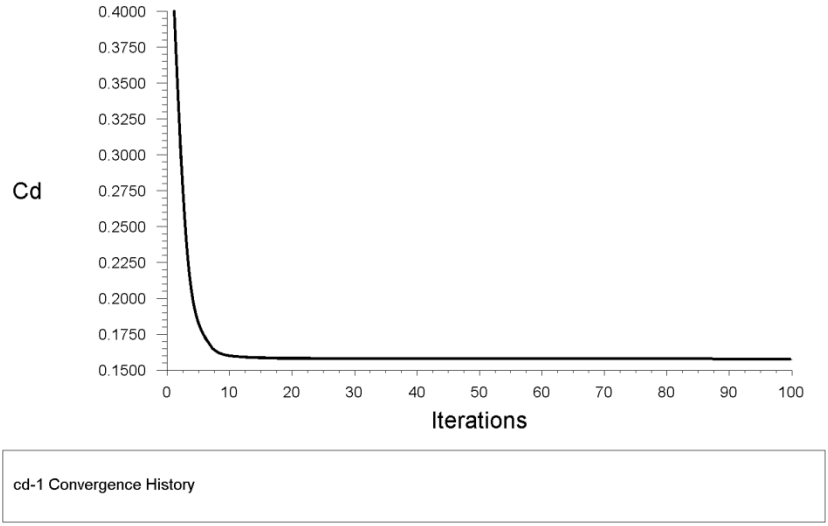


Рис. 57.

5.10. Обработка результатов расчета с помощью средств FLUENTа

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

5.10.1. Построение поля векторов скоростей

1) В разделе Results выбираем подраздел Graphics and Animations.
2) В окне Graphics выбираем Vectors и жмем кнопку Set Up…, рис. 58.
3) В появившемся окне Vectors, рис. 59. жмем 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. 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.

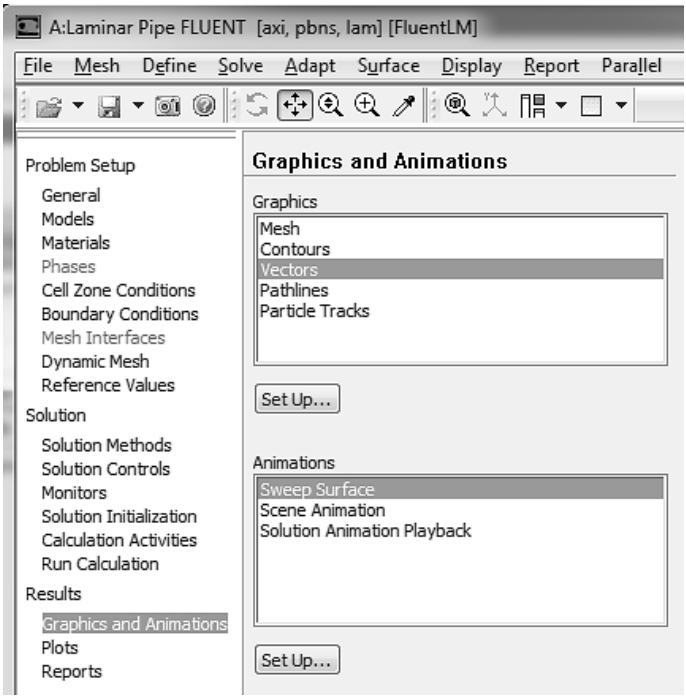


Рис. 58.

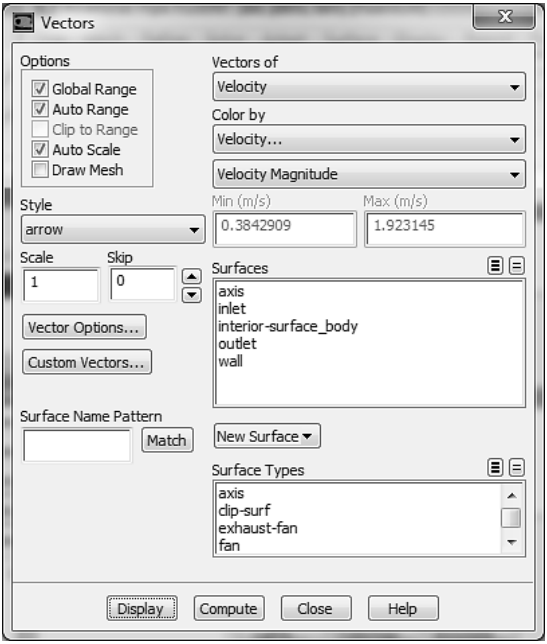


Рис. 59.

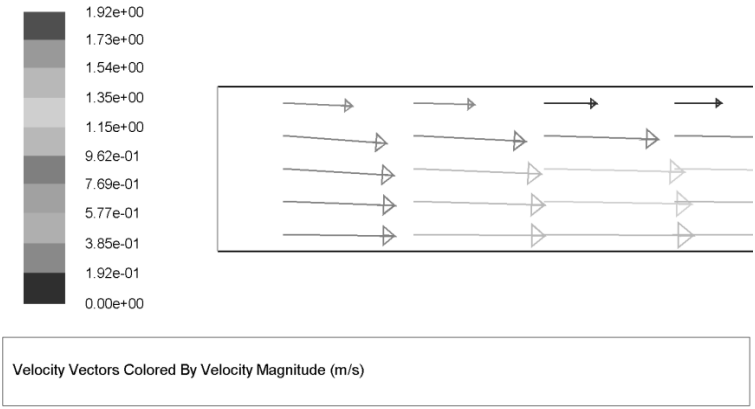


Рис. 60.

5.10.2. 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. 61.
3) В появившемся окне Contours в разделе Contours of выбираем Velocity… и Velocity Magnitude. Жмем кнопку Display, рис. 62.
4) В графическом окне будут изображены изолинии модуля скорости, рис. 63.

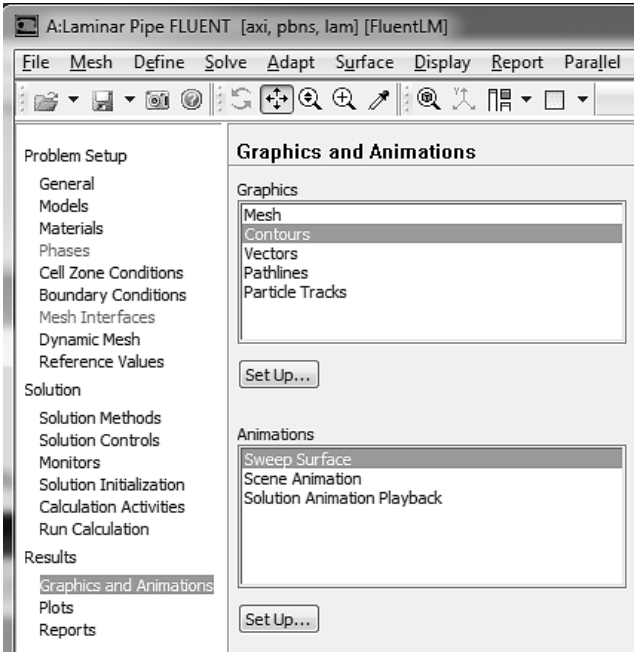


Рис. 61.

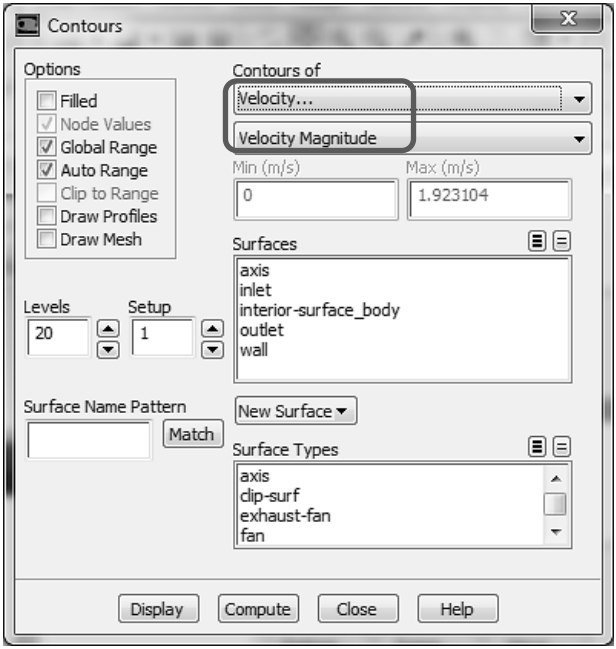


Рис. 62.

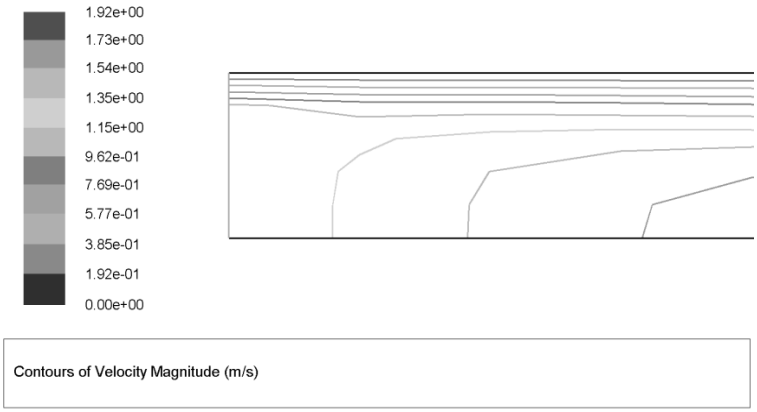


Рис. 63.

5) Количество построенных изолиний можно изменить, указав требуемое число (не более 100) в поле Levels, после чего на-

жать 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. 64. В графическом окне появится окрашенное поле контуров модуля скорости, рис. 65.

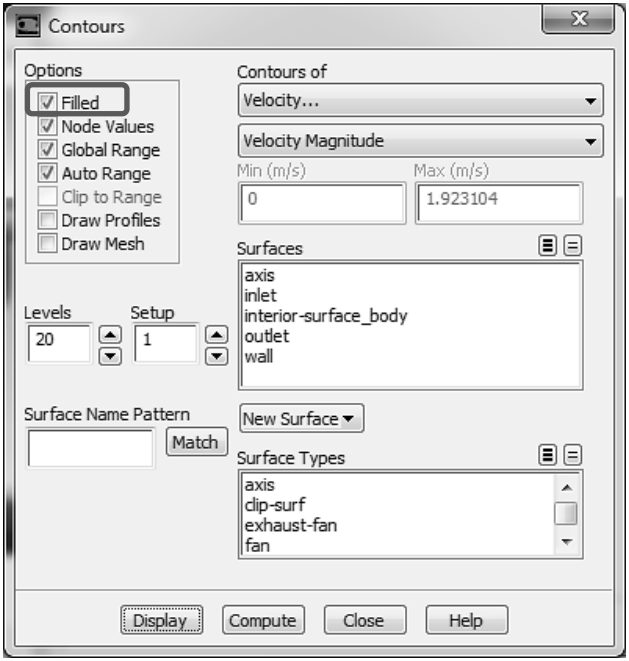


Рис. 64.

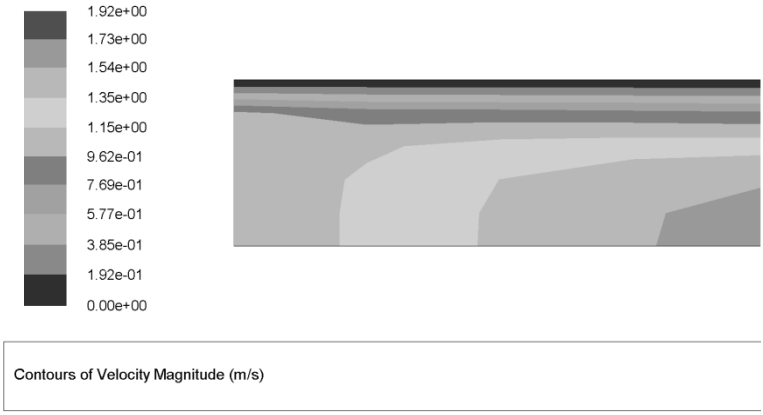


Рис. 65.

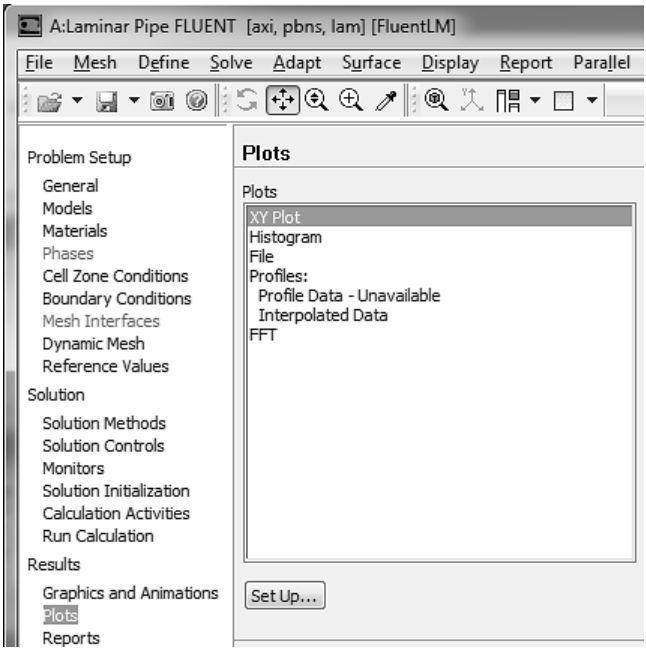


Рис. 66.

5.10.3. Построение профиля скорости на выходе из канала

1) В разделе Results выбираем Plots. В поле Plots выбираем XY Plot, рис. 66.
2) Жмем кнопку Set Up… Появиться окно Solution XY Plot.
3) В окне Solution XY Plot настраиваем опции, как показано на рис. 67.

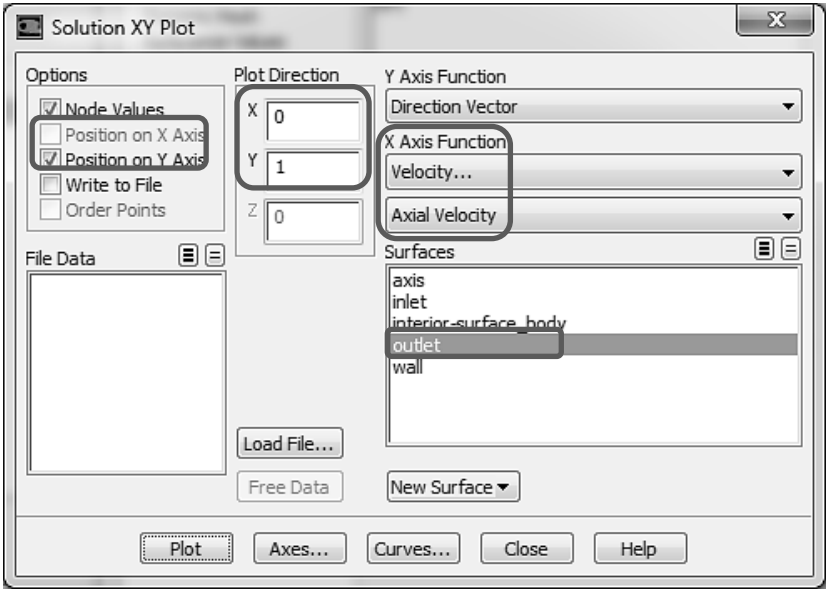


Рис. 67.

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. 68.
5) Для более наглядного представления полученного профиля скорости можно соединить точки линиями. Для этого в окне Solution XY Plot, рис. 67, следует нажать кнопку Curves… .
6) В появившемся окне Curves - Solution XY Plot выбрать значение Pattern раздела Line Style, как показано на рис. 69.

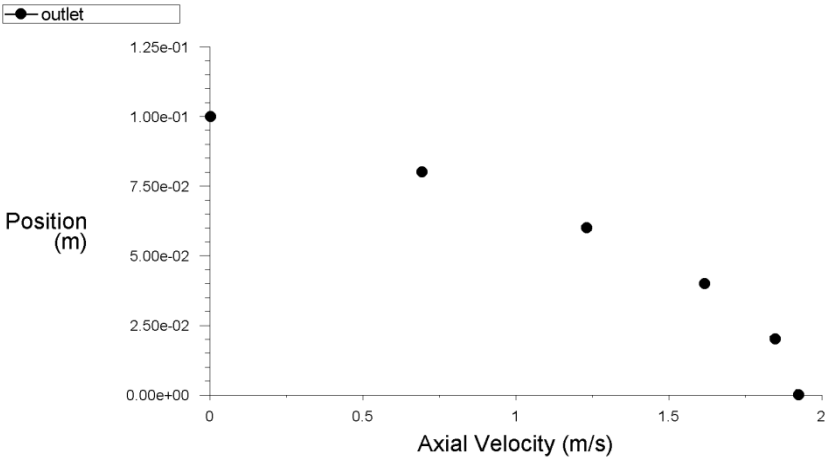


Рис. 68.

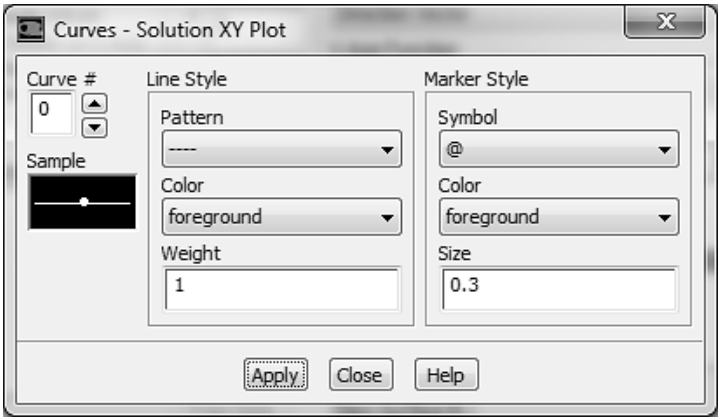


Рис. 69.

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. 70.

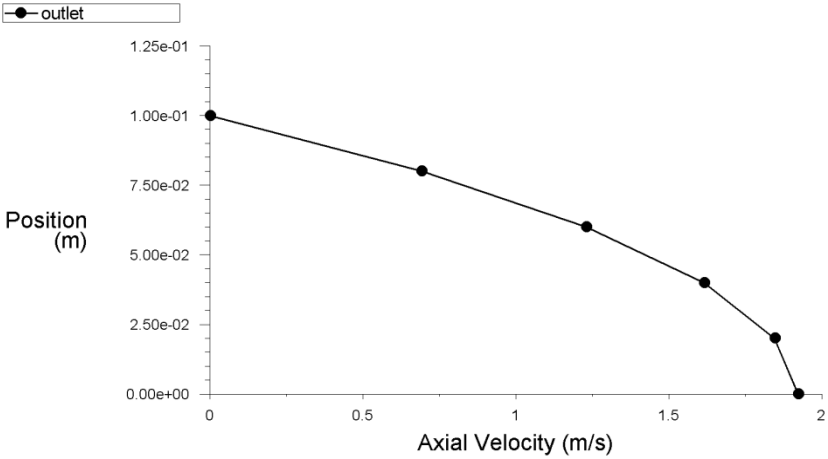


Рис. 70.

5.10.4. 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. 71.
3) Жмем кнопку Plot. В графическом окне будет показан требуемый график, рис. 72.

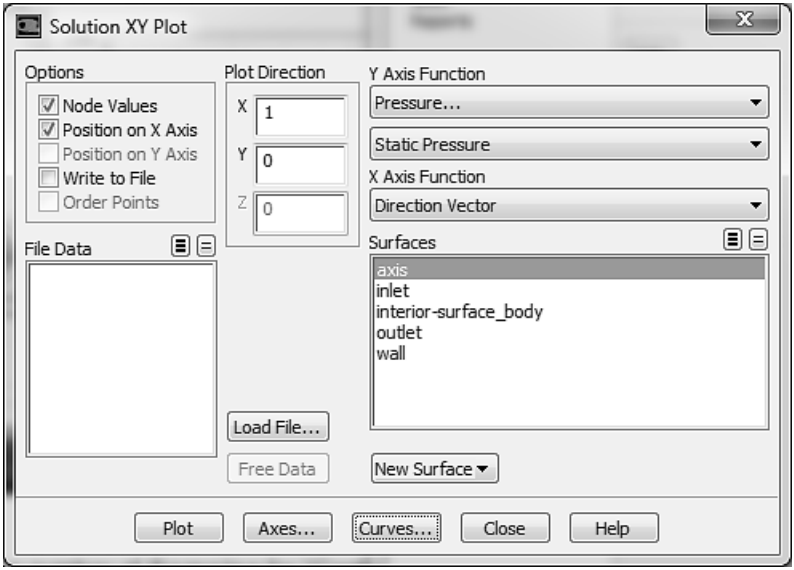


Рис. 71.

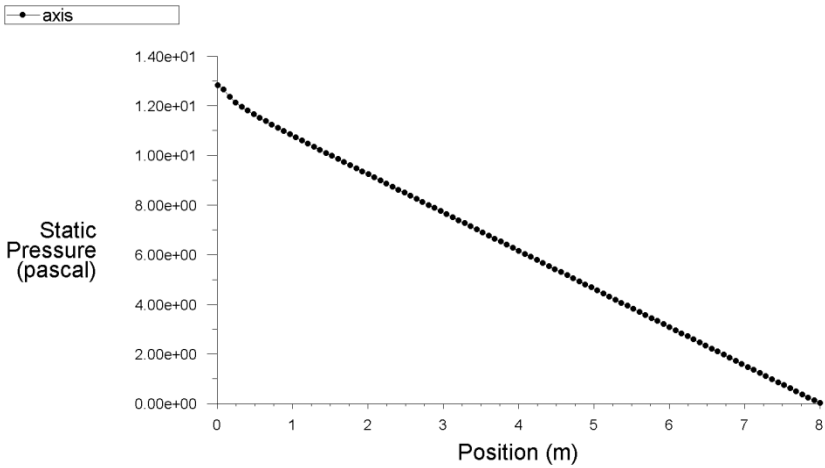


Рис. 72.

5.10.5. 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:

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

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. 73. Появится окно Flux Reports, в котором выделяем границы inlet и outlet и жмем кнопку Compute, рис. 74. В поле Results поя-

вятся 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.

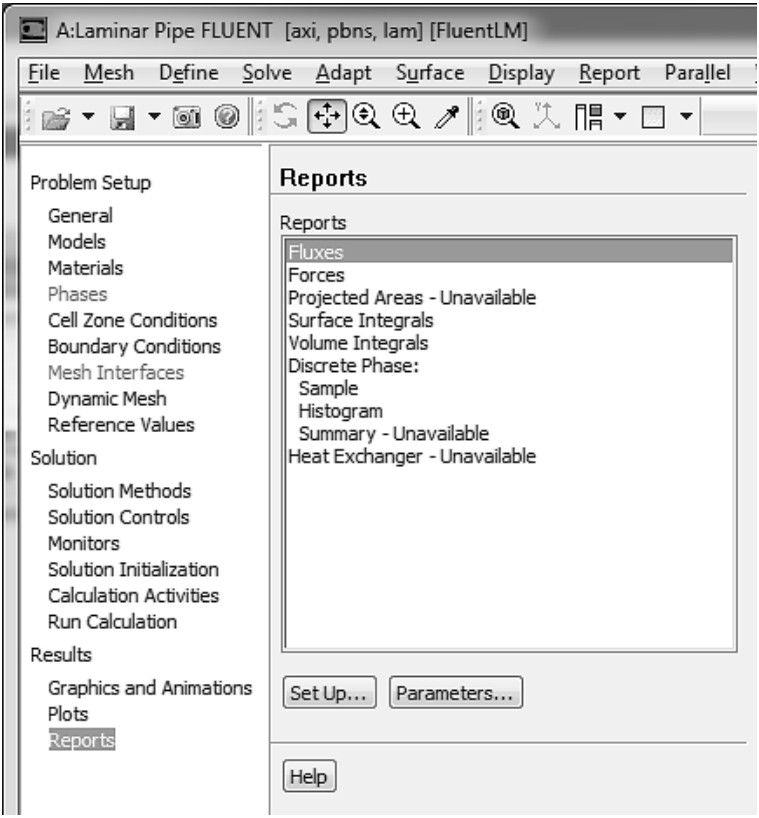


Рис. 73.

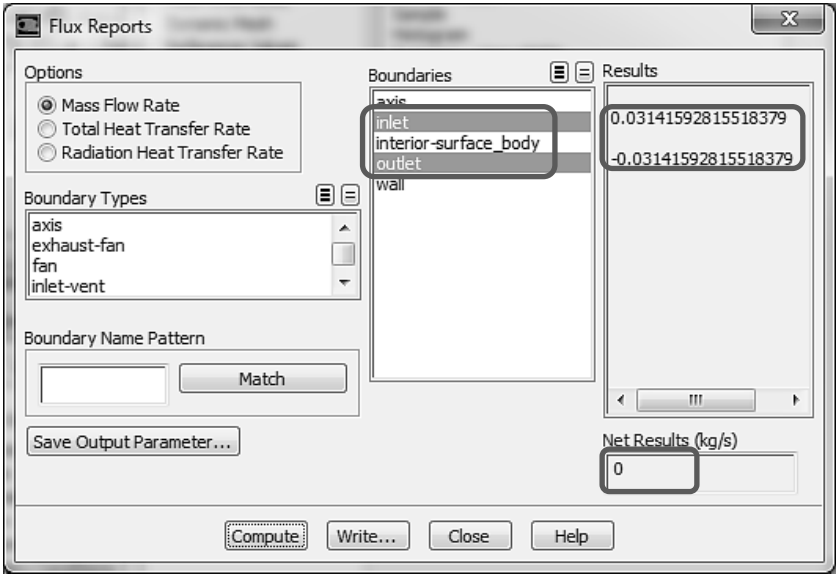


Рис. 74.

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:

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

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

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

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

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.

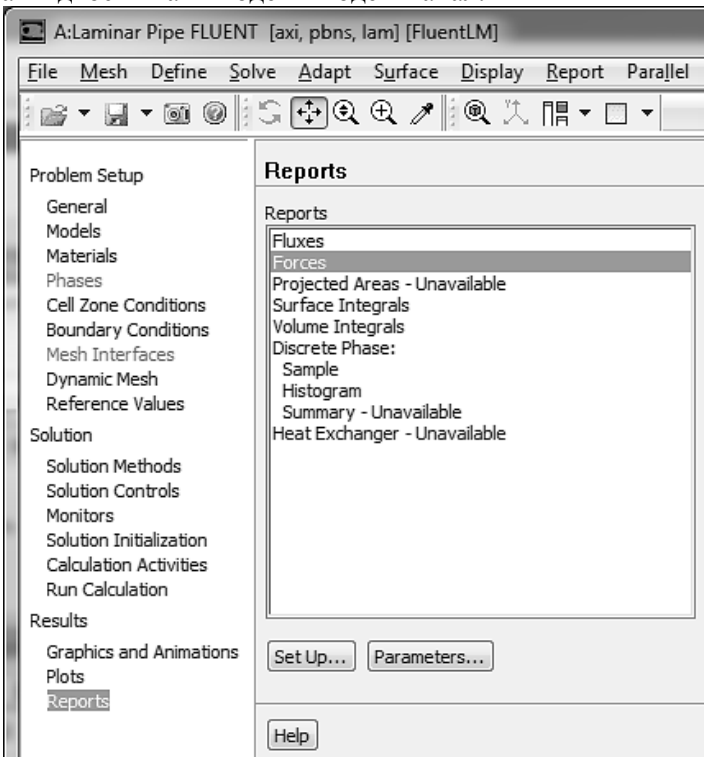


Рис. 75.

Для нахождения силы трения следует выполнить Reports→Forces→Set Up… , рис. 75. В появившемся окне Force Reports настроить опции, как показано на рис. 76, и нажать кнопку Print. В окне консоли будет выведена информация о силе трения на боковой поверхности, которой мы дали имя wall, рис. 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. 78.

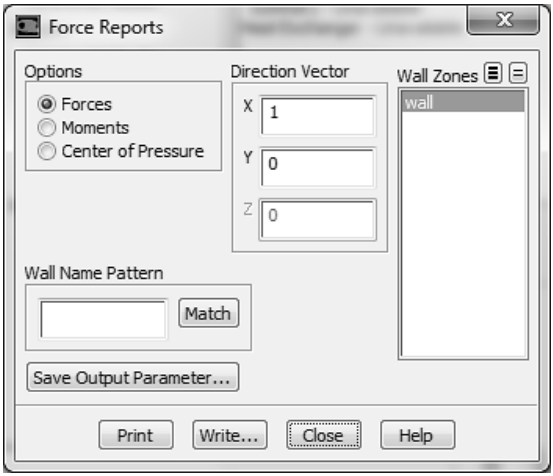


Рис. 76.

```
Forces
                          Forces (n)
Zone                      Pressure                                        Viscous
wall                      (0 0 0)                                         (0.39561415 0 0)
------------------------- ----------------------------------------------- ----------------
Net                       (0 0 0)                                         (0.39561415 0 0)

Forces - Direction Vector (1 0 0)
                          Forces (n)                                        Coefficients
Zone                      Pressure        Viscous         Total           Pressure
wall                      0               0.39561415      0.39561415      0
------------------------- --------------- --------------- --------------- ---------------
Net                       0               0.39561415      0.39561415      0
```

Рис. 77.

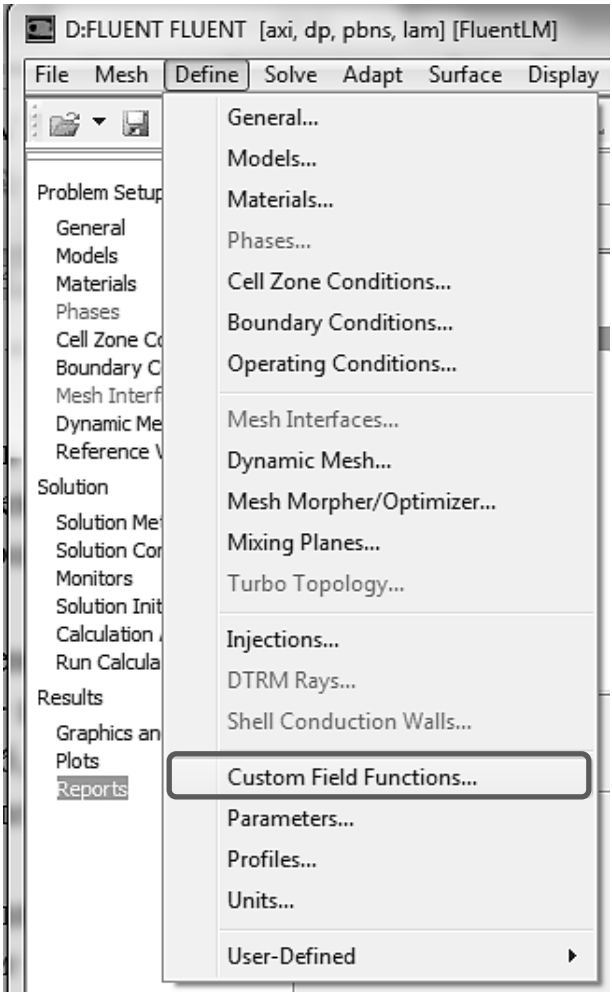

D:FLUENT FLUENT [axi, dp, pbns, lam] [FluentLM]
File
Mesh
Define
Solve
Adapt
Surface
Display
Problem Setup
General
Models
Materials
Phases
Cell Zone Co
Boundary C
Mesh Interf
Dynamic Me
Reference V
Solution
Solution Me
Solution Con
Monitors
Solution Init
Calculation
Run Calcula
Results
Graphics an
Plots
Reports
General...
Models...
Materials...
Phases...
Cell Zone Conditions...
Boundary Conditions...
Operating Conditions...
Mesh Interfaces...
Dynamic Mesh...
Mesh Morpher/Optimizer...
Mixing Planes...
Turbo Topology...
Injections...
DTRM Rays...
Shell Conduction Walls...
Custom Field Functions...
Parameters...
Profiles...
Units...
User-Defined

Рис. 78.

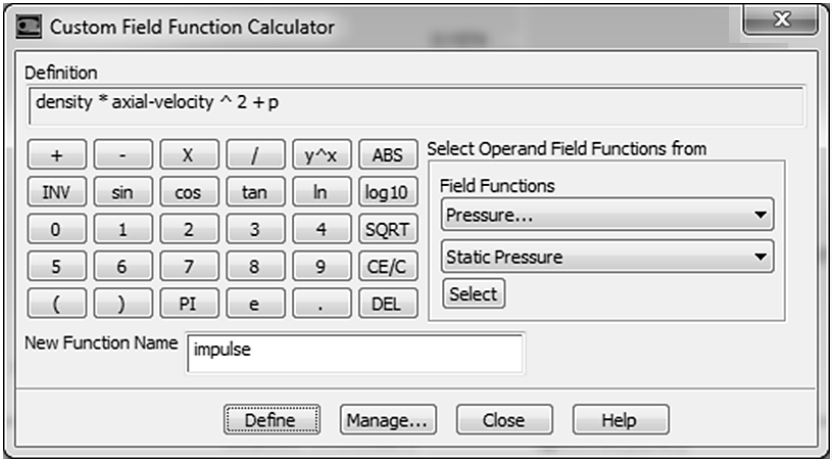


Рис. 79.

Откроется окно Custom Field Functions Calculator, рис. 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. 80.

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

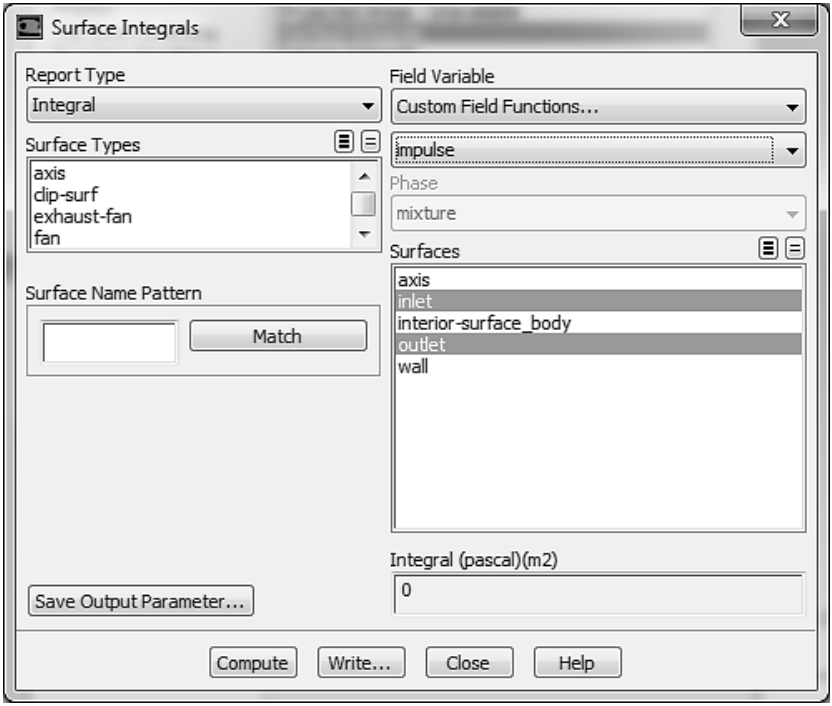


Рис.80.

Integral impulse	
inlet	0.43578309
outlet	0.040338889
Net	0.47612199

Рис. 81.

6. 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 Dublicate, рис. 82.
2) Появиться новая страница проекта. Переименуем ее в Laminar Pipe (mesh2), рис. 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.

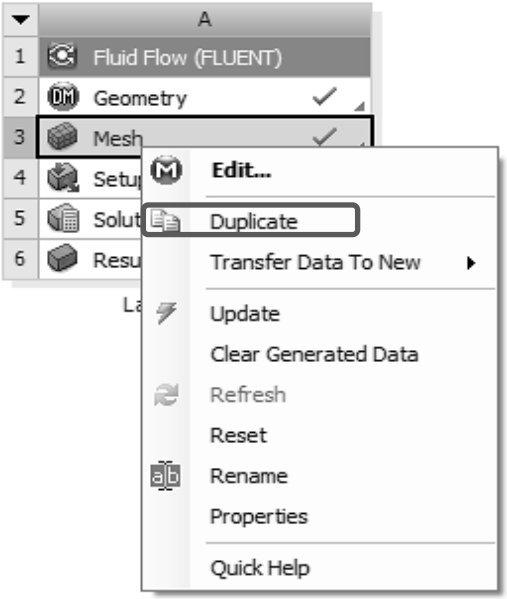


Рис. 82.

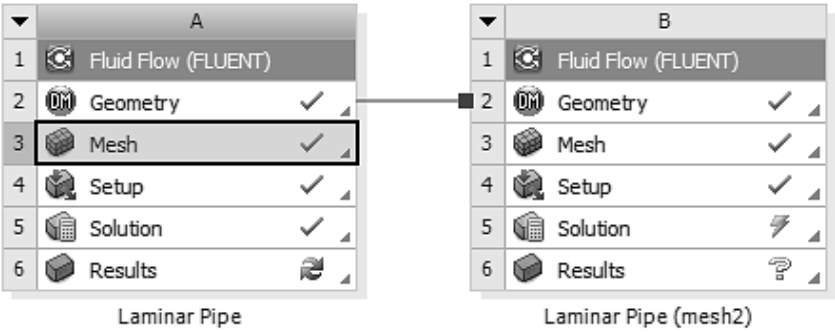


Рис. 83.

7. 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.

8. Задание

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 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 × 5, 100 × 10 и 100 × 20, (осевое разбиение × 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

$$\varepsilon = \frac{\left| u_c - u_{точн} \right|}{u_{точн}}$$

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:

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

где u_{cp} – 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:

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

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

$$F_{тр} = -\int_{S_{бок}} \tau_w ds = 8 \cdot \pi \cdot u_{cp} \cdot l \cdot \mu .$$

Коэффициент трения жидкости о поверхность трубы определяется по формуле:

$$c_f = \frac{16}{\mathrm{Re}},$$

где $\mathrm{Re} = \rho u_{cp} D / \mu$.

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. FLUENT-Laminar Pipe Flow. URL: https://confluence. cornell.edu/ display/SIMULATION/ FLUENT+Laminar+Pipe+Flow (дата обращения: 18.02.2016)
4. ANSYS FLUENT Tutorial Guide. ANSYS Inc.: Southpointe, 2011. 1146 p.

Учебное издание

Леонид Леонидович Миньков

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ О ЛАМИНАРНОМ ТЕЧЕНИИ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ В ТРУБЕ С ПОМОЩЬЮ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ПАКЕТА ANSYS FLUENT

Учебно-методическое пособие

Опубликовано в авторской редакции

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

Усл. печ. л. 3,57. Уч.-изд. л. 0,75.
Бумага для офисной техники. Гарнитура Times.
Подписано к печати 30.05.2016 г. Формат 60x84/16
Тираж 100 экз. Заказ № 88.