

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)» (СГАУ)

## **Изучение влияния качества сетки и моделей турбулентности на результаты CFD-расчёта в ANSYS Fluent**

Электронные методические указания к лабораторным работам

Работа выполнена по мероприятию блока 1 «Совершенствование образовательной деятельности» Программы развития СГАУ на 2009 – 2018 годы по проекту «Разработка образовательных стандартов СГАУ по специальности 160700.65 - Проектирование авиационных и ракетных двигателей и направлению подготовки бакалавров 160700.62 - Двигатели летательных аппаратов со сквозной документацией и создание исследовательских лабораторных работ и прогрессивных технологий лекционных занятий»  
Соглашение № 1/4 от 03.06.2013 г.

САМАРА  
2013

УДК СГАУ: 621.454.2

И 395

Составители: **Кривцов Александр Васильевич,**  
**Шаблий Леонид Сергеевич.**

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

**Изучение влияния качества сетки и моделей турбулентности на результаты CFD-расчёта в ANSYS Fluent** [Электронный ресурс] : электрон. метод. указания к лаб. работам / М-во образования и науки РФ, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т); сост.: А. В. Кривцов, Л. С. Шаблий. – Электрон. текстовые и граф. дан. (1,6 Мбайт). - Самара, 2013. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

В методических указаниях приведены основные сведения о принципах CFD-расчётов в программном комплексе Fluent, основанном на решении системы уравнений Навье-Стокса методом контрольных объёмов. На примере двумерной модели течения вокруг плохобтекаемого тела произведено исследование влияния качества сетки и моделей турбулентности на распределение параметров потока внутри расчетной зоны и интегральные характеристики потока.

Методические указания предназначены для подготовки студентов, обучающихся по специальности 160700.65 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей», изучающих дисциплину «САЕ-системы в механике жидкости и газа» в 5 семестре.

Разработано на кафедре ТДЛА.

© Самарский государственный  
аэрокосмический университет, 2013

## Содержание

Введение.....	4
Запуск ANSYS Fluent .....	5
Создание геометрической модели .....	8
Создание сеточной модели .....	13
Постановка расчётной модели и её решение .....	19
Модификация расчётной модели .....	34
Анализ полученных результатов .....	37
Преподавателю .....	42
Индивидуальные задания .....	43

## Введение

В настоящее время вычислительная гидрогазодинамика (*Computational Fluid Dynamics – CFD*) является популярным инженерным инструментом. Это обусловлено такими её качествами, как формальная простота постановки задачи и независимость методики её решения от рабочего процесса исследуемого узла. То есть, освоив методику решения простых задач, инженер может переходить к более сложным, реалистичным задачам, повысив квалификацию только в области нового способа задания граничных условий или параметров счёта.


Одним из ключевых моментов в газодинамическом расчете является подборка наиболее рациональной с точки зрения продолжительности расчета и адекватности получаемых результатов расчетной сетки и модели турбулентности. Каждой модели турбулентности соответствует свой круг задач, для которых она хорошо себя зарекомендовала. Кроме того, каждая модель турбулентности требует расчетную сетку определенного качества.

В настоящем пособии исследуется влияние густоты расчетной сетки и различных моделей турбулентности на поведение потока за плохо обтекаемым телом.

## Запуск ANSYS Fluent

*ANSYS Fluent* может функционировать как отдельно (*Standalone*), так и под управлением системы интеграции *Ansys WorkBench*. При запуске из-под *WorkBench* может осуществляться автоматическая интеграция системы трёхмерного моделирования, сеткогенератора и расчётных систем, что позволяет производить вариантное проектирование.

**Шаг 1.** Запуск *ANSYS WorkBench* осуществляется из главного меню:

Пуск -> Все программы -> Ansys 14.0 ->  Workbench .

Окно программы (рис. 1) состоит из рабочего поля проекта, списка компонентов, окна сообщений, окна свойств и ещё нескольких элементов, которые могут быть включены опционально (список файлов, окно статуса проекта и т.п.).

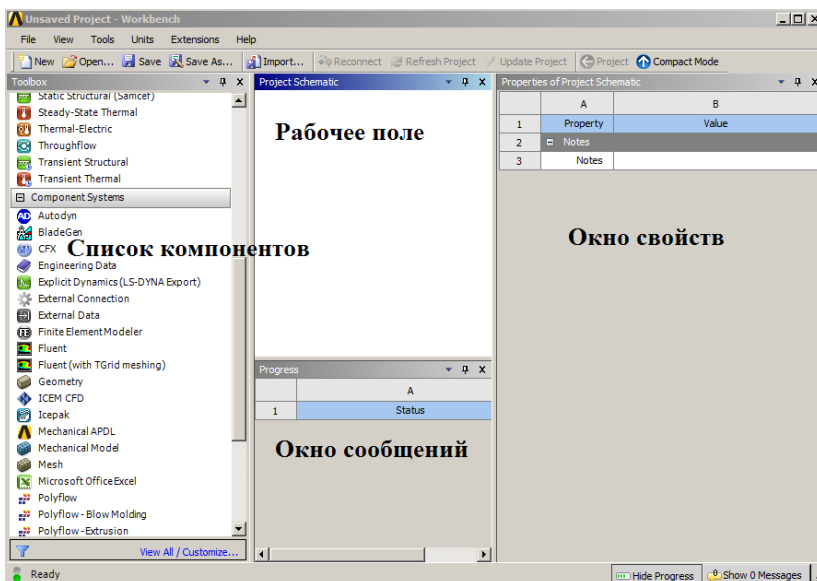


Рис. 1 - Вид окна программы *Ansys WorkBench*

**Шаг 2.** Необходимо сохранить проект во избежание потери данных с помощью меню *Save As* главного меню. **Внимание!** Используйте в названии папок и файлов только латинские буквы или цифры.

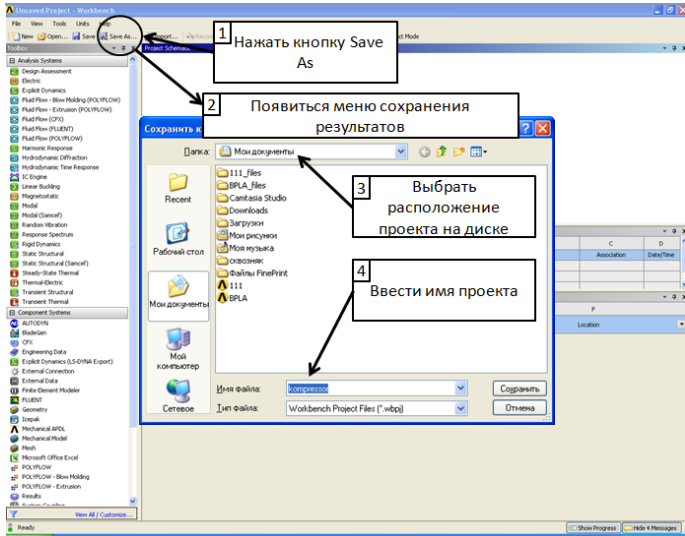


Рис. 2 – Сохранение проекта

**Шаг 3.** Затем необходимо добавить в рабочее поле модуль *Fluid Flow (Fluent)*. Для этого удерживая левую кнопку мыши перетащить его на свободное поле проекта к любому месту, где появится зелёный пунктирный прямоугольник, разрешающий размещение (рис. 3).

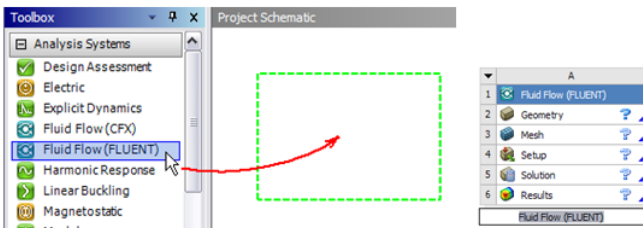


Рис. 3 - Перенос системы анализа потоков *Fluent* на поле проекта

В добавленном модуле *Fluid Flow (Fluent)* содержатся компоненты с названиями *Geometry* (геометрическая модель), *Mesh* (сетка), *Setup* (постановка задачи), *Solution* (решение), *Results* (анализ

результатов). В правой части каждой строки имеется пиктограмма, обозначающая её статус, синий знак вопроса показывает, что данный пункт пока не определен (ничего не задано).

**Шаг 4.** Затем следует выбрать режим двухмерного расчета течения (2D). Для этого в меню свойств компонента *Geometry* в поле тип анализа (*Analysis Type*) указывается в выпадающем меню двухмерный (2D) (рис. 4).

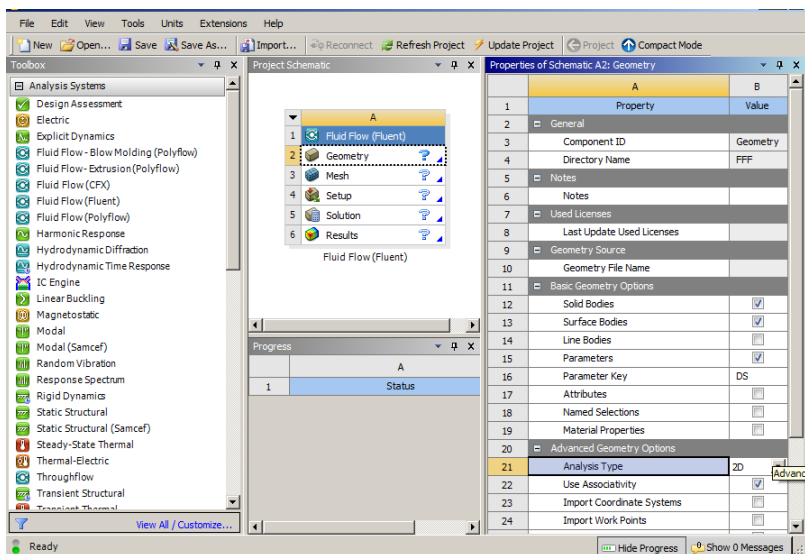


Рис. 4 Выбор двухмерного типа анализа

## Создание геометрической модели

**Шаг 1.** Запуск системы трёхмерного моделирования *Design Modeler*. Чтобы запустить приложение, достаточно дважды щелкнуть левой кнопкой мыши на интересующем пункте. Также можно щелкнуть правой кнопкой мыши, например, на пункте *Geometry* (геометрическая модель) и в появившемся контекстном меню (рис. 5) выбрать пункт *New Geometry* (новая геометрия) или *Edit* (изменить).

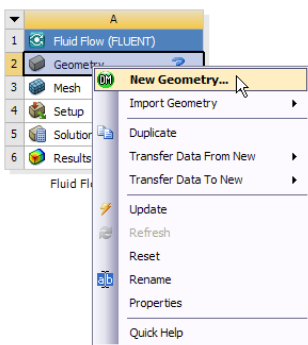


Рис. 5 - Создание новой геометрической модели

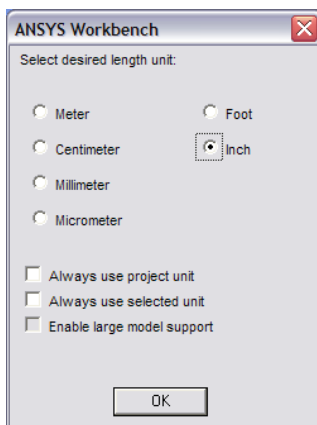


Рис. 6 - Выбор единиц измерения будущей модели

**Шаг 2.** Открывшееся окно системы трёхмерного моделирования *Design Modeler* при первом запуске предлагает выбрать единицу измерения будущей модели (рис. 6). Нужно выбрать миллиметры (*Millimeter*) и нажать *OK*.

Основную часть окна системы трёхмерного моделирования *Design Modeler* (рис. 7) занимает графическое окно, слева от которого расположено дерево проекта (*Tree Outline*) и окно детализации (*Details View*). Также имеются главное меню и панели быстрого, на которых расположены кнопки вызова часто используемых команд.



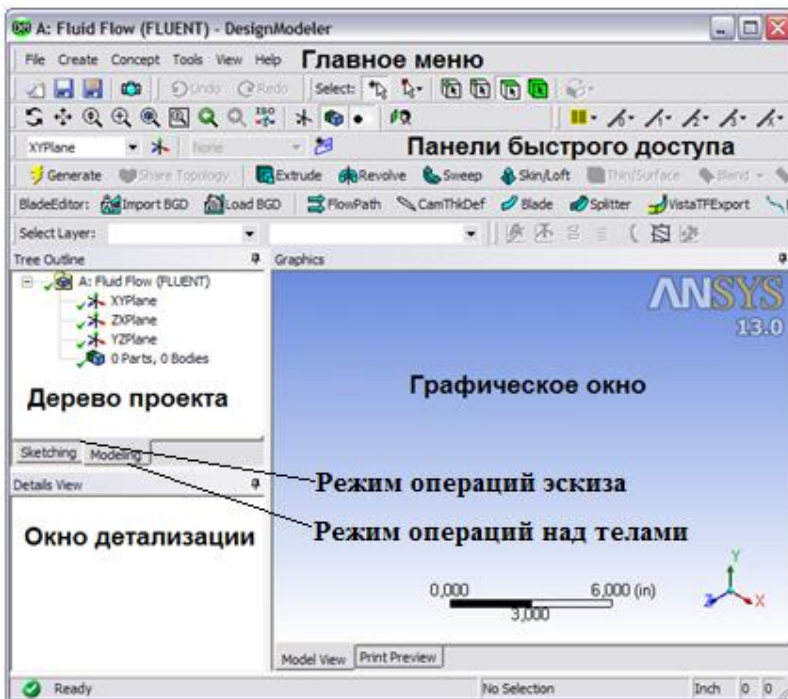




Рис. 6 - Окно *Design Modeler*

**Шаг 3.** Далее необходимо создать эскиз расчетной области. Для этого необходимо выбрать плоскость XY кликнув по ней ЛКМ, а затем перейти в режим эскизирования (*Sketching*). Для того чтобы развернуть рабочую плоскость к пользователю используется функция *Look At*  на панели быстрого доступа. Во вкладке *Draw* выбрать операцию создания четырехугольника *Rectangle* , с ее помощью в рабочем поле создается два четырехугольника (рис. 7).

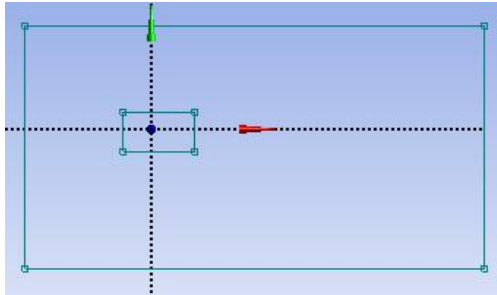



Рис. 7 – Эскиз расчетной модели

**Шаг 4.** Для правильного взаимного расположения четырехугольников необходимо расставить горизонтальные и вертикальные размеры. Для этого необходимо перейти во вкладку размеров (*Dimensions*) и выбрав горизонтальные размеры (*Horizontal* ) указать сначала левую боковую грань большого четырехугольника, затем ось *Y*. В результате операции появится размер *H1*, значение которого можно скорректировать во вкладке *Dimensions* (рис. 8). Чтобы скорректировать размер необходимо ввести нужное значение параметра во вкладке *Dimensions*.

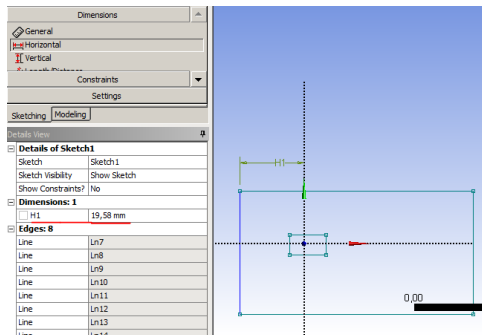



Рис. 8 – Нанесение управляемых размеров на эскиз

**Шаг 5.** По аналогии с предыдущим шагом необходимо нанести остальные размеры и указать их значение в соответствии с рис. 9. Для указания вертикальных размеров используется *Vertical* .

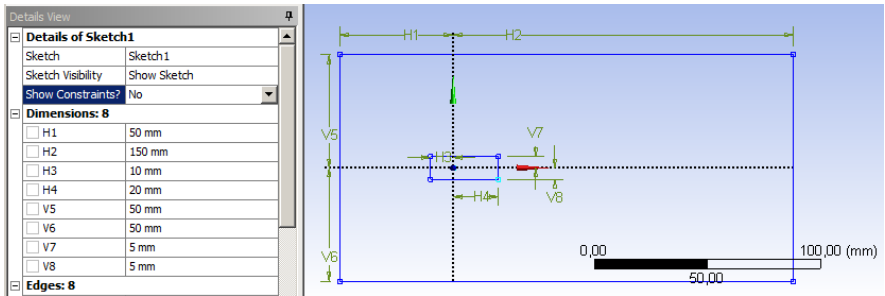



Рис. 8 – Нанесение управляемых размеров на эскиз

**Шаг 6.** Создать поверхность на основании созданного эскиза. Для этого в главном меню в меню *Concept* нужно выбрать создание поверхности по эскизу (*Surfaces From Sketches* ) , в меню свойств операции в качестве базового объекта (*Base Object*) указывается созданный эскиз *Sketch1* плоскости *XY* (рис. 9).

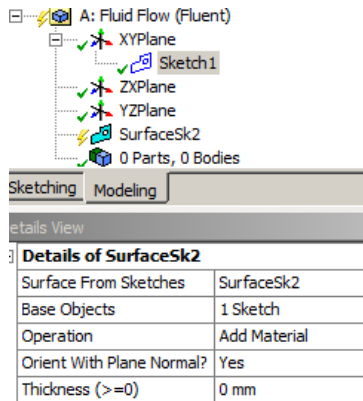



Рис. 9 – Нанесение управляемых размеров на эскиз

И нажать кнопку  **Generate** . При этом будет создана поверхность с вырезанным четырехугольником (рис. 10). В дереве проекта появится пункт *1 Part, 1 Body*, показывающий, что в данный момент проект содержит одну деталь и одно телом.

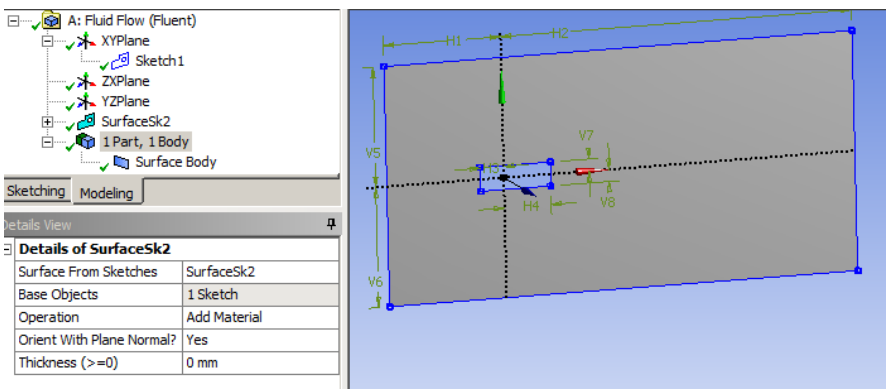



Рис. 10 - Окно *Design Modeler* с созданной поверхностью

**Шаг 7.** После окончания построения модели можно закрыть *Design Modeler* и вернуться в *WorkBench*. При этом сохранение модели будет выполнено автоматически и в строке геометрической модели (*Geometry*) появится зелёная галочка, означающая завершённое состояние элемента (рис. 11). При этом в строке сетки (*Mesh*) отображаются знак , что означает, что входная информация данного блока изменилась и требуется обновление. Чтобы открыть сеткогенератор, достаточно дважды щёлкнуть левой кнопкой мыши по данному пункту. При этом произойдет автоматическая загрузка в сеткогенератор рассматриваемой геометрической модели.

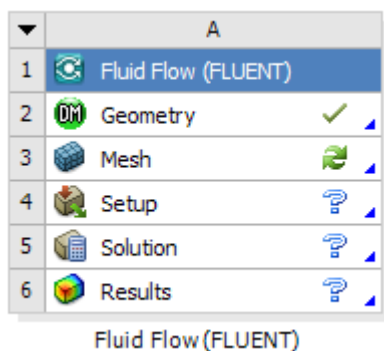


Рис. 11 - Состояние проекта при возвращении в окно *Workbench*

## Создание сеточной модели

Окно сеткогенератора (рис. 12) состоит из графической части, где можно видеть автоматически импортированную модель тройника, дерева проекта, окна визуализации, а также других элементов, аналогичных элементам *Design Modeler*.

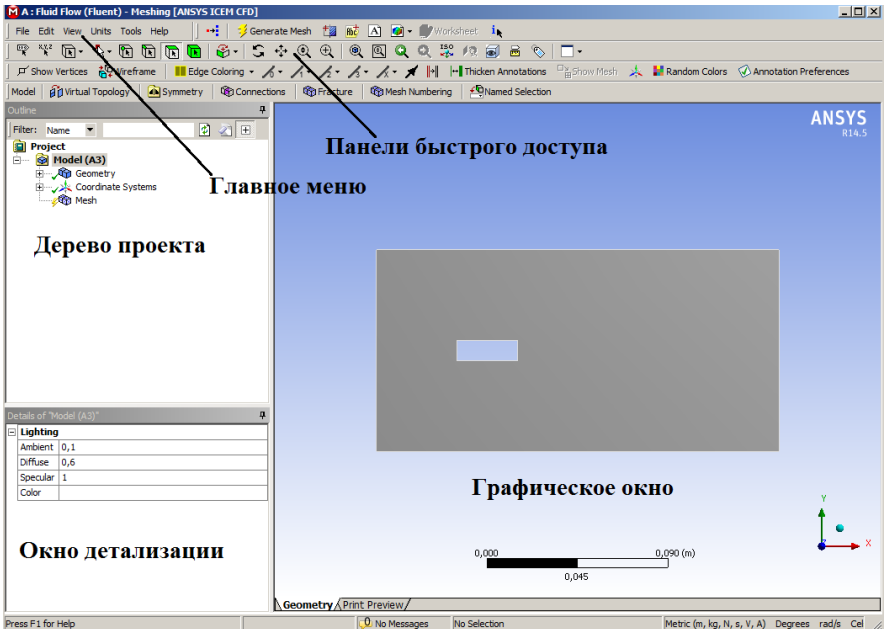




Рис. 12 - Окно сеткогенератора *Meshing* с моделью

Перед непосредственно генерацией сетки необходимо выделить границы (в данном случае линии) к которым будут применяться в дальнейшем различные граничные условия.

**Шаг 1.** Помечаем левую боковую грань модели. Для этого в графическом окне выбираем левой кнопкой мыши эту границу. Для того чтобы можно было выделить линию, необходимо выбрать соответствующий фильтр выбора  на панели быстрого доступа. После выделения элемент приобретет зелёный цвет. Далее нужно нажатием правой кнопки мыши на выделенном объекте вызвать

контекстное меню (рис. 13) и выбрать в нём пункт *Create Named Selection*  (создать наименованную группу).

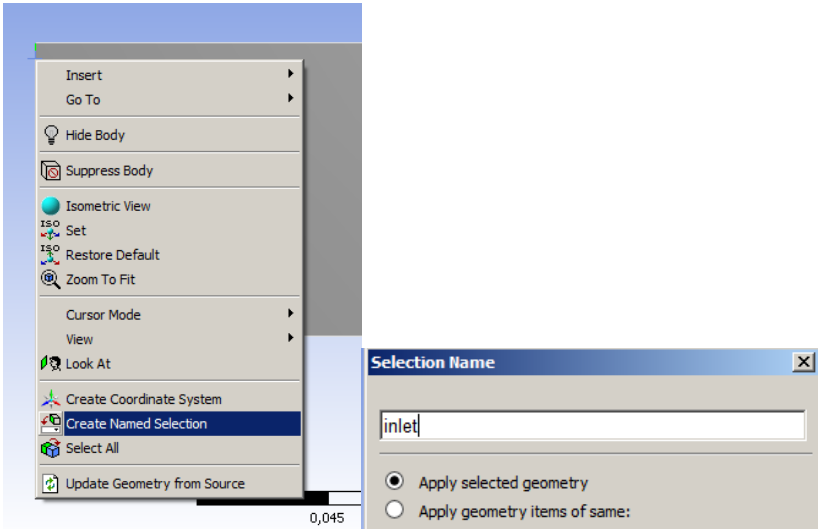


Рис. 13 – Выделение входной грани модели

В появившемся окне *Selection Name* (название группы) нужно ввести название границы *Inlet*. Название не должно содержать пробелов, может включать латинские буквы, цифры, знаки «-» и «\_» и должно начинаться с буквы. После подтверждения ввода (нажатия кнопки *OK*), в дереве проекта появится группа *Named Selections* (наименования), содержащая только что созданный элемент *inlet* (рис. 14).

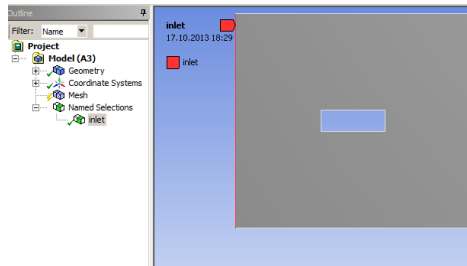


Рис. 14 - Наименованная граница inlet в дереве проекта

**Шаг 2.** Аналогичным образом необходимо подписать границы *outlet* - для правой боковой грани, *symmetry* - для верхней и нижней границы модели (рис. 15). Чтобы повернуть модель, используйте среднюю кнопку (колёсико) мыши.

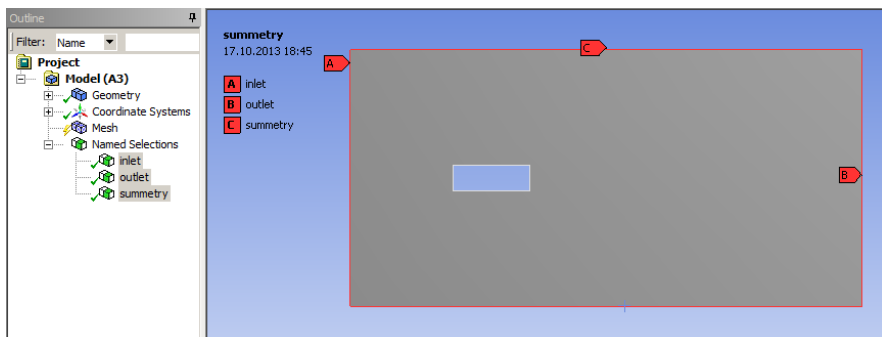


Рис. 15 – Необходимые выделенные границы модели

**Шаг 3.** После выделения границ необходимо задать параметры сетки и построить её. Для этого выбираем в дереве проекта пункт *Mesh* (сетка) и в окне детализации устанавливаем значение *Relevance Center* – *Coarse* (грубая сетка). Для этого нужно раскрыть (нажать «+») список *Sizing* (рис. 16). Размеры элементов сетки (*Sizing*) оставим по умолчанию. Для построения сетки нужно правой кнопкой мыши вызвать контекстное меню и выбрать пункт *Update* или *Generate Mesh* (рис. 17). Можно также использовать аналогичные кнопки на панели инструментов.

Через какое-то время генерация сетки (рис. 18) закончится, и если в дереве проекта выделить элемент *Mesh*, можно будет видеть расчётную сетку (рис. 19). Индикатор состояния сетки при этом примет вид зелёной галочки.

Defaults	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	Fluent
<input type="checkbox"/> Relevance	0
Sizing	
Use Advanced Size Fu...	On: Curvature
Relevance Center	Coarse
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Span Angle Center	Fine
<input type="checkbox"/> Curvature Normal ...	Default (18,0 °)
<input type="checkbox"/> Min Size	Default (1,1145e-004 m)
<input type="checkbox"/> Max Face Size	Default (1,1145e-002 m)
<input type="checkbox"/> Max Size	Default (2,2291e-002 m)
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1,20)
Minimum Edge Length	1,e-002 m

Рис. 16 - Задание параметров сетки

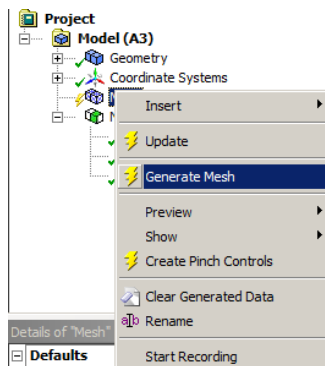


Рис. 17 - Запуск сеткогенерации

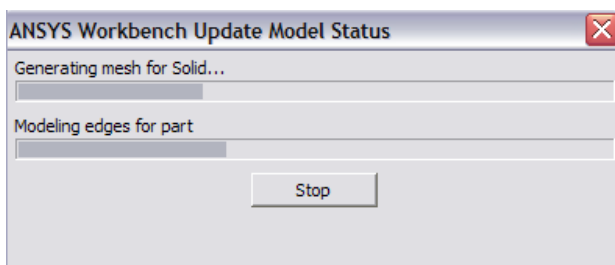


Рис. 18 - Процесс сеткогенерации

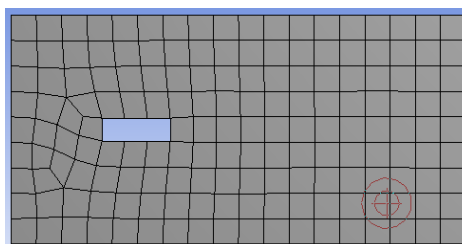


Рис. 19 - Построенная сетка

Созданная сетка (см. рис. 19) слишком грубая и не позволит получить адекватные результаты.



**Шаг 4.** Необходимо увеличить количество сеточных элементов. Для этого в поле *Relevance Center* выбираем параметр *Medium* (средняя сетка). Обратите внимание, что изменились значения максимального размера сеточного элемента (рис. 20). Затем запускаем процесс сеткогенерации снова. Созданная сетка изображена на рисунке 21.

Sizing	
Use Advanced Size Function	On: Curvature
Relevance Center	Medium
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Span Angle Center	Fine
<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	Default (18,0 °)
<input type="checkbox"/> Min Size	Default (5,5727e-005 m)
<input type="checkbox"/> Max Face Size	Default (5,5727e-003 m)
<input type="checkbox"/> Max Size	Default (1,1145e-002 m)
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1,20)
Minimum Edge Length	1,e-002 m

Рис. 20 - Задание параметров сетки

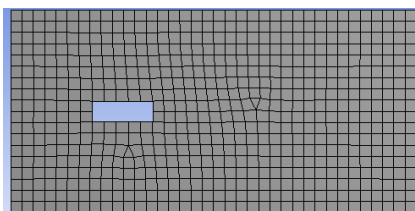


Рис. 21 – Улучшенная расчетная сетка

**Шаг 5.** Необходимо еще увеличить количество сеточных элементов. Для этого в поле *Relevance Center* выбираем параметр *Fine* (точная сетка). Обратите внимание, что изменились значения максимального размера сеточного элемента (рис. 22). Затем запускаем процесс сеткогенерации снова. Созданная сетка изображена на рисунке 23.

Sizing	
Use Advanced Size Function	On: Curvature
Relevance Center	Fine
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Span Angle Center	Fine
<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	Default (18,0 °)
<input type="checkbox"/> Min Size	Default (3,2643e-005 m)
<input type="checkbox"/> Max Face Size	Default (3,2643e-003 m)
<input type="checkbox"/> Max Size	Default (6,5287e-003 m)
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1,20)
Minimum Edge Length	1,e-002 m

Рис. 22 - Задание параметров сетки

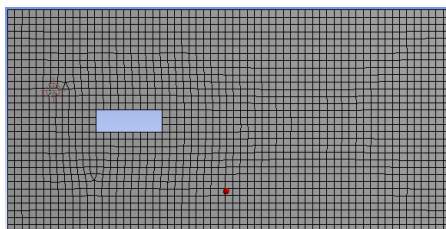


Рис. 23 – Улучшенная расчетная сетка

**Шаг 6.** Следующим шагом необходимо ввести в ручную максимальный размер сеточного элемента. Для этого во вкладке *Sizing* в поле *Max Face Size* вводится значение 0,0015 м (1,5 мм) (если значение не изменяется необходимо сменить разделитель целой дробной части с «.» на «,») (рис. 24). Затем запускаем процесс сеткогенерации снова. Созданная сетка изображена на рисунке 25.

Sizing	
Use Advanced Size Function	On: Curvature
Relevance Center	Fine
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Span Angle Center	Fine
<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	Default (18,0 °)
<input type="checkbox"/> Min Size	Default (3,2643e-005 m)
<input checked="" type="checkbox"/> Max Face Size	1,5e-003 m
<input type="checkbox"/> Max Size	Default (6,5287e-003 m)
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1,20 )
Minimum Edge Length	1,e-002 m

Рис. 24 - Задание параметров сетки

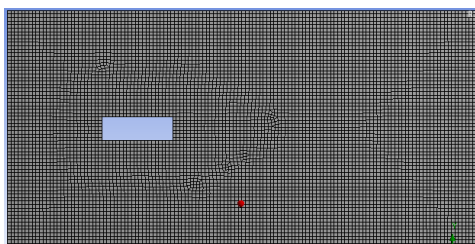



Рис. 25 – Улучшенная расчетная сетка

**Шаг 7.** После этого сеткогенератор (*Meshing*) можно закрыть и вернуться в *Workbench*. Сохранение сетки при этом произойдёт автоматически. На этом этапе можно сохранить расчётный проект, нажав в окне *Workbench* кнопку  **Save**.

После сохранения можно включить опцию *View -> Files* и посмотреть в появившейся таблице список файлов, относящихся к проекту. Это файл геометрии с расширением *agdb* и сетки - *mshdb*. В этой же таблице указано расположение этих файлов.

Можно видеть, что статус расчётной сетки проекта «выполнено» (✓). А строка описания расчётной задачи (Setup) готова к обновлению (↻).

## Постановка расчётной модели и её решение

Чтобы перейти в пре-процессор, дважды щелкните на элементе *Setup*. При этом появится окно загрузки программы *Fluent* (рис. 26). В нём нужно оставить все параметры по умолчанию и нажать *OK* для запуска *Fluent*.



Рис. 26 - Окно загрузки *Fluent*

Окно *Fluent* (рис. 27) состоит из графического окна, в котором можно видеть загруженную модель, окна текстовых сообщений, в которое выводятся результаты выполнения команд, дерева проекта и панели инструментов. В зависимости от того, какой пункт выбран в дереве проекта, открывается соответствующая панель. На панели *General* (общее) собраны инструменты для начальной настройки задачи.

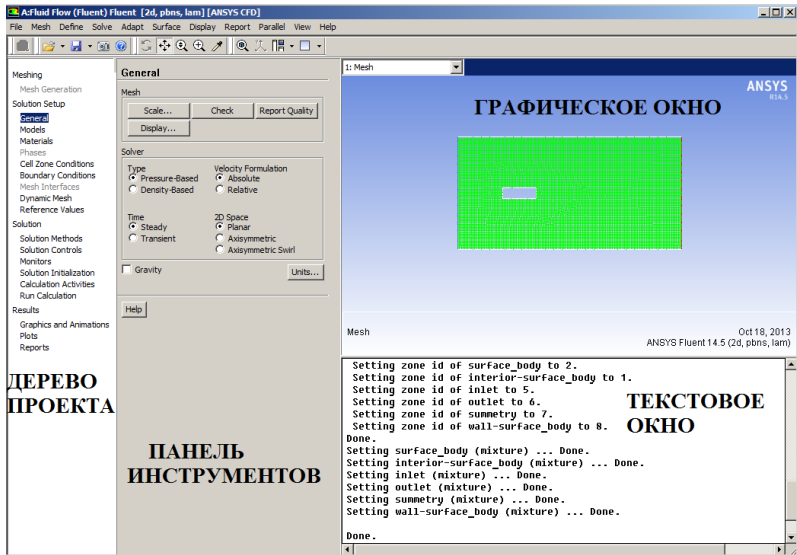


Рис. 27 – Внешний вид окна *Fluent*

**Шаг 1.** Перед началом расчёта необходимо проверить сетку на наличие ошибок, нажав на панели *General* кнопку *Check* (проверка). При этом будет выполнена проверка, заключающаяся в определении габаритов сетки, минимальных и максимальных объёмов расчётных ячеек и площадей их граней (рис. 28). Если в сетке присутствуют ошибки, будут выведены соответствующие сообщения. Если ошибок нет, сообщение будет выглядеть, как показано на рис. 28.

```

Domain Extents:
  x-coordinate: min (m) = -5.000000e-02, max (m) = 1.500000e-01
  y-coordinate: min (m) = -5.000000e-02, max (m) = 5.000000e-02
Volume statistics:
  minimum volume (m3): 9.243761e-07
  maximum volume (m3): 2.544951e-06
  total volume (m3): 1.970000e-02
Face area statistics:
  minimum face area (m2): 9.257353e-04
  maximum face area (m2): 1.819759e-03
Checking mesh.....
Done.

```

Рис. 28 - Результат выполнения команды *Check*

На первом этапе предполагается производить моделирование только по уравнениям Навье-Стокса без применения дополнительных моделей турбулентности. По умолчанию в каждом расчёте уже включена опция *Laminar* на вкладке *Models* (модели), поэтому делать ничего не нужно (рис. 29).

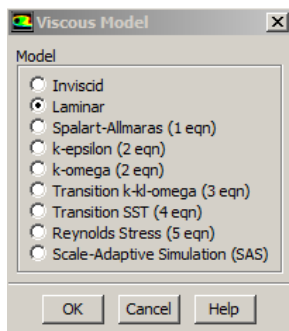


Рис. 29 - Вкладка *Models* → *Viscous*

**Шаг 2.** Добавляем в проект расчёта новое рабочее тело - воду.

Для этого нужно перейти на вкладку *Materials* (вещества) и нажать кнопку *Create/Edit*. По умолчанию в проекте доступны два вещества: воздух (*air*) в качестве текучей среды (*fluid*) и алюминий (*aluminum*) в качестве сплошной (*solid*). В появившемся окне свойств *Create/Edit Materials* находятся настройки теплофизических свойств используемых веществ. Чтобы добавить новое вещество из встроенной базы данных необходимо нажать на кнопку *Fluent Database*. В появившемся окне базы данных веществ *Fluent Database Materials* нужно найти воду (*water-liquid(h2o)*). Выбранный компонент добавляется в проект нажатием кнопки *Copy* (рис. 30).

После это окна редактирования свойств рабочего тела закрываются (*Close*).

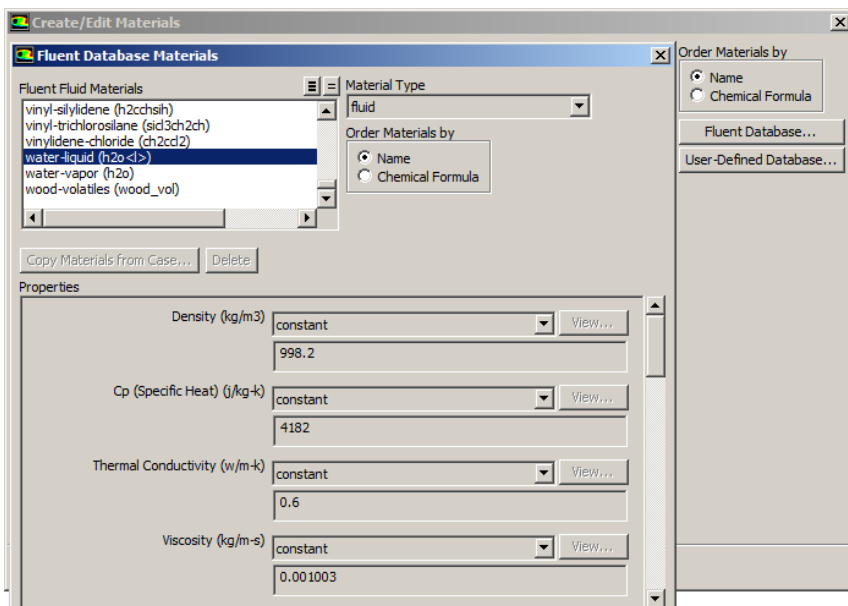


Рис. 30 – Добавление в проект нового рабочего тела

**Шаг 3.** Необходимо указать новое рабочее тело для расчетной модели. Для этого нужно перейти на вкладку *Cell Zone Conditions* и нажать кнопку *Edit*. В появившемся окне в поле *Material Name* из выпадающего списка выбирается рабочее тело вода *water-liquid* (рис. 31).

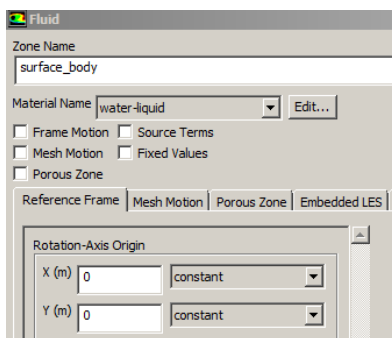


Рис. 31 – Настройка рабочего тела расчетной зоны

**Шаг 4.** Для настройки граничных условий необходимо перейти во вкладку *Boundary Conditions* (граничные условия). Здесь отображаются все границы, ранее выделенные в сеткогенераторе. Для настройки входа в списке граничных условий нужно выбрать *inlet*, проверить, что типом данного граничного условия является *velocity-inlet* (вход с заданием скорости потока), нажать кнопку *Edit* и в появившемся окне (рис. 32) задать следующие параметры:

Вкладка *Momentum* (количество движения):

*Velocity Magnitude* (величина скорости) -> 5 m/s

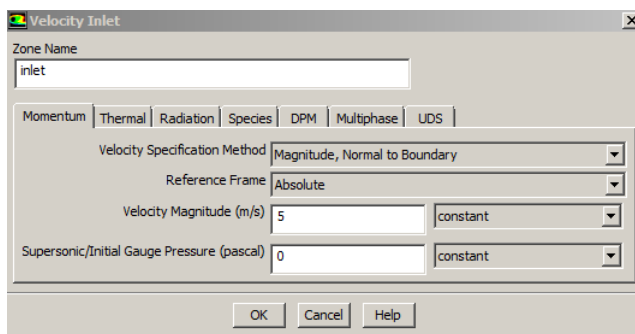


Рис. 32 – Настройка граничного условия входа

**Шаг 3.** Аналогично нужно настроить граничное условие выхода (*outlet*) (рис. 33):

*Type* -> *pressure-outlet* (выход с заданием давления)

*Momentum*:

*Gauge Pressure* (статическое избыточное давление) -> 100000

Любое значение давления во *Fluent* задаётся от уровня опорного или ссылочного давления (*Operating Pressure*), которое по умолчанию установлено равным 1 атм.

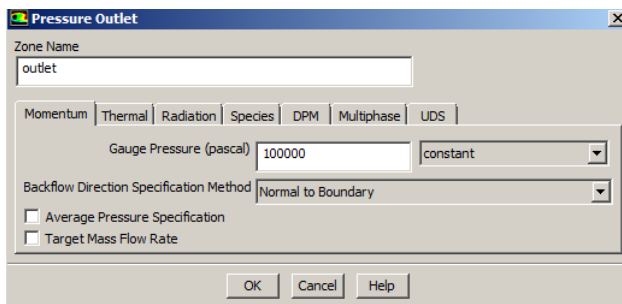


Рис. 33 – Настройка граничного условия выхода

**Шаг 4.** Затем необходимо для границ симметрии применить соответствующий тип граничного условия. В поле *Type* выбирается тип *symmetry* и на запрос программы о его изменении ответить *Yes*. (*outlet*) (рис. 34):

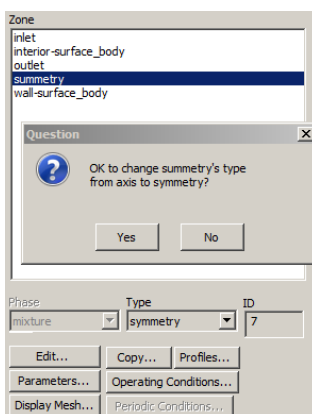


Рис. 34 – Настройка граничного условия симметрии

**Шаг 5.** Переход к настройке ссылочных параметров осуществляется нажатием кнопки *Operating Conditions*. В открывшемся меню необходимо ввести нулевое значение ссылочного давления (рис. 35).



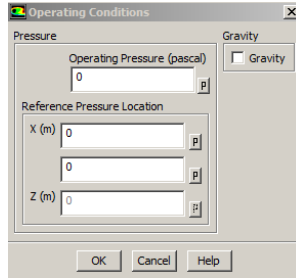


Рис. 35 – Изменение настроек ссылочного давления

**Шаг 6.** Выполнение так называемой инициализации расчётной модели – заполнения памяти компьютера начальными значениями переменных, необходимыми для проведения первой итерации. Для инициализации нужно перейти на вкладку *Solution Initialization* (инициализация решения), на панели выбрать стандартный тип инициализации (рис. 36) - *Standard Initialization*. Затем в поле *Compute from* выбирается входная граница (*inlet*), в качестве инициализационной, и нажимается кнопка *Initialize*. При этом во всей расчетной области начальные параметры в ячейках становятся такими же, как на входе.

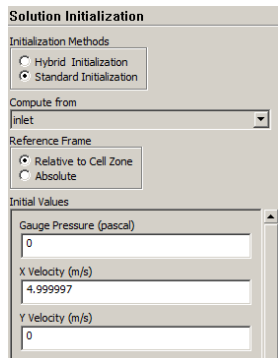


Рис. 36 – Изменение настроек ссылочного давления

**Шаг 7.** Выполняем сведение решения. Для этого нужно перейти на вкладку *Run Calculation*, ввести в поле *Number of Iterations* (количество итераций) количество итераций 1000 и нажать кнопку

*Calculate* (вычислять). При этом начнётся процесс поиска решения (рис. 37). При поиске решения в графическом окне отображается график переменных, так называемых *невязок* (*Residuals*) по количеству решаемых уравнений, а в текстовом окне выводится таблица изменения невязок от итерации к итерации. Когда будет завершено требуемое количество итераций или на какой-то итерации все невязки окажутся меньше установленного по умолчанию значения (0.001), решение считается сошедшимся (*Solution is converged*), и расчёт заканчивается с появлением окна сообщения, в котором нужно нажать *OK*. Расчет необходимо проводить до линеаризации невязок.

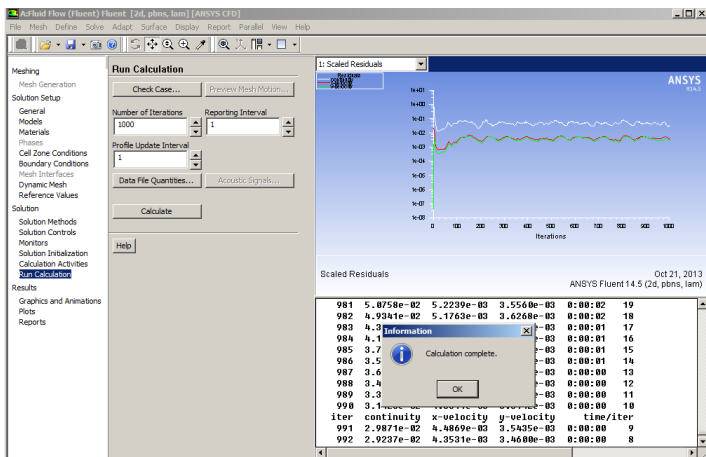


Рис. 37 - Вкладка *Run Calculation* и процесс поиска решения

**Шаг 8.** Просмотрим результаты расчёта. Для этого нужно перейти на вкладку *Graphics and Animations* (графика и анимация), выбрать вид представления результатов в виде контуров (*Contour*) (рис. 38).

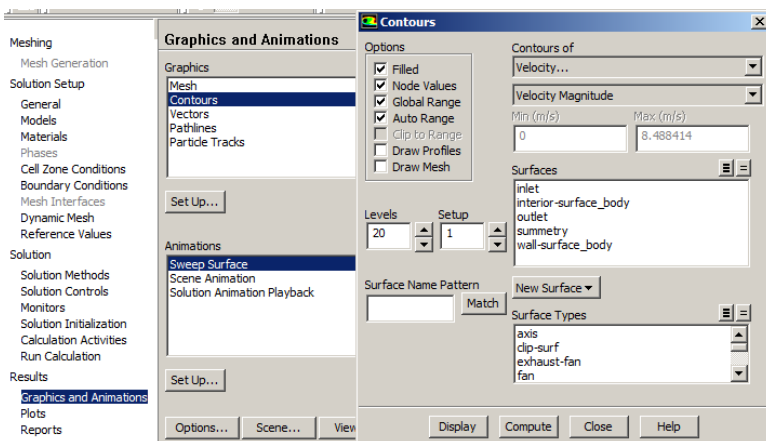


Рис. 38 - Меню представления полей параметров потока (*Contour*)

Задаём параметры визуализации в поле *Options* отмечаем *Filled* (залитые поля параметров), во вкладках *Contour Of* выбирается скорость *Velocity* → *Velocity Magnitude* и нажимается клавиша *Display*. При этом в графическом окне отобразится поле распределения скорости потока (рис. 39). На рисунке отчетливо прослеживается неустановившаяся вихревая структура, образующаяся при натекании потока на плохообтекаемое тело.

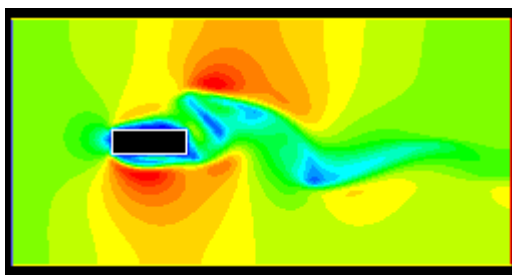


Рис. 39 - Поле распределения статического давления

**Шаг 9.** Следующим шагом необходимо посмотреть распределение векторов скорости потока. Для это нужно перейти в меню *Vectors*

(рис. 40). После нажатия клавиши *Display* в графическом окне появится распределение векторов потока (рис. 41).

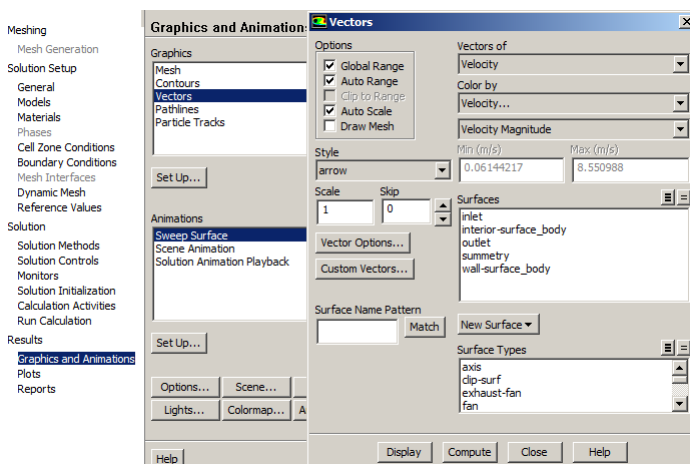


Рис. 40 - Меню отображения распределения векторов скорости потока

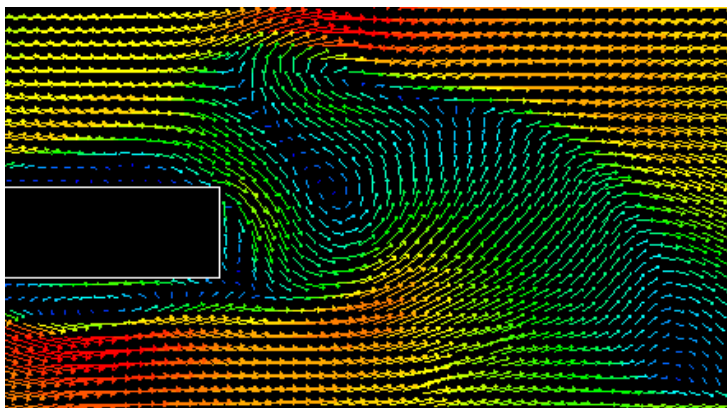


Рис. 41 - Распределения векторов скорости потока

Анализируя векторную картину, можно сделать вывод о формировании зоны возвратных течений и асимметричности течения за телом. Достаточно высокое значение невязок указывает на значительные изменения параметров потока от итерации к итерации и

свидетельствует о невысокой точности решения. Расчет подобного нестационарного (движущегося) течения в стационарной постановке может приводить к существенным погрешностям. Для стационарных расчётов турбулентных процессов рекомендовано применение моделей турбулентности, основанных на осреднении по времени турбулентных флуктуаций (RANS - Reynolds Averaged Navie-Stokes).

**Шаг 10.** Следующим этапом необходимо выбрать другую модель турбулентности и произвести расчет заново. Сначала выбирается модель турбулентности Спаларта-Алмараса (*Spalart-Allmaras*) (рис. 42). Модель подразумевает решение одного дополнительного уравнения турбулентности в дополнение к базовой системе, состоящей из уравнения сплошности (неразрывности, continuity) и уравнения момента количества движения по доступным осям (x-momentum, y-momentum).

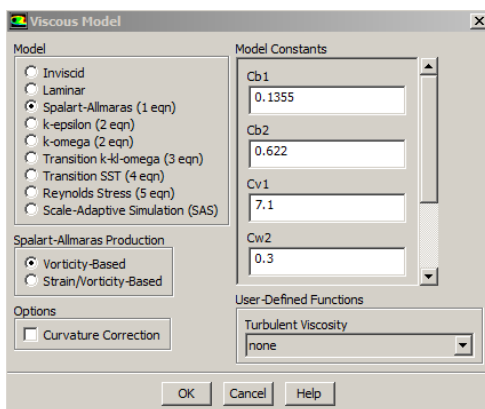


Рис. 42 - Выбор модели турбулентности Спаларта-Алмараса

При использовании модели турбулентности, все турбулентные вихри рассчитываются условно. При этом раскачивающаяся за плохо обтекаемым телом вихревая дорожка Кармана (см. рис. 39 и 40), состоящая из движущихся вихрей, заменяется на спокойный поток с указанием степени его турбулизации. Опирируя такими понятиями, как например, кинетическая энергия турбулентности (Turbulent Kinetic Energy), можно оценить, в какой области течение турбулизировано сильнее, а в какой более спокойное.

Для расчёта с применением условной модели турбулентности, необходимо в качестве граничных условий входящего потока указать его турбулентные свойства. Существует несколько способов задания турбулентных параметров потока: через коэффициент вихревой вязкости (Turbulent Viscosity Ratio), интенсивность турбулентности (Turbulent Intensity) и др. В сущности они сводятся к заданию уровня кинетической энергии турбулентности.

**Шаг 11.** Для задания параметров турбулентности входящего потока в ГУ входа устанавливается метод определения турбулентности по интенсивности и гидравлическому диаметру (рис. 43). В меню вводятся значения:

*Интенсивность турбулентности (Turbulent Intensity) -> 5%*  
*Гидравлический диаметр (Hydraulic Diameter, m) -> 0,1*

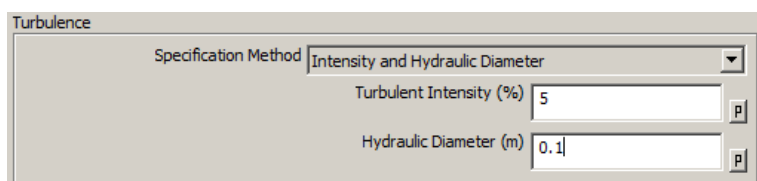


Рис. 43 - Определение параметров турбулентности на входной границе

**Шаг 12.** Затем в ГУ выхода устанавливаются значения турбулентности возвратного (Backflow) потока методом задания по интенсивности турбулентности и гидравлического диаметра (рис. 44). В меню вводятся значения:

*Интенсивность турбулентности (Backflow Turbulent Intensity) -> 5%*  
*Гидравлический диаметр (Backflow Hydraulic Diameter, m) -> 0,1*

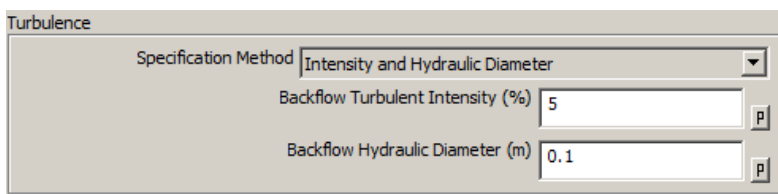


Рис. 44 - Определение параметров турбулентности на выходной границе

**Шаг 13.** Затем производится инициализация (аналогично шагу 6) и запускается расчет (аналогично шагу 7). После порядка 2500 итераций невязки линейризуются (рис. 45).

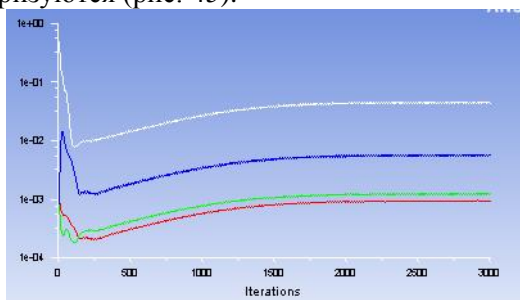


Рис. 45 - Поведение невязок при расчете на модели турбулентности Спаларта-Алмараса

**Шаг 14.** Затем по аналогии с шагом 9 снова просматриваются поля распределения скорости потока (рис. 46) и векторная картина (рис. 47).

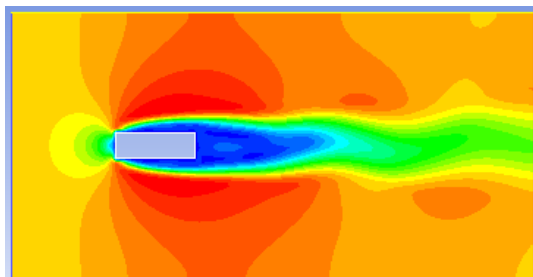


Рис. 46 - Поле распределения скорости потока

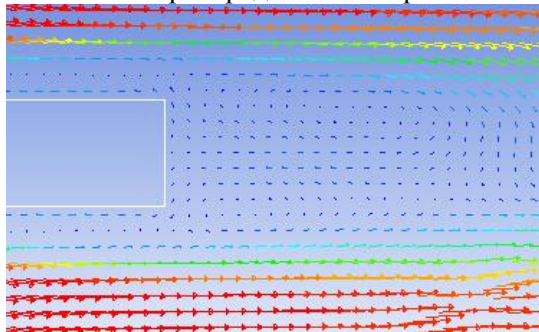


Рис. 47 - Вектора скорости потока за плохообтекаемым телом

При расчетах с использованием моделей турбулентности осредненных по Рейнольдсу *RANS (Reynolds Average Navier Stokes)* расчет движения отдельных вихрей заменяется на расчет эмпирических величин, определяющих осредненную картину распределения турбулентности. Поэтому в расчетной модели в результате формируется зона пониженной скорости потока, а также обратные течения. При этом крупные устойчивые вихри (возвратные течения), размером порядка 10 ячеек и более можно видеть в явном виде (см. рис. 47).

**Шаг 15.** Производится расчет с использованием модели турбулентности *k- $\omega$  (omega) SST*, которая является более «продвинутым продолжением модели *k-epsilon*. Смена модели турбулентности выполняется аналогично шагу 10, далее производится инициализация и расчёт. После расчета порядка 700 итераций невязки линеаризуются (рис. 48). На рис. 49 представлены результаты расчета: распределение скорости и векторная картина.

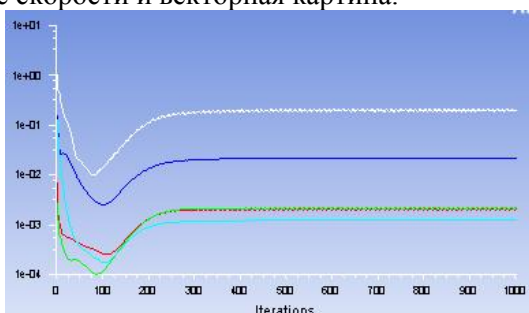


Рис. 48 - Поведение невязок при расчете на модели турбулентности *k- $\omega$  (omega) SST*

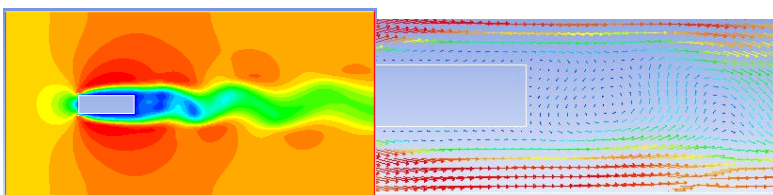


Рис. 49 - Результаты расчета на модели турбулентности *k- $\omega$  (omega) SST*



**Шаг 16.** Производится расчет с использованием модели реингольдсовых напряжений *Reynolds Stress*. Данная модель учитывает анизотропность турбулентности (разную интенсивность турбулентных пульсаций вдоль разных осей), в отличие от предыдущих моделей турбулентности, которые оценивают только интенсивность турбулентности в предположении её изотропности (равномерность пульсаций во всех направлениях). После расчета порядка 900 итераций невязки линейризуются (рис. 50). На рис. 51 представлены результаты расчета: распределение скорости и векторная картина.

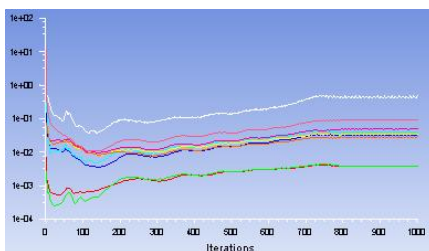


Рис. 50 - Поведение невязок при расчете на модели турбулентности *Reynolds Stress*

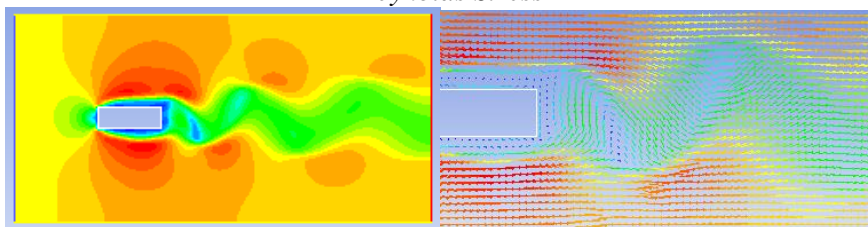


Рис. 51 - Результаты расчета на модели турбулентности *Reynolds Stress*

*Обратите внимание, что по мере усложнения модели турбулентности (увеличением числа решаемых уравнений) происходит значительное увеличение времени расчета. Также в зависимости от выбранной модели турбулентности изменяется прогнозируемая картина течения в области за обтекаемым телом. Для каждой модели турбулентности существуют свои рекомендуемые области применимости, они описаны в руководстве пользователя программного пакета.*

## Модификация расчётной модели

Во всех проведенных расчетах максимальные невязки находятся на уровне  $10^{-1}$  (рекомендуемое значение  $10^{-3}$ ), что указывает на недостаточно мелкую расчетную сетку. Другими словами сетка недостаточно мелкая в области повышенных градиентов параметров потока, что не позволяет произвести расчет с рекомендованной точностью. Для проверки влияния густоты расчетной сетки на получаемые результаты необходимо провести расчет на более качественной сетке.

**Шаг 1.** Создание копии модуля *Fluid Flow (Fluent)*. Для этого нужно, в рабочем поле *ANSYS Workbench* нажав правой кнопкой мыши первую строчку модуля (на синюю «шапку»), вызвать контекстное меню и в нём выбрать пункт *Duplicate* (дублировать). При этом произойдёт копирование проекта (рис. 52).

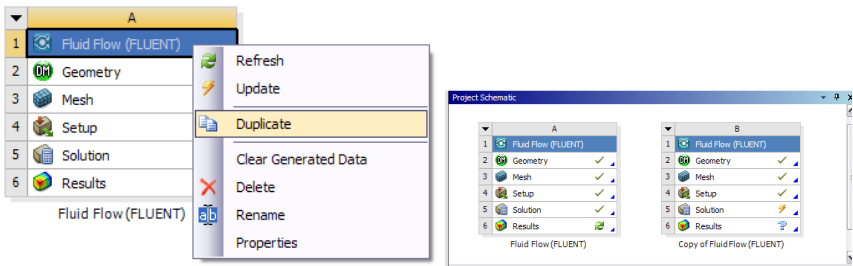


Рис. 52 - Дублирование проекта *ANSYS Workbench*

**Шаг 2.** Необходимо измельчить сетку вблизи обтекаемого тела. В скопированном модуле запускаем сеткогенератор *Meshing*. В дереве сеткогенератора выбираем пункт *Mesh*, щелкаем по нему ПКМ, в контекстном меню выбираем *Insert* → *Sizing* (рис. 53).

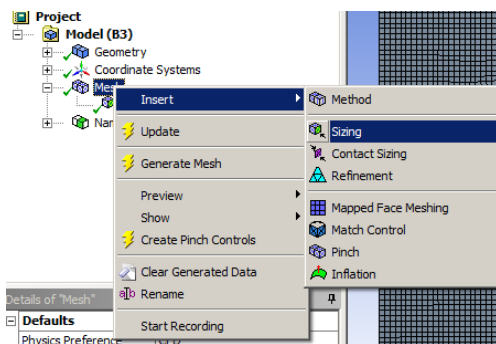




Рис. 53 - Добавление местного сгущения сетки

В окне свойств *Sizing* в поле геометрии выбираем 4 линии внутреннего прямоугольника (чтобы был доступен выбор линий на панели быстрого доступа необходимо выбрать фильтр ). В поле *Element Size* вводится значение  $0,0001$  м ( $0,1$  мм), а в поле *Growth Rate* указывается множитель роста ячеек  $1,05$  (рис. 54). Таким образом, последующая ячейка больше предыдущей в  $1,05$  раза. Чтобы изменения вступили в силу, нужно произвести обновление проекта нажатием кнопки . После этого можно закрыть *Meshing* и вернуться в *Workbench*.

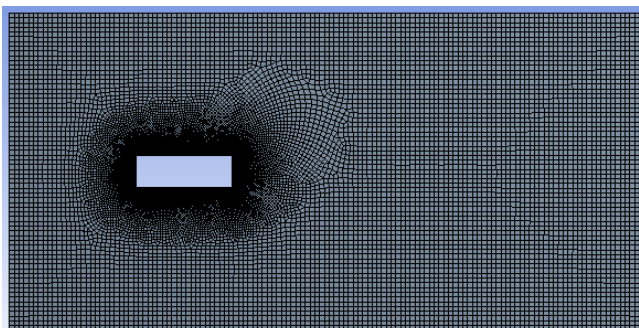


Рис. 54 - Улучшенная сетка с местным сгущением

**Шаг 3.** Запускается *Fluent*, двойным кликом ЛКМ на элементе *Setup* скопированного модуля. При этом на появившийся вопрос (рис. 55)

«Вышестоящая сетка данного элемента была изменена. Хотите загрузить новую сетку?» нужно ответить «Да».

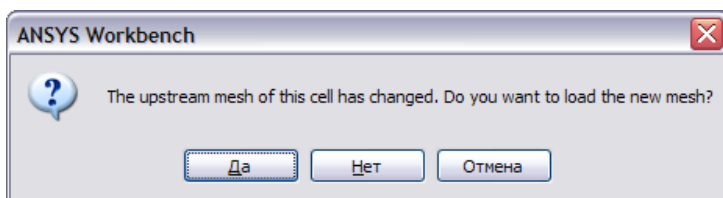


Рис. 55 - Окно сообщения

При этом будет открыт *Fluent* и в него будет загружена новая сетка. Затем необходимо проверить, чтобы в качестве модели турбулентности была выбрана модель *Reynolds Stress* (шаг 16), и были правильно указаны параметры турбулентности в граничных условиях (шаги 11, 12).

**Шаг 4.** Далее необходимо произвести инициализацию нового расчёта (*Solution Initialization -> Initialize*) и выполнить повторный расчёт (*Run Calculation -> Calculate*). Убедившись, что расчёт сошёлся, можно закрыть *Fluent* и вернуться в *Workbench*. На рисунке 56 показан график невязок расчёта.

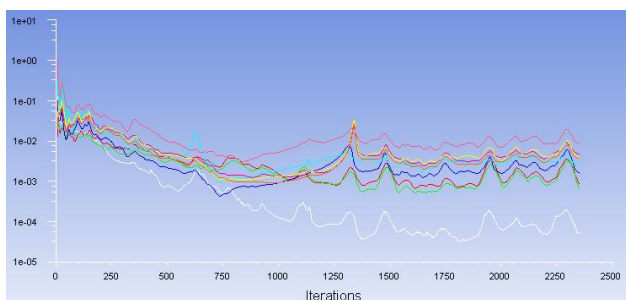



Рис. 56 - График невязок уточненного расчета

*Обратите внимание: Расчет выполняется существенно дольше из-за значительно возросшего числа сеточных элементов. А максимальное значение невязок находится на уровне  $5 \cdot 10^{-2}$  (что практически на порядок ниже максимального значения невязок на грубой сетке).*

## Анализ полученных результатов

**Шаг 1.** Сравнение результатов двух расчётов, удобно производить в одном блоке постпроцессора. Для этого нужно в *Workbench* в списке компонентов найти *Results*  *Results* (результаты) и поместить его на поле проекта двойным щелчком.

Далее нужно «подключить» результаты расчётов к этому блоку. Для этого нужно «схватить» элемент *Solution* первого расчёта, перенести его на элемент *Results* и «отпустить». При этом будет установлена связь. Затем аналогичным образом нужно установить вторую связь (рис. 57).

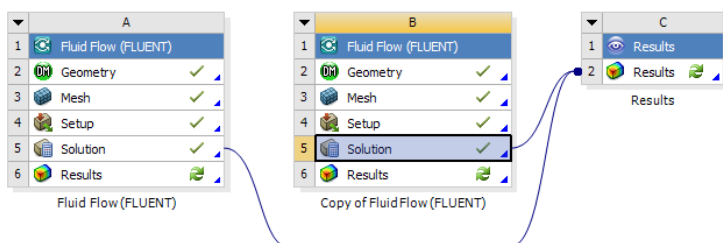


Рис. 57 - Компонент *Results*, связанный с двумя расчётами

**Шаг 2.** Необходимо выполнить сравнительный анализ результатов. Для этого нужно зайти в постпроцессор, дважды кликнув на элементе *Results*. При этом откроется окно постпроцессора *CFD Post* и в него загрузятся результаты обоих расчётов (рис. 58).

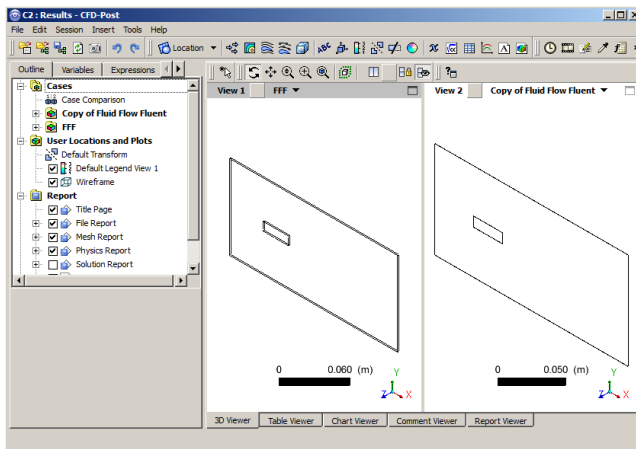


Рис. 58 - Окно постпроцессора с двумя расчётными моделями

**Шаг 3.** Создаём линию вдоль оси  $OX$  для построения графика . Для этого в главном меню выбираем пункт:

*Insert -> Location -> Line* 

и соглашаемся с именем по умолчанию, нажав ОК.

В окне детализации линии устанавливаем параметры (рис. 59):

*Point 1 -> 0 0 0*  
*Point 2 -> 1 0 0*  
*Line Type -> Cut*

и нажимаем *Apply*.

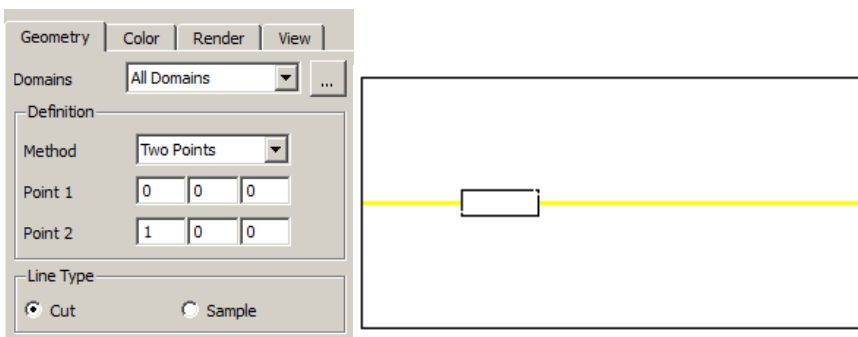


Рис. 59 - Добавление линии *Line 1*

**Шаг 4.** Создаём линию вдоль оси *OY* для построения графика. Для этого в главном меню выбираем пункт:

*Insert -> Location -> Line* 

и соглашаемся с именем по умолчанию, нажав ОК.

В окне детализации линии устанавливаем параметры (рис. 60):

*Point 1 ->*                            0        0        0

*Point 2 ->*                            0        1        0

*Line Type ->*    *Cut*

и нажимаем *Apply*.

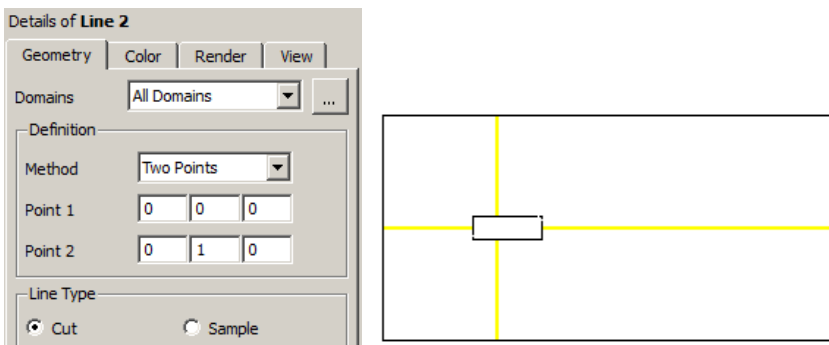



Рис. 60 - Добавление линии *Line 2*

**Шаг 5.** Добавляем график для просмотра распределения параметров потока на построенных линиях:

Insert ->  Chart

Меню настройка отображения графиков в виде данных состоит из нескольких вкладок. Ниже описаны настройки для отображения проекции скорости потока на ось  $OX$  по длине канала. Устанавливаем его параметры в окне детализации на нескольких вкладках:

Вкладка *Data Series*:

*Location* -> *Line 1*

Вкладка *X Axis*:

*Variable* -> *X*

Вкладка *Y Axis*:

*Variable* -> *Velocity u* (проекция скорости  $V_x$ )

И нажимаем *Apply*. При этом отрисовывается график скорости вдоль оси  $X$  на линии *Line 1* полученный в двух расчетах (рис. 61).

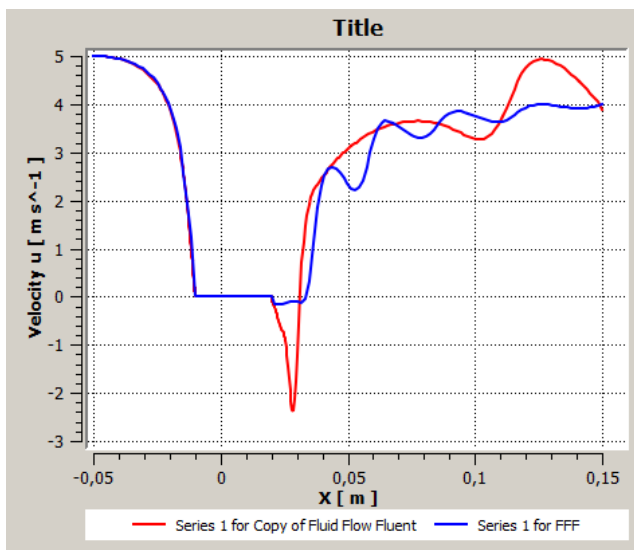


Рис. 61 – Распределение скорости вдоль линии *Line 1*



Далее нужно отобразить распределение параметров по созданной линии 2. Ниже описаны настройки для отображения проекции скорости потока на ось  $OX$  по высоте канала. Устанавливаем его параметры в окне детализации на нескольких вкладках:

Вкладка *Data Series*:

*Location* -> *Line 2*

Вкладка *X Axis*:

*Variable* -> *Velocity u* (проекция скорости  $V_x$ )

Вкладка *Y Axis*:

*Variable* -> *Y*

И нажимаем *Apply*. При этом отрисовывается график скорости вдоль оси  $Y$  на линии *Line 2* полученный в двух расчетах (рис. 62). Также могут быть получены графики других параметров, если в поле *Variable* на вкладке *Y Axis* задавать *Static Pressure*, *Static Temperature* и т.п.

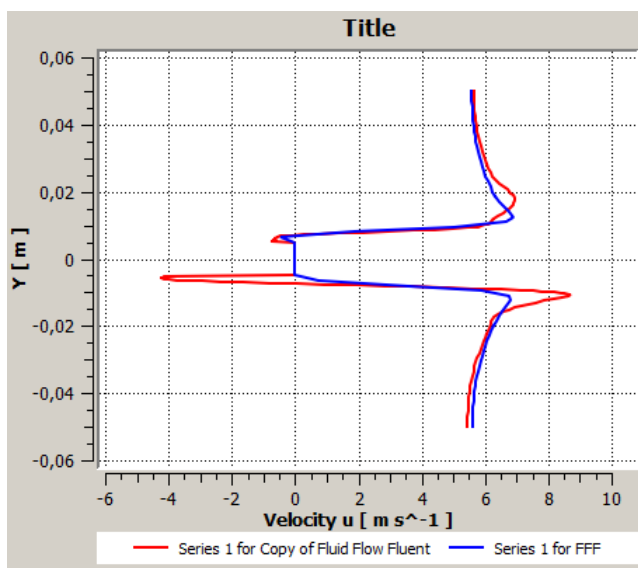


Рис. 62 – Распределение скорости вдоль линии *Line 2*

После просмотра результатов можно закрыть постпроцессор, и сохранить проект Workbench.

## **Преподавателю**

Лабораторная работа, выполняемая по данным методическим указаниям является третьей в цикле «САЕ-системы в МЖГ», рассчитана на 4 часа и предполагается следующий порядок выполнения работы:

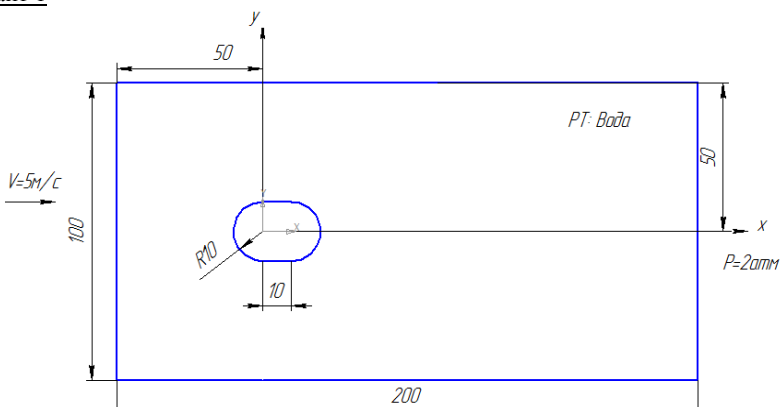
1. Преподавателем выполняется краткая лекция по моделированию турбулентности в форме медиа-презентации: пояснение принципов прямого численного моделирования, необходимости дополнительных моделей турбулентности, их классификация, требования к качеству сетки и т.п. - 0,5 ак. часа;

2. Под руководством преподавателя или по данным метод. указаниям студенты выполняют решение задачи определения потока вокруг плохо обтекаемого тела с использованием различных моделей турбулентности и на разных сетках. - 1,5 ак. часа;

3. Студенты самостоятельно выполняют индивидуальные задания по вариантам. По результатам выполнения самостоятельной работы преподаватель контролирует усвоение материала.

## Индивидуальные задания

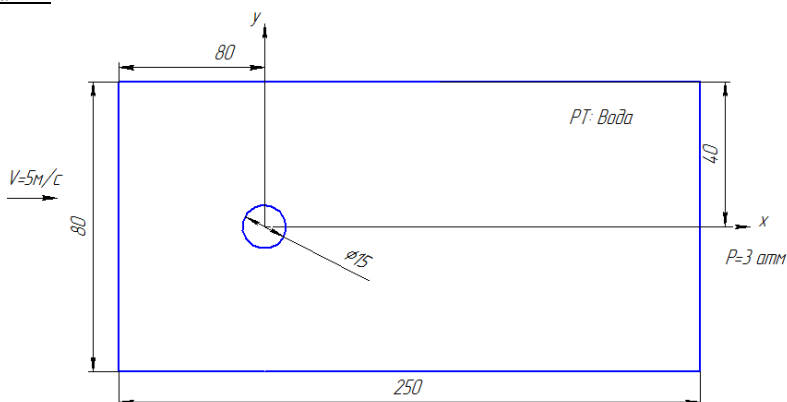
### Вариант 1



Задание: Отобразить поле распределения скоростей и построить графики проекции скорости потока  $V_x$  вдоль оси OX для двух вариантов расчета на сетке со сгущением:

- 1) с использованием модели турбулентности *k-epsilon*;
- 2) с использованием модели турбулентности *Spalart-Almaras*.

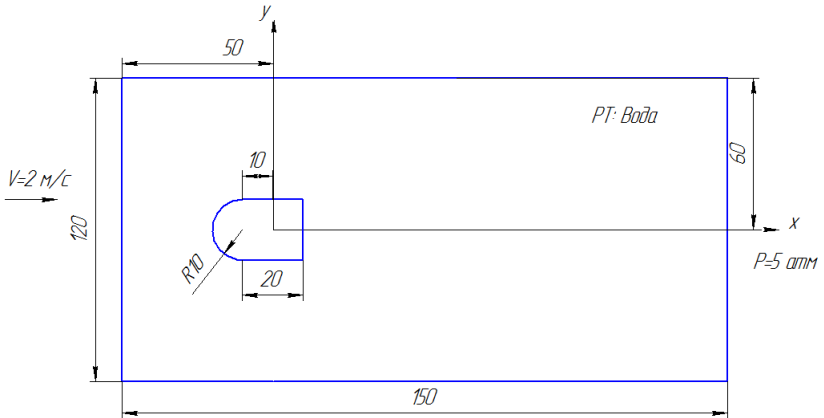
### Вариант 2



Задание: Отобразить поле распределения скоростей и построить графики проекции скорости потока  $V_x$  вдоль оси OX для трех расчетов на сетке со сгущением:

- 1) с использованием модели турбулентности *k-epsilon Realizable*;
- 2) с использованием модели турбулентности *k-omega*;
- 3) с использованием модели турбулентности *Reynolds Stress*.

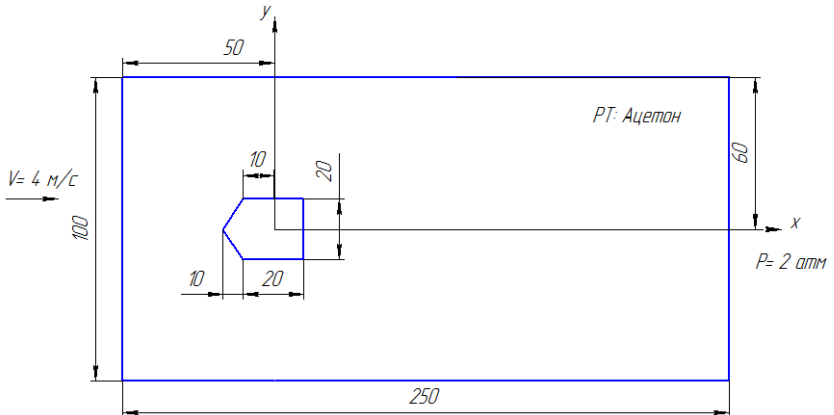
### Вариант 3



Задание: Отобразить поле распределения скоростей и построить графики проекции скорости потока  $V_x$  вдоль оси OY для двух расчетов с использованием модели турбулентности *k-epsilon Realizable*:

- 1) на грубой сетке (без сгущения);
- 2) на сетке со сгущением

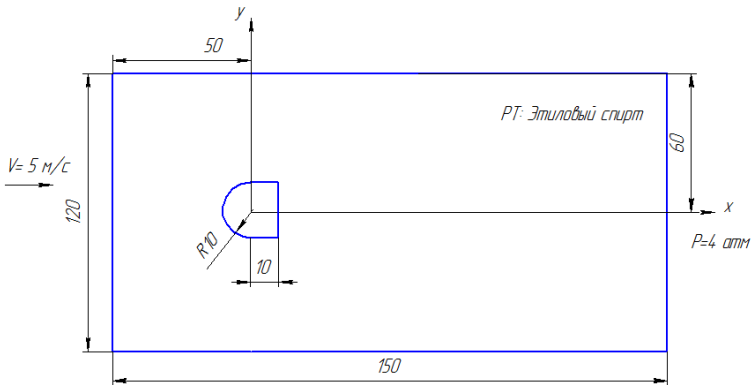
### Вариант 4



Задание: Отобразить поле распределения скоростей и построить графики проекции скорости потока  $V_x$  вдоль осей OX и OY для двух расчетов на сетке со сгущением:

- 1) без использования модели турбулентности (*Laminar*);
- 2) с использованием модели турбулентности *k-omega*.

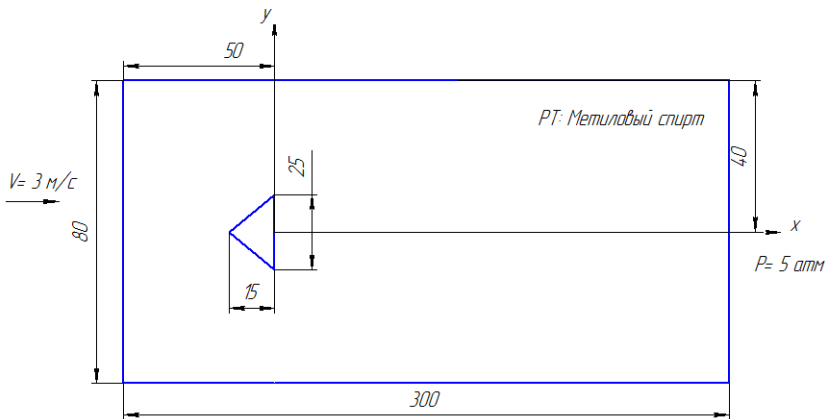
### Вариант 5



Задание: Отобразить поле распределения скоростей и построить графики проекции скорости потока  $V_x$  вдоль оси OX для двух расчетов с использованием модели турбулентности *Reynolds Stress*:

- 1) на грубой сетке (без сгущения);
- 2) на сетке со сгущением.

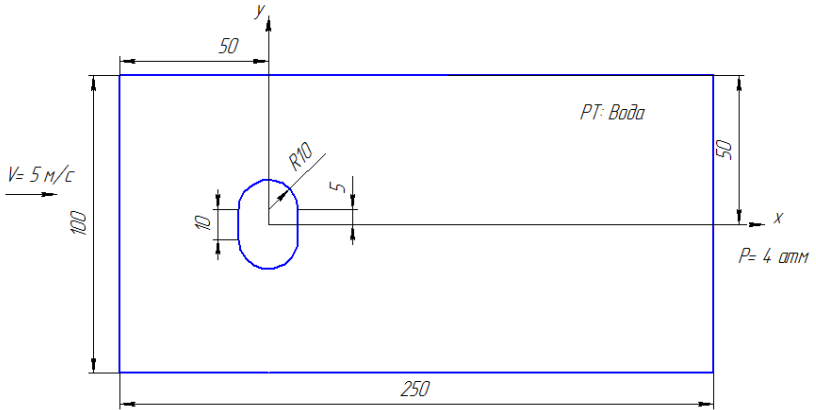
### Вариант 6



Задание: Отобразить поле распределения скоростей и построить графики проекции скорости потока  $V_x$  вдоль оси OX для двух расчетов на точной сетке:

- 1) с использованием модели турбулентности *k-epsilon Realizable*;
- 2) с использованием модели турбулентности *k-omega*.

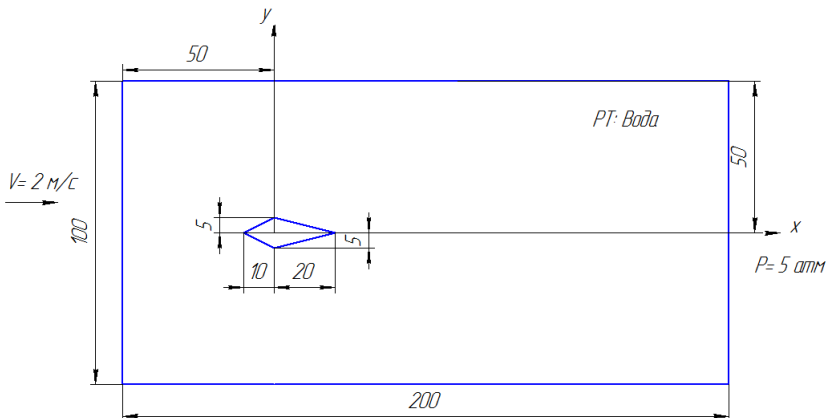
### Вариант 7



Задание: Отобразить векторное поле и построить графики проекции скорости потока  $V_x$  вдоль осей OX и OY для двух расчетов на сетке со сгущением:

- 1) с использованием модели турбулентности  $k\text{-}\omega$  (SST);
- 2) с использованием модели турбулентности *Reynolds Stress*.

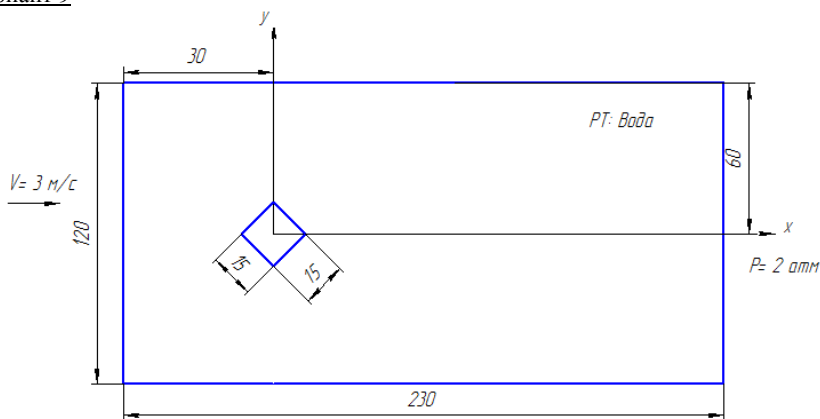
### Вариант 8



Задание: Отобразить векторное поле и построить графики проекции скорости потока  $V_x$  вдоль оси OX на точной сетке со сгущением для двух расчетов:

- 1) с использованием модели турбулентности  $k\text{-}\epsilon$  Realizable;
- 2) с использованием модели турбулентности  $k\text{-}\omega$ .

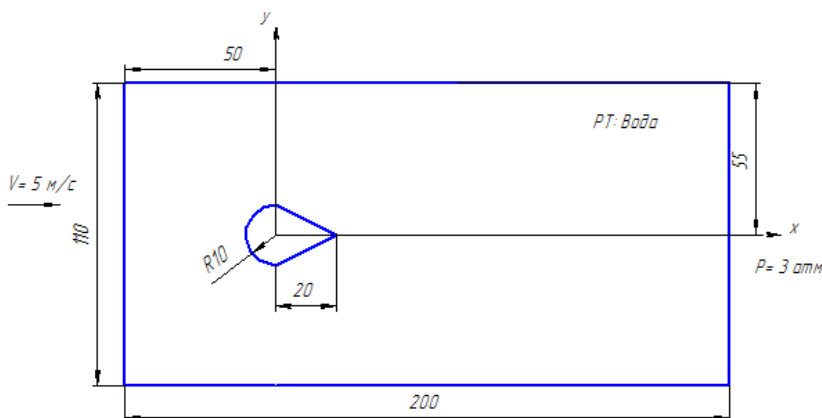
### Вариант 9



Задание: Отобразить векторное поле и построить графики проекции скорости потока  $V_x$  вдоль оси OY для двух расчетов с использованием модели турбулентности *Spalart-Almaras*:

- 1) на грубой сетке (без сгущения);
- 2) на точной сетке со сгущением.

### Вариант 10



Задание: Отобразить векторное поле и построить графики проекции скорости потока  $V_x$  вдоль оси OX для двух расчетов на сетке со сгущением:

- 1) с использованием модели турбулентности *k-epsilon*;
- 2) с использованием модели турбулентности *k-omega*.